



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIAS E SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

Francisco Moreira Alves Junior

**Mapeamento de índice de risco de inundação devido a rompimento de
barragem**

Araranguá/SC

2021

Francisco Moreira Alves Junior

**Mapeamento de índice de risco de inundação devido a rompimento de
barragem**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação de Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Cláudia Weber Corseuil

Coorientador: Prof. Dr. Álvaro José Back

Araranguá/SC

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Alves Junior, Francisco Moreira

Mapeamento de índice de risco de inundação devido a rompimento de barragem / Francisco Moreira Alves Junior ; orientador, Cláudia Weber Corseuil, coorientador, Álvaro José Back, 2021.

95 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade, Araranguá, 2021.

Inclui referências.

1. Energia e Sustentabilidade. 2. Onda de cheia. 3. HEC RAS 2D. 4. Mapeamento de risco. I. Corseuil, Cláudia Weber. II. Back, Álvaro José. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade. IV. Título.

Francisco Moreira Alves Junior

Mapeamento de índice de risco de inundação devido a rompimento de barragem

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.^a Cláudia Weber Corseuil, Dr.^a

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Maria Angeles Lobo Recio, Dr.^a

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Masato Kobiyama, Dr.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Marco Alésio Figueiredo Pereira, Dr.

Universidade Feevale

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Energia e Sustentabilidade.

Prof. Claus Tröger Pich, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação

Prof.^a Cláudia Weber Corseuil, Dr.^a

Orientadora

Araranguá, 2021.

Dedico este trabalho aos meus queridos pais Francisco e Maria de Fátima e a minha sempre presente esposa Érica.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Francisco Moreira Alves e Maria de Fátima Tomaz Alves, que sempre me incentivaram e acreditaram em mim.

À minha esposa, Érica da Silva Inácio, que sempre me apoio nos momentos mais difíceis dessa trajetória, nunca me deixando fraquejar em momento algum.

À toda minha família, em especial as minhas irmãs Fernanda, Fabiana e Francine pela motivação, apoio e ajuda para vencer mais uma etapa da vida.

À minha professora e orientadora, Cláudia Weber Corseuil, pelo incentivo e dedicada orientação para a elaboração deste trabalho.

Ao professor e coorientador, Álvaro José Back, pelas sábias contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pelas valiosas sugestões que possibilitaram melhorar muito este trabalho: Prof.^a Dr.^a Maria Angles Lobo Recio (UFSC), Prof. Dr. Masato Kobiyama (IPH/UFRGS), Prof. Dr. Marco Alésio Figueiredo Pereira (FEEVALE).

Aos meus colegas e professores pelo apoio direto e indireto, que tanto contribuíram para a minha formação pessoal e profissional.

À CASAN, em nome da Fabiane Andressa Tasca Goerl, pela disponibilização dos dados utilizados nesta pesquisa.

À todos que de alguma forma desejaram minha obtenção do título de Mestre.

RESUMO

As barragens têm um papel importante para a sociedade, porque proporcionam usos múltiplos da água e o desenvolvimento econômico e social de municípios, regiões e países. Entretanto, barragens podem apresentar falhas na sua estrutura, sendo um risco potencial para a população que vive na área a jusante do reservatório. Portanto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o índice de risco de inundação, devido ao rompimento hipotético da barragem de São Bento (SC). O índice de risco foi obtido combinando os índices de perigo e de vulnerabilidade. O perigo obteve-se multiplicando a velocidade pela profundidade da água, simuladas com o modelo hidrodinâmico HEC-RAS. O índice de vulnerabilidade foi determinado usando seis variáveis do censo demográfico de 2010 realizado pelo IBGE. Para simular a onda de cheia com o modelo HEC-RAS 2D, adotou-se como condição de contorno o nível máximo normal de 157,5 m e o volume do reservatório de 58,2 hm³ para o trecho a montante da barragem e uma declividade média de 0,0054 m.m⁻¹, determinada na planície de inundação do trecho a jusante. Para propagar o hidrograma de rompimento utilizou-se uma malha computacional de 136,72 km² com resolução espacial de 15 m x 15 m para a planície de inundação. Para a simulação da propagação do fluxo adotou-se um regime de escoamento “não permanente”, com intervalo de tempo computacional de 15 s. O tipo de rompimento utilizado para formação da brecha foi do tipo galgamento. Os resultados mostraram que, o tempo de formação da brecha acontece em 2 horas e 51 minutos, ocasionando uma mancha de inundação de 64,8 km², com uma vazão máxima de 3586,60 m³.s⁻¹ e o volume total extravasado de 44,75 hm³. Já o tempo de chegada da onda é de 55 minutos para a comunidade de São Bento Alto, a 6,5 km da barragem, 2 horas e 45 minutos para a comunidade de São Bento Baixo, a 15,5 km, e 4 horas e 30 minutos até a região central de Forquilha, a 22 km. A maior área da mancha de inundação possui uma profundidade de até 2 metros e velocidade de até 2 m.s⁻¹, predominando na região agrícola, possuindo uma maior profundidade e velocidade nas calhas dos rios e próximo a barragem. Observou-se no mapa de índice de risco que nas áreas mais próximas da barragem (até 6 km), o risco é alto, mesmo a região apresentando baixa densidade demográfica. Por ser uma área rural, as pessoas estão mais vulneráveis ao perigo da inundação, além disso, nessa região predominam pessoas com 60 anos ou mais e de baixa renda. Ainda, na área possível de ser atingida pela onda de cheia, existem residências, escolas, comércios e indústrias. Nesses locais, as pessoas não estão seguras dentro das edificações, pois estas têm alta probabilidade de serem destruídas devido à velocidade e profundidade da onda de cheia. Assim, o mapeamento de risco pode ser adotado como medida de prevenção, auxiliar na elaboração de um plano de ação emergencial, servir como um instrumento de educação para as comunidades e para o planejamento territorial.

Palavras-chave: Onda de cheia. HEC-RAS 2D. Mapeamento de risco.

Flood risk index mapping due to dam failure

ABSTRACT

Dams play an important role for a society, because they provide multiple uses of water and the economic and social development of municipalities, regions and countries. However, the dams can present flaws in their structure, being a potential risk for a population that lives in the area downstream of the reservoir. Therefore, the objective of the present work was to evaluate the flood risk index, due to the hypothetical failure of the São Bento dam (SC). The combined risk index combining the hazard and vulnerability indices. The hazard is obtained by multiplying the velocity by the water depth, simulated with the hydrodynamic model HEC-RAS. The vulnerability index was determined using six variables from the 2010 demographic census carried out by the IBGE. To simulate the flood wave with the HEC-RAS 2D model, the maximum normal level of 157.5 m and the reservoir volume of 58.2 hm³ for the upstream stretch of the dam and an average slope of 0.0054 mm⁻¹, supplied in the floodplain of the downstream stretch. To propagate the rupture hydrograph, a computational mesh of 136.72 km² was used with a spatial resolution of 15 m x 15 m for the floodplain. For a simulation of the flow propagation, a “non-permanent” flow regime was adopted, with a computational time interval of 15 s. The type of rupture used to form the breach was the overtopping type. The results showed that the breccia formation time takes place in 2.85 hours, causing a flood spot of 64.8 km², with a maximum flow of 3586.60 m³.s⁻¹ and the total overflow volume of 44, 75 hm³. The wave's arrival time is 55 minutes for the community of São Bento Alto, 6.5 km from the dam, 2 hours and 45 minutes for the community of São Bento Baixo, 15.5 km, and 4 hours and 30 minutes to the central region of Forquilha, 22 km away. The largest area of the flood patch has a depth of up to 2 meters and a velocity of up to 2 m.s⁻¹, predominantly in the agricultural region, having a greater depth and velocity in the river channels and close to the dam. It was observed in the risk index map that in the areas closest to the dam (up to 6 km), the risk is high, even in the region with low population density. As it is a rural area, people are more vulnerable to the hazards of flooding, in addition, in this region, people aged 60 years or more and with low income predominate. Still, in the area likely to be hit by the flood wave, there are houses, schools, businesses and industries. In these places, people are not safe inside the buildings, as they have a high probability of being destroyed due to the speed and depth of the flood wave. Thus, risk mapping can be adopted as a preventive measure, assisting in the elaboration of an emergency action plan, serving as an educational tool for communities and for territorial planning.

Keywords: Flood wave. HEC-RAS 2D. Risk mapping.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa topológico da rede hidrográfica que integra a bacia do rio São Bento.....	21
Figura 2 – Vista panorâmica da barragem do rio São Bento.....	22
Figura 3 – Vista transversal do processo de formação de brecha por galgamento.....	28
Figura 4 – Parâmetros geométricos da brecha.....	30
Figura 5 – Hidrograma triangular simplificado.....	34
Figura 6 – Hidrograma com decaimento parabólico.....	34
Figura 7 – Índice de Perigo.	40
Figura 8 – Fluxograma metodológico.....	43
Figura 9 – Localização da área de estudo.	44
Figura 10 – Fotografia da barragem principal do rio São Bento.	47
Figura 11 – Fotografia do dique principal e secundário da barragem do rio São Bento.	47
Figura 12 – Curva cota x volume do reservatório da barragem do rio São Bento.	48
Figura 13 – Curva de descarga do vertedouro do reservatório da barragem do rio São Bento.	49
Figura 14 – Curva de vazões dos descarregadores de fundo do reservatório da barragem do rio São Bento.	49
Figura 15 – Curva de descarga da válvula dispersora do reservatório da barragem do rio São Bento.	50
Figura 16 – Perfil transversal do nível mínimo do rio São Bento da estação Serrinha – Jus 200 m - CASAN.	51
Figura 17 – Detalhe da calha do rio São Bento nos mapas de uso do solo original (esquerda) e modificado (direita).	52
Figura 18 – Locais de entrada e saída do hidrograma na área de estudo.....	54
Figura 19 – Setores censitários a jusante da barragem do Rio São Bento.	58
Figura 20 – Mapa de uso e ocupação do solo.....	65
Figura 21 – Extensão da área de inundação simulada no HEC-RAS 2D.....	66
Figura 22 – Hidrograma resultante do rompimento simulado da barragem do rio São Bento.	67
Figura 23 – Comunidade de São Bento Alto antes da chegada da onda.....	68
Figura 24 – Situação no momento da chegada da onda (55min) na comunidade de São Bento Alto: (a) profundidade; (b) velocidade; e (c) índice de perigo.....	68
Figura 25 – Comunidade de São Bento Baixo antes da chegada da onda.	69

Figura 26 – Situação no momento da chegada da onda (2h45min) na comunidade de São Bento Baixo: (a) profundidade; (b) velocidade; e (c) índice de perigo.....	69
Figura 27 – Região central de Forquilha antes da chegada da onda.	70
Figura 28 – Situação no momento da chegada da onda (4h30min) em Forquilha: (a) profundidade; (b) velocidade; e (c) índice de perigo.	70
Figura 29 – Relação área do mapa por profundidade da lâmina de água.	71
Figura 30 – Mapa de inundação com as profundidades da lâmina de água.	72
Figura 31 – Relação área do mapa por velocidade da água.	73
Figura 32 – Mapa de inundação com as velocidades da lâmina de água.	73
Figura 33 – Mapa de índice de perigo de inundação.	74
Figura 34 – Mapas de inundação na comunidade de São Bento Alto: (a) profundidade máxima; (b) velocidade máxima; e (c) índice de perigo.	75
Figura 35 – Mapas de inundação na comunidade de São Bento Baixo: (a) profundidade máxima; (b) velocidade máxima; e (c) índice de perigo.	76
Figura 36 – Mapas de inundação em Forquilha: (a) profundidade máxima; (b) velocidade máxima; e (c) índice de perigo.	76
Figura 37 – Mapa das variáveis censitárias: (a) população total do setor; (b) média de moradores por residência; (c) densidade demográfica; (d) % de população dependente; (e) % de analfabetos; e (f) % da população com baixa renda.	78
Figura 38 – Mapa de índice de vulnerabilidade por setor censitário.	81
Figura 39 – Mapa de índice de risco de inundação.....	82

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tempos de recorrência mínimos recomendados para as cheias de projeto.....	26
Quadro 2 – Principais causas de rompimento de barragens	28
Quadro 3 – Variáveis censitárias e variáveis utilizadas para mensurar a vulnerabilidade.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características de parâmetros de formação de brecha	31
Tabela 2 – Equações empíricas para determinação da vazão de pico.....	32
Tabela 3 – Hidrogramas de rompimento.....	34
Tabela 4 – Limiares de indicadores para construir um mapa de perigo	40
Tabela 5 – Fatores referentes a vulnerabilidade	41
Tabela 6 – Dados hidrológicos da barragem do rio São Bento	47
Tabela 7 – Vazões características do reservatório de São Bento no nível máximo maximorum	50
Tabela 8 – Condições de contorno de entrada e saída	55
Tabela 9 – Valores do coeficiente de Manning para a bacia do rio São Bento.....	55
Tabela 10 – Dados da brecha.....	56
Tabela 11 – Identificação dos setores censitários.....	59
Tabela 12 – Índice de Desenvolvimento Humano dos Municípios a jusante da barragem	61
Tabela 13 – Níveis de Perigo de Inundação	62
Tabela 14 – Área e valores do coeficiente de Manning para cada uso do solo da malha computacional.....	64
Tabela 15 – Classificação das áreas de inundação em km ² para cada grau de perigo	74
Tabela 16 – Classificação das áreas de inundação das comunidades para cada grau de perigo	75
Tabela 17 – Dados das variáveis de vulnerabilidade por setor censitário.....	77
Tabela 18 – Dados das variáveis escalonadas e o índice de vulnerabilidade por setor censitário	80
Tabela 19 – Classificação das áreas de inundação das comunidades para cada grau de risco.	83
Tabela 20 – Classificação das áreas de inundação em km ² para cada grau de risco	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
BIG - Banco de Informações de Geração
CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens
CGH - Central Geradora Hidrelétrica
CIGB - Comissão Internacional de Grandes Barragens
CMP - Cheia Máxima Provável
CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos
HEC-RAS - Hydrological Engineering Center - River Analysis System
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICOLD - International Commission on Large Dams
IP - Índice de Perigo
IPR - Índice de Perigo e Risco
IR - Índice de Risco
MDT - Modelo Digital do Terreno
OMM - Organização Meteorológica Mundial
PAE - Plano de Ação de Emergência
PCH - Pequena Central Hidrelétrica
PMP - Precipitação Máxima Provável
PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens
RSB - Relatório de Segurança de Barragens
SNISB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
UHE - Usina Hidrelétrica
UNET - Unsteady Network Model
USACE - United States Army Corps of Engineers

LISTA DE SÍMBOLOS

- A - Área da seção (m^2)
- As - Área do reservatório para o NA máximo (m^2)
- B - Largura média da brecha (m)
- Bb - Largura final da brecha (m)
- Bd - Largura da barragem (m)
- Cf - Coeficiente de atrito
- F - Parâmetro de Coriolis (s^{-1})
- G - Aceleração gravitacional ($m.s^{-2}$)
- H - Elevação da superfície da água (m)
- h - Profundidade da água (m)
- Hb - Altura final da brecha (m)
- hb - Profundidade da brecha (m)
- hd - Altura da barragem (m)
- hw - Altura do reservatório em relação ao fundo da brecha (m)
- N - Coeficiente de Manning ($s.m^{-1/3}$)
- Qp - Descarga máxima defluente da barragem em rompimento ($m^3.s^{-1}$)
- Q - Vazão ($m^3.s^{-1}$)
- q - Contribuições ou abstrações de fluxo
- So - Declividade do fundo do rio ($m.m^{-1}$)
- St - Declividade da linha de energia ($m.m^{-1}$)
- T - Tempo (s)
- Tb - Tempo de base (s)
- Tp - Tempo de pico (s)
- tp - Tempo para o desenvolvimento da brecha (s)
- Ux - Componente do vetor velocidade na direção x ($m.s^{-1}$)
- Vy - Componente do vetor velocidade na direção y ($m.s^{-1}$)
- V - Velocidade ($m.s^{-1}$)
- Vm - Volume (m^3)
- Vr - Volume do reservatório para o NA máximo (m^3)
- Vrb - Volume do reservatório da barragem no momento do rompimento (m^3)
- Vt - Coeficiente de viscosidade turbulenta
- Ymédio - Profundidade média no reservatório no instante do rompimento (m)

Z - Declividade lateral da brecha ($m.m^{-1}$)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS.....	20
1.1.1	Objetivo Geral	20
1.1.2	Objetivos Específicos	20
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	21
2.1	BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO BENTO.....	21
2.2	ASPECTOS GERAIS SOBRE BARRAGENS	23
2.3	ASPECTOS DA LEGISLAÇÃO SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS ...	24
2.4	ROMPIMENTO DE BARRAGENS	27
2.4.1	Formação da Brecha.....	29
2.4.2	Vazão de Pico	32
2.5	MODELAGEM HIDRODINÂMICA COM HEC-RAS APLICADA PARA ROMPIMENTO DE BARRAGEM.....	35
2.6	MAPEAMENTO DE PERIGO, VULNERABILIDADE E RISCO	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1	ÁREA DE ESTUDO	44
3.2	MATERIAIS	47
3.2.1	Dados hidrológicos da barragem.....	47
3.2.2	Dados topográficos.....	51
3.2.3	Mapa de uso e ocupação do solo	52
3.3	MÉTODOS.....	53
3.3.1	HEC-RAS 2D	53
<i>3.3.1.1</i>	<i>Coeficiente de Manning</i>	<i>55</i>
<i>3.3.1.2</i>	<i>Dados da brecha.....</i>	<i>55</i>
3.3.2	Mapeamento do índice de vulnerabilidade	57
3.3.3	Mapeamento do índice de perigo.....	62

3.3.4	Mapeamento do índice de risco	63
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	64
4.1	MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	64
4.2	ÁREA INUNDADA COM O MODELO HEC-RAS 2D.....	65
4.3	MAPA DE ÍNDICE DE PERIGO	71
4.4	MAPA DE ÍNDICE DE VULNERABILIDADE	76
4.5	MAPA DE ÍNDICE DE RISCO.....	81
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	84
5.1	CONCLUSÕES	84
5.2	RECOMENDAÇÕES	85
	REFERÊNCIAS.....	86

1 INTRODUÇÃO

As barragens são importantes para a sociedade, porque proporcionam usos múltiplos da água (geração de energia, abastecimento de água, controle de cheias, irrigação, lazer, etc.) e o desenvolvimento econômico e social de municípios, regiões e países (MONTE et al., 2017). Entretanto, barragens podem apresentar falhas na sua estrutura, sendo um risco potencial para a população que ocupa as áreas a sua jusante (LAURIANO, 2009). No momento do rompimento de uma barragem, as vazões e os níveis de água resultantes são normalmente superiores às máximas naturais do trecho a jusante, atingindo bens materiais e populações que se consideram a salvo das inundações (COLLHISHONN e TUCCI, 1997; MARANGONI et al., 2017).

No Brasil, por exemplo, ocorrem em média oito desastres com barragens por ano, devido ao rompimento parcial ou total da estrutura e, principalmente, a eventos de chuvas intensas. No período entre 2011 a 2020 foram registrados 83 acidentes (ANA, 2021). No país, os dois maiores acidentes relacionados ao rompimento de barragens ocorreram nos municípios de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), ambos no estado de Minas Gerais. O rompimento da barragem de Mariana causou a morte de 19 pessoas e danos à comunidade a jusante, deixando milhares de pessoas sem água e sem trabalho. Já o rompimento da barragem de Brumadinho, chamada Mina Córrego do Feijão, causou vários danos materiais à população a jusante, deixando vários desabrigados e ocasionando a morte de mais de 300 pessoas (REZENDE e SILVA, 2019).

Portanto, a avaliação e o monitoramento das barragens são primordiais para a manutenção da integridade da estrutura, da operação e para garantir a segurança da população a jusante. Assim, a construção de uma barragem deve seguir rigorosamente as normas exigidas por lei, além do monitoramento constante das estruturas após a sua construção (ANA, 2018). Neste aspecto, a Lei nº 12.334/2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), exige para determinadas barragens um plano de ação de emergência (PAE) (BRASIL, 2010). Na elaboração do PAE podem ser utilizados modelos hidrológicos e hidrodinâmicos para estimar as áreas prováveis de serem inundadas, devido à onda de cheia, originada em caso de um rompimento da barragem, afetando a população, instalações, infraestruturas e o ambiente do vale a jusante (ANA, 2016). Esses modelos permitem a caracterização do perigo da inundação (magnitude da onda de cheia), devido às possíveis falhas de rompimento das barragens. Com base nesses modelos é possível elaborar um PAE, estimar a profundidade e a velocidade da água e o tempo de chegada da onda de cheia a jusante do barramento (XIONG, 2011).

Atualmente, existem diversos modelos hidrodinâmicos para simulação do rompimento de uma barragem, tais como, o HEC-RAS (USACE, 2016), o FLDWAV (NWS, 1998), o BOSS DAMBRK (BOSS INTERNATIONAL, 1999), entre os quais, segundo Veról (2010), o HEC-RAS é o mais utilizado. Esse modelo foi desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (HEC) do United States Army Corps of Engineers (USACE), e permite a simulação numérica da propagação do fluxo constante unidimensional e bidimensional em canais fluviais, utilizando as equações propostas por Saint-Venant para situações de escoamento permanente e turbulento (USACE, 2016). Diversos estudos utilizaram o modelo HEC-RAS para simular o rompimento de barragens e obtiveram resultados satisfatórios. No mundo, esse modelo foi utilizado, por exemplo, por Xiong (2011), Jung e Kim (2017) e Leoul e Kassahun (2019) e no Brasil por Kuhlkamp (2016), Mota (2017) e Ferla (2018). Os resultados desses estudos demonstram que o HEC-RAS pode ser útil para avaliar a segurança das barragens.

O eventual rompimento de uma barragem pode trazer consequências catastróficas, muitas vezes irreparáveis, como: danos ambientais, prejuízos financeiros e a perda de vidas humanas (VEIZAGA et al., 2017). Portanto, de acordo com Brasil (2010), as barragens devem ser classificadas quanto às consequências de um rompimento e quanto ao dano potencial, considerando os aspectos sociais, ambientais, estruturais e econômicos. Neste aspecto, a Lei nº 12.608/2012, que instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), definiu como dever da União, dos Estados e dos Municípios, adotar medidas para a redução dos riscos de desastre. Como medidas, essa lei estabelece as seguintes ações: monitorar, identificar e mapear as áreas de risco de desastres, além de realizar estudos de identificação de ameaças, suscetibilidades e vulnerabilidades (BRASIL, 2012).

Neste contexto, o mapeamento de risco é uma importante ferramenta de análise de áreas sujeitas ao risco de inundação, pois através deste é possível estabelecer medidas preventivas, quanto às possíveis situações de emergência que podem acontecer, bem como realizar um planejamento da ocupação das áreas sujeitas à inundação (BRITO, 2017).

O risco representa a possibilidade de perda para uma região habitada em um determinado tempo, devido à presença de um perigo. Comumente, o risco é definido como função do perigo e da vulnerabilidade (WISNER et al., 2004; UNISDR, 2016; MONTE et al., 2021). Assim, estudos têm procurado caracterizar o risco com base no perigo e na vulnerabilidade, como por exemplo, o de Goerl et al. (2012), que propuseram um método para mapeamento do índice de risco de inundação através do perigo estimado e do índice de vulnerabilidade. Também Monte et al. (2017), utilizaram diferentes metodologias para calcular

o índice de perigo de inundação e, em conjunto com o índice de vulnerabilidade, estimaram o índice de risco de inundação devido ao rompimento da barragem Lomba do Sabão, em Porto Alegre, RS.

O perigo pode ser definido como a possível ação de um evento que pode ocorrer em épocas e regiões conhecidas, podendo causar sérios danos socioeconômicos às comunidades expostas (UNDP, 2004; UNISDR, 2016; MONTE et al., 2021). Já o mapeamento do perigo de inundação representa a distribuição de potenciais consequências de uma inundação, sendo uma alternativa para melhorar a gestão das áreas inundáveis. Monteiro et al. (2021) comentam que, o uso de indicadores e categorias de perigo para o mapeamento mais detalhado são práticos e úteis. Neto et al. (2016), por exemplo, propuseram uma metodologia para o mapeamento de perigo utilizando os indicadores como: profundidade da água, velocidade do fluxo, carga de energia, força do escoamento e intensidade. Já Stephenson (2002) e Smith et al. (2014) utilizaram a profundidade e velocidade da água, como indicadores para o índice de perigo, sendo estes, usualmente utilizados para o mapeamento de perigo.

Por fim, a vulnerabilidade se refere às condições determinadas por fatores ou processos físicos, sociais, econômicos e ambientais, que aumentam a suscetibilidade de um indivíduo, de uma comunidade, de bens ou de sistemas, aos impactos de perigos (KOHLENER et al., 2004; UNISDR, 2016; MONTE et al., 2021). Moreira e Kobiyama (2021) analisaram 21 estudos brasileiros sobre índices de vulnerabilidade e verificaram que, a maioria dos estudos utilizaram os indicadores obtidos do censo 2010 realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), sendo que os indicadores mais utilizados foram: renda per capita, domicílios com banheiro sem esgotamento sanitário, densidade demográfica, domicílios com ou sem abastecimento de água por rede, e domicílios particulares precários. Andrade et al. (2017) e Debortoli et al. (2017) calcularam o índice de vulnerabilidade em escala municipal. Já Marcelino et al. (2006), Goerl et al. (2012) e Reis et al. (2014) utilizaram indicadores com base nas características socioeconômicas dos setores censitários do município.

Na região sul do estado de Santa Catarina existem diversas barragens construídas para regularização de vazão para fins de abastecimento de água, irrigação, mineração e geração de energia. A barragem do rio São Bento está localizada no município de Siderópolis, sendo inserida na bacia hidrográfica do rio São Bento. Nessa bacia, alguns estudos já foram realizados com objetivo de avaliar os impactos da construção da barragem, como por exemplo, Ming (2007), que desenvolveu um sistema computacional para previsão de inundações na região a jusante da barragem, usando o modelo HEC-RAS. Já Schwalm (2008) realizou a comparação do volume de projeto do reservatório da barragem do rio São Bento, com os volumes obtidos

em campo, utilizando de ferramentas de geoprocessamento. Porém, nenhum dos autores realizou a simulação do rompimento da barragem e avaliou a propagação da onda de cheia a jusante.

Estudos hidrológicos e hidrodinâmicos com enfoque em rompimento de barragens e mapeamento de risco de inundação ainda são incipientes na região sul de Santa Catarina. Sendo, portanto, de fundamental importância estudos que realizem modelagens hidrodinâmicas para compreender a magnitude com que ocorrem as inundações devido ao rompimento de uma barragem, bem como avaliar o risco de forma espacializada na área a jusante.

1.1 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos desta dissertação.

1.1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar o índice de risco de inundação, estimado em função de um índice de perigo de inundação e de vulnerabilidade, devido ao rompimento hipotético da barragem de São Bento, sul de Santa Catarina.

1.1.2 Objetivos Específicos

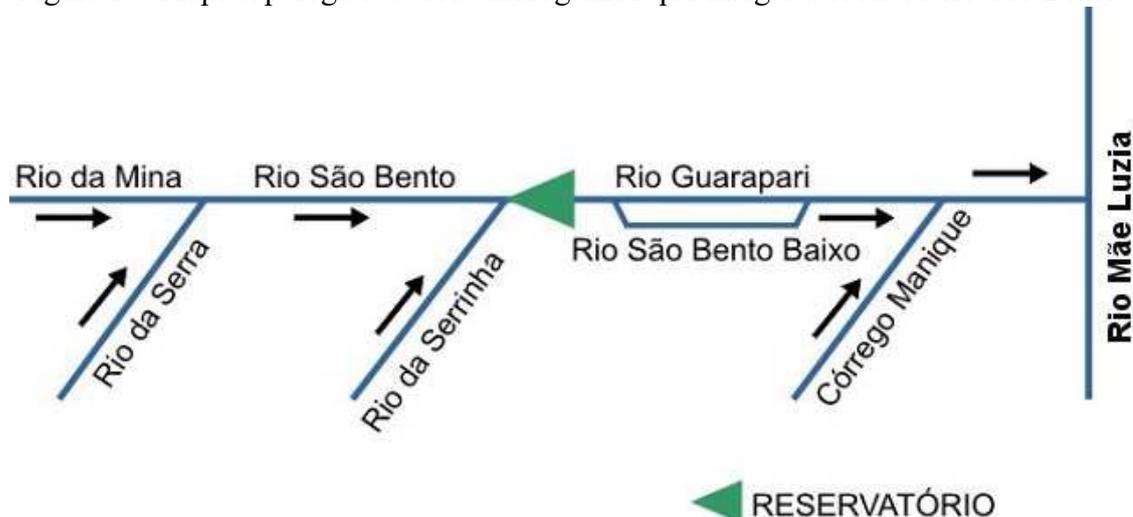
- Verificar o tempo de formação da brecha e o hidrograma de rompimento resultante de uma barragem de concreto;
- Simular o efeito do rompimento da barragem devido à formação de brecha com modelo HEC-RAS 2D;
- Verificar a área inundada pela onda de cheia, a velocidade e a profundidade da lâmina de água com modelo HEC-RAS 2D;
- Avaliar o índice de perigo de inundação usando a velocidade e a profundidade da lâmina de água estimada pelo modelo HEC-RAS 2D;
- Determinar um índice de vulnerabilidade usando variáveis do censo demográfico;
- Determinar um índice de risco a partir do índice de perigo e de vulnerabilidade.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO BENTO

A bacia hidrográfica do rio São Bento localiza-se na região sul do estado de Santa Catarina, sendo definida como uma sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Araranguá. A bacia abrange parcialmente os municípios de Bom Jardim da Serra, Treviso, Siderópolis, Nova Veneza e Forquilha (CASAN, 2004). Os rios formadores da bacia são o rio da Serra e o rio da Mina, o sistema hídrico é representado através da Figura 1, tendo suas nascentes localizadas junto à Serra Geral (COSTA, 2008).

Figura 1 – Mapa topológico da rede hidrográfica que integra a bacia do rio São Bento.



Fonte: CASAN (2004)

Com a construção da barragem do rio São Bento, localizada após o encontro do rio São Bento e Serrinha, a área de drenagem da bacia a montante é de 113,79 km², já a contribuição a jusante até sua foz no rio Mãe Luzia possui uma área de 43,61 km². Na Figura 2 é possível visualizar a barragem e seu reservatório no início da Serra Geral, e as áreas cultivadas a jusante do barramento (CASAN, 2004).

Visando solucionar os problemas de escassez de água devido às estiagens ocorridas na região carbonífera, a Companhia Catarinense de Água (CASAN) iniciou após muitos estudos e projeto, a construção da barragem em 2001 e teve sua conclusão em 2003 com o início do enchimento do reservatório. O primeiro vertimento do barramento ocorreu em maio de 2004 (DELLA, 2014). A principal finalidade da barragem do rio São Bento é o abastecimento

público, porém ela serve para outros usos, tais como: contenção de cheias da região a jusante, irrigação de áreas cultivadas e manutenção da vazão ecológica dos rios (COSTA, 2008).

Figura 2 – Vista panorâmica da barragem do rio São Bento.



Fonte: CASAN (2006)

Na bacia do rio São Bento, vários estudos já foram realizados com objetivo de avaliar os impactos da construção de uma barragem. Ming (2007), por exemplo, desenvolveu um sistema computacional para previsão de inundações na região a jusante da barragem, usando o modelo HEC-RAS para simular três cenários de cheias (evento pluviométrico de 2006 e períodos de retorno de 100 e 1000 anos). Esse autor destaca que a qualidade dos resultados depende muito do Modelo Digital de Elevação, pois a imprecisão do mesmo, pode invalidar os resultados finais.

Com o auxílio de ferramentas de geoprocessamento, Schwalm (2008) realizou a comparação do volume do reservatório da barragem do rio São Bento, com os volumes obtidos em campo a partir das curvas de nível e seções transversais espaçadas de 100 m, 50 m e 20 m. Como resultados obteve que o volume na cota máxima para os diferentes espaçamentos das

seções apresentou diferenças inferiores a 1% ao valor informado no projeto executivo, já para o volume obtido através da topografia foi 4,82% inferior.

Já Costa (2008) desenvolveu um processo hidrológico aplicado ao controle hidráulico-operacional do reservatório da barragem do rio São Bento e verificou que os dados de precipitação da estação meteorológica de Urussanga, que serviu de base para o projeto da barragem são menores que os dados analisados na bacia do rio São Bento. Consequentemente, concluiu que além da precipitação da bacia do rio São Bento ser maior, as vazões reais também sejam superiores as vazões estimadas.

Através de uma caracterização ambiental da bacia do rio São Bento, Scarpato (2008) observou que aproximadamente 25% das áreas consideradas de preservação permanente estão ocupadas irregularmente por alguma ação antrópica, principalmente por áreas de cultivos próximos aos corpos d'água, aumentando assim a instabilidade do solo com possibilidades de erosões intensas.

2.2 ASPECTOS GERAIS SOBRE BARRAGENS

Pode se definir barragem como uma estrutura construída transversalmente a um rio ou talvegue, com o propósito de aumentar seu nível d'água, criando assim um reservatório de acumulação, ou para a regulação das vazões do rio, ou de outro fluido (BRASIL, 2010).

De acordo com ICOLD (2007) as principais finalidades das barragens são: irrigação (48,6%), energia hidrelétrica (17,4%), abastecimento (12,7%), controle de enchentes (10%), lazer (5,3%), navegação e piscicultura (0,6%) e outras funções (5,4%). Já os usos principais das barragens no Brasil submetidas ao PNSB são: irrigação (34%), abastecimento humano (20%), hidrelétrica (17%) e contenção de rejeitos de mineração (8%) (ANA, 2020).

No Brasil, a construção de barragens teve início após a grande seca do Nordeste, iniciada em 1877 com mais de 3 anos de duração, deixando grandes perdas na região. Ceará foi um dos estados mais afetados e perdeu um terço de sua população. Este fenômeno natural foi considerado a maior tragédia nacional ocorrida devido à falta de água (CBDB, 2011).

Dentre os diferentes tipos de barragens construídas no Brasil, as mais comuns são de terra, enrocamento e de concreto, sendo que o tipo varia em função dos aspectos topográficos, geológicos e geotécnicos da região (VERÓL, 2010).

As barragens de terra são apropriadas para locais onde a topografia é suavemente ondulada e onde os vales são pouco encaixados. Barragens de enrocamento são mais adequadas para locais de vales medianamente encaixados e regiões rochosas. Já barragens de concreto são

recomendadas para vales estreitos, encaixados, com maciço rochoso, pouco fraturado e com boas condições de fundação (ELETROBRAS, 2010).

Indiferente do tipo de barragem, nenhuma está imune ao risco de rompimento. Porém, historicamente, a maioria dos rompimentos de barragens no mundo ocorreu em barragens de terra e principalmente ocasionadas por evento de cheias (USACE, 2014).

2.3 ASPECTOS DA LEGISLAÇÃO SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS

Fenômenos naturais como enchentes, deslizamentos e terremotos, ou até mesmo o desgaste causado pelo uso, podem afetar a segurança de uma barragem. Por isso a importância de realizar o controle e monitoramento contínuo do desempenho da barragem, para evitar qualquer possível falha (VERÓL, 2010). Medidas da defesa civil, complementam neste auxílio para minorar as consequências de uma possível ocorrência de acidente, principalmente em casos como rompimento de barragens, onde os danos podem ser altos, levando até mesmo a fatalidades (ANA, 2018).

De acordo com Balbi (2008), por mais que uma barragem possua projeto e construção adequados, ainda podem existir riscos remanescentes. Para isso, deve-se realizar a avaliação de segurança das estruturas, como prevenção e detecção prévia das situações de risco.

O acidente da barragem da Cataguases, em 2003, foi o marco para apresentação de um projeto de lei referente à segurança de barragens no Congresso Nacional. Posteriormente os acidentes nas barragens de Camará, em 2004, e Mineração Rio Pomba-Cataguases, em 2007, foram marcados pela exigência da sociedade por mais comprometimento das autoridades e dos proprietários de barragens (BALBI, 2008).

Desta forma, em 2010, foi criada a Lei de segurança de barragens nº 12.334, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) (BRASIL, 2010).

Entretanto, no dia 1 de outubro de 2020, foi sancionada a Lei nº 14.066, que altera a Lei nº 12.334 de 2010. Logo, a Lei nº 14.066 surge como uma resposta do governo referente as recentes tragédias envolvendo rompimento de barragens: Mariana (2015) e Brumadinho (2019). Essas modificações determinam uma maior comunicação entre o responsável pelas barragens e os demais órgãos de segurança (COSTA E SILVA, 2021).

A Lei nº 12.334 é aplicada para as barragens destinadas à acumulação de água para qualquer tipo de uso, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos

industriais que apresentem pelo menos uma das seguintes características: (a) altura do maciço, do pé do talude de jusante ao nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 metros; (b) volume do reservatório maior ou igual a 3 hm³; (c) reservatório que contenha resíduos perigosos; (d) categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 7º desta Lei; (e) categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador, conforme definido no art. 7º desta Lei (BRASIL, 2010).

As barragens no Brasil são classificadas por categoria de risco, dano potencial associado e volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), Brasil (2010).

Quanto à categoria de risco as barragens são classificadas de acordo com características técnicas (altura; comprimento; material de construção; fundação; idade; tempo de recorrência da vazão de projeto do vertedouro), do estado de conservação do empreendimento (confiabilidade das estruturas extravasoras e captação; eclusa; percolação; deformações e recalques; deterioração dos taludes) e do atendimento ao PNSB (CNRH, 2012).

Para CNRH (2012) os critérios gerais utilizados para classificação quanto ao dano potencial associado à área afetada são: (a) existência de população a jusante com potencial de perda de vidas humanas; (b) presença de unidades habitacionais ou equipamentos urbanos ou comunitários; (c) presença de infraestrutura ou serviços; (d) existência de áreas protegidas definidas em legislação; (e) natureza dos rejeitos ou resíduos armazenados; e (f) volume.

A base para o PNSB é o Relatório de Segurança de Barragens (RSB) que devem constar todas as barragens existentes. No RSB de 2018, foram cadastradas 17.604 barragens pelos órgãos fiscalizadores. Havendo uma diminuição no número de barragens cadastradas comparado ao RSB de 2017, onde houve o cadastro de 24.092 barragens (ANA, 2018).

Das barragens cadastradas, 61% não existem informações suficientes para dizer se elas se submetem ou não à PNSB. Isso demonstra a carência de informações básicas das barragens brasileiras, um desafio a ser enfrentado pelos órgãos fiscalizadores (ANA, 2018).

Os estudos hidrológicos são de fundamental importância para o projeto das barragens, pois através deles podem se obter: as vazões fornecidas pelo aproveitamento e probabilidade de garantia dessas vazões; os hidrogramas das cheias naturais e modificadas, para dimensionamento dos órgãos extravasores, definitivos e provisórios; as curvas de vazão nas seções de restituição; e o volume de sedimentos afluentes ao reservatório (ANA, 2016).

Para os tempos de recorrência a adotar no dimensionamento dos órgãos extravasores e proteção contra cheias, estes devem ser fixados, de acordo com o tipo, altura e classificação

da barragem quanto ao dano potencial associado (ANA, 2016). No Quadro 1 são apresentados os tempos de recorrência mínimos, recomendados para as cheias de projeto.

A cheia máxima provável (CMP) deverá ser determinada recorrendo a modelos de precipitação-escoamento tendo como base a precipitação máxima provável (PMP), que deve ser obtida através do Manual de Estimação da PMP, desenvolvido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). Para casos de dados insuficientes para a estimação da PMP, poderá adotar-se o período de recorrência de 10 000 anos (ANA, 2016).

Quadro 1 – Tempos de recorrência mínimos recomendados para as cheias de projeto.

Altura, h (m)	Volume, V (hm^3)	Tempo de recorrência (anos)
$h \geq 30$	$V \geq 50$	CMP ou 10000
$15 \leq h < 30$	$3 \leq V < 50$	1000
$h < 15$	$V < 3$	500

Fonte: adaptado de Ana (2016).

Para complementar os estudos hidrológicos, deve ser avaliada um eventual rompimento da barragem, identificando as áreas inundáveis e o tempo de propagação das cheias. Estes estudos através de modelos hidrodinâmicos irão permitir classificar o dano potencial associado. Para barragens classificadas com dano potencial associado alto e/ou se a entidade fiscalizadora o determinar, além dos estudos de rompimento de barragem, deve-se realizar o Plano de Ação de Emergência (PAE), e definir os sistemas de aviso e previsão de cheias (ANA, 2016).

Para a realização do PAE, ANA (2016) orienta a utilização de modelos hidrodinâmicos mais conhecidos, como os modelos HEC-RAS e BOSS DAMBRK, no entanto, permite a utilização de métodos simplificados, a critério da entidade fiscalizadora, para barragens de pequeno porte com altura do maciço menor que 15 m e capacidade total do reservatório menor do que 3 hm^3 .

Para a topografia do vale a jusante, a legislação permite, na falta de outra topografia disponível, a utilização do modelo digital de elevação (MDE) obtido através da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), que possui resolução planimétrica de 90 m x 90 m e altimetria à escala de 1:250.000 (ANA, 2016).

O vale a jusante, conforme ANA (2016), deve ser caracterizado de acordo com o tipo de povoamento e ocupação social, número de habitantes residentes e ocupantes temporários, principais infraestruturas, áreas naturais com proteção especial e patrimônio com interesse histórico.

ANA (2016) destaca que após a caracterização do vale a jusante e mapa de inundação devesse realizar o mapeamento da zona de autossalvamento (ZAS), considerando a altura da lâmina de água, a velocidade do fluido e o tempo de chegada da onda. O ZAS deve conter a delimitação da região a jusante da barragem que está até 10 km ou 30 minutos da chegada da onda de inundação.

2.4 ROMPIMENTO DE BARRAGENS

O rompimento da barragem constitui uma perda da integridade estrutural, podendo ocorrer, de forma incontrolável, o esvaziamento do reservatório ocasionado pelo colapso total ou parcial da barragem (BRASIL, 2002).

O rompimento de uma barragem é um acidente tecnológico pouco frequente, porém com grandes consequências e com potencial de risco muito alto ao vale a jusante. O avanço científico e tecnológico ao longo do tempo, fez com que as frequências dos acidentes associados às grandes barragens diminuíssem, principalmente, com o controle de qualidade e segurança nas fases de projeto, execução e exploração (VISEU e ALMEIDA, 2011).

Os eventos relacionados à rompimento de barragens, destacam Veizaga et al. (2017), normalmente são catastróficos, tendo como consequências, prejuízos financeiros, ambientais e perdas de vidas humanas. Ainda hoje há incertezas quanto aos efeitos do rompimento das barragens, porque poucas pesquisas comparam resultados de análise, com estudos de casos reais. Assim, estudos sobre rompimento de barragens se tornam cada vez mais relevantes para uma melhor compreensão das consequências críticas.

Conforme Mascarenhas (1990) as principais causas de rompimento de barragens podem ser divididas em duas categorias, as causas materiais e/ou naturais e as causas induzidas pela ação humana. O Quadro 2 mostra os principais tipos de acidentes de acordo com sua categoria e suas possíveis causas.

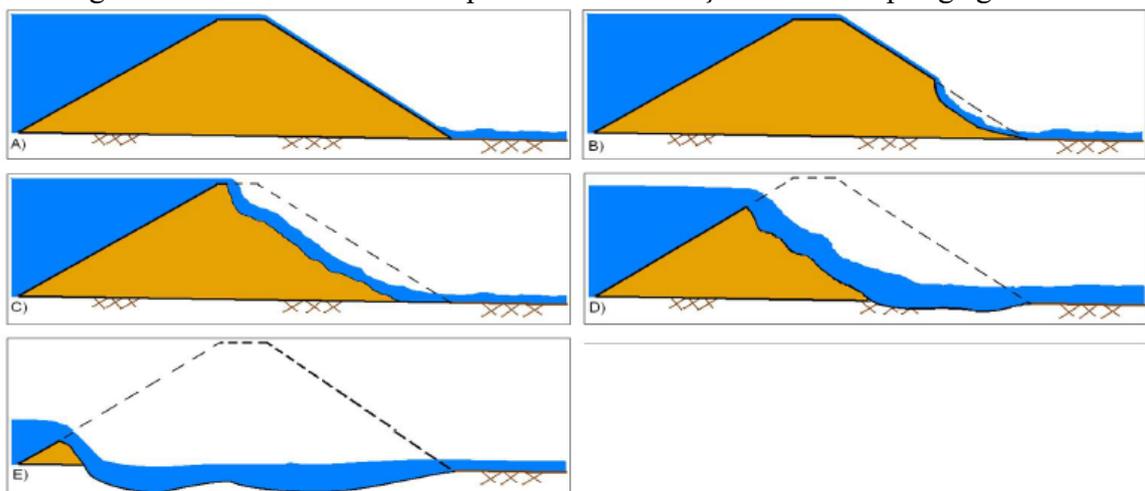
Quadro 2 – Principais causas de rompimento de barragens

Categoria	Tipos	Causas
Causas Materiais e/ou Naturais	Galgamento (<i>overtopping</i>)	Deslizamento de barragens de gravidade devido a incapacidade na liberação de grandes volumes de água pelos vertedouros.
	Entubamento (<i>piping</i>)	Erosão interna da barragem ou de suas fundações pela percolação de água.
	Falha no Projeto e/ou Construção	Projetos ineficientes de vertedouros, análises não criteriosas dos materiais constituintes da obra, entre outros.
Causas Humana	Operação inadequada do reservatório	Falhas nos procedimentos operacionais.
	Terremotos induzidos	Peso excessivo de água no reservatório, redução na resistência a tensões na camada rochosa profunda devidos as pressões.

Fonte: adaptado de Mascarenhas (1990).

Conforme Vischer e Hager (1997) o tipo de rompimento mais comum de ocorrer em barragens de concreto é do tipo galgamento (*overtopping*). Esse tipo de rompimento pode ocorrer devido ao grande volume de água que chega no reservatório e o vertedouro da barragem não é capaz de extravasar, aumentando o nível da água consideravelmente, conforme ilustra a Figura 3 (TSCHIEDEL, 2017).

Figura 3 – Vista transversal do processo de formação de brecha por galgamento.



Fonte: USACE (2014)

Para Veról (2010) a divulgação dos acidentes já ocorridos, com as respectivas causas e consequências é de grande importância, pois reforça a necessidade da compreensão e do estudo de rompimento de barragens.

O pior acidente decorrente de rompimento de barragem de abastecimento no Brasil, ocorreu no Ceará, em 1960, no açude de Orós. Em menos de uma semana, a precipitação foi superior a 635 mm, este evento hidrológico provocou uma brecha na estrutura de 201 metros. A onda de cheia atingiu o vale a jusante e se estendeu por 338 quilômetros, até atingir o Oceano Atlântico. Aproximadamente 90% do reservatório foi esvaziado, estima-se que a vazão de pico atingiu $9.600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Em função deste acidente, aproximadamente 1000 pessoas morreram (MASCARENHAS, 1990; LAURIANO, 2009).

No Brasil, os dois maiores desastres socioambientais relacionados à rompimento de barragens ocorreram nos municípios de Mariana e Brumadinho, ambos no estado de Minas Gerais. Em 2015 em Mariana, quando a barragem denominada Fundão se rompeu estima-se que 43,7 milhões m^3 de rejeitos de minério extravasaram, causando a morte de 19 pessoas, destruindo várias localidades a jusante, deixando milhares de pessoas sem água e sem trabalho. Já a barragem de Brumadinho, denominada de B1 da Mina Córrego do Feijão, se rompeu em 2019, estima-se que 11,7 milhões de m^3 de rejeitos extravasaram, deixando vários desabrigados e ocasionando a morte de mais de 300 pessoas (REZENDE e SILVA, 2019).

De acordo com ANA (2018), no Brasil há em média mais de três acidentes com barragens por ano. De 2011, ano do primeiro relatório, até 2018, foram registrados 27 acidentes e 54 incidentes, porém, este número pode ser ainda maior, a agência reconhece que há acidentes não relatados e até mesmo barragens que não foram informadas ao governo.

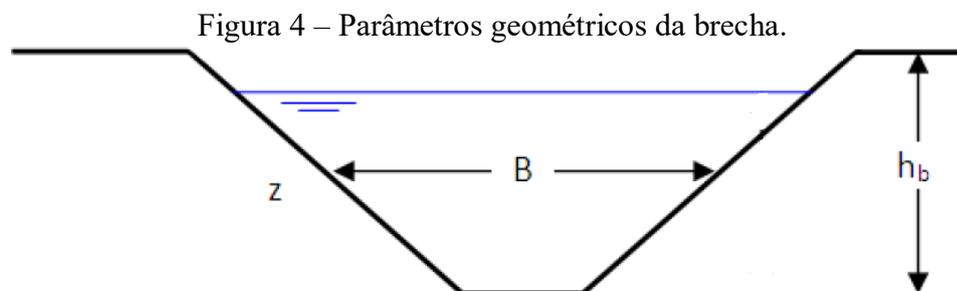
2.4.1 Formação da Brecha

Mota (2017) define a brecha de rompimento de uma barragem como a área na estrutura da barragem pela qual passa a água armazenada no reservatório durante o fenômeno de rompimento.

Os parâmetros como local, dimensões e tempo de desenvolvimento da brecha são fundamentais para avaliar o risco potencial de rompimento de uma barragem. As informações de formação da brecha podem afetar diretamente a estimativa do pico de vazão que extravasa da barragem, bem como o tempo de chegada da onda de cheia a sua jusante. Entretanto, estes parâmetros geralmente apresentam incertezas de análise em falhas de barragens (USACE, 2014).

Desta forma, é de grande importância o conhecimento de todo o processo de rompimento de uma barragem, desde o início da formação da brecha, até a formação da onda de cheia que atingirá as áreas a jusante da mesma. O nível de água a jusante é uma das principais informações obtidas pela simulação do rompimento, pois através da mesma é possível definir a área atingida pela onda formada. Este conhecimento proporcionará a elaboração do plano de ações emergenciais, reduzindo os danos que possam ocorrer (MOTA, 2017).

Conforme Ferreira e Andrzejewski (2015) as geometrias da brecha são definidas conforme alguns parâmetros geométricos, além do tempo necessário para seu início e desenvolvimento. Na Figura 4 a seguir são ilustrados estes parâmetros geométricos, comentados logo abaixo.



Fonte: Adaptado de Ferreira e Andrzejewski (2015)

- a) Profundidade da brecha (h_b) - É a distância vertical correspondente entre a base inferior da brecha até a crista da barragem.
- b) Largura média da brecha (B) - É a largura da base média da brecha após a sua completa formação.
- c) Declividade dos taludes laterais (Z) - Caracterizam e descrevem a forma de abertura da brecha.

Para Ferreira e Andrzejewski (2015) os parâmetros temporais de interesse são o tempo de início e o tempo de formação da brecha, que é o intervalo de tempo entre o início da formação da brecha e a sua formação completa. Na fase de início da brecha, ainda não houve o rompimento da barragem e o seu vazamento ainda é pequeno, nesta fase pode ser possível evitar o rompimento da barragem. Já para a fase de desenvolvimento da brecha é improvável que o rompimento possa ser evitado.

Conforme apontado por Chauhan et al. (2004), o tamanho e o tempo de formação da brecha dependem do tipo de estrutura e geometria da barragem, à topografia da fundação onde está situada, além das propriedades dos materiais da construção e o volume do reservatório no

momento da falha. Sendo assim, os parâmetros de formação da brecha é um processo que exige a combinação de informações de equações empíricas com experiência histórica.

Ao longo do tempo, muitos dados referentes às características finais das brechas foram coletados a partir de vários incidentes e acidentes envolvendo o rompimento de barragens. Com isso, muitos estudos foram realizados a partir da comparação destes dados, permitindo pré-determinar possíveis faixas de variação de parâmetros, conforme o tipo de barramento (TSCHIEDEL, 2017).

Estudos realizados pela Eletrobras (2003) demonstram características médias da formação da brecha conforme Tabela 1, em função do tipo de barragem, que podem ser adotadas em estudos de rompimento de barragens.

Tabela 1 – Características de parâmetros de formação de brecha

Tipo de Barragem	Largura média	Declividade lateral	Tempo de formação total (horas)
Arco	Comprimento da crista	Entre zero e a declividade do vale	Menor do que 0,1h
Contraforte	Múltiplos trechos	Normalmente zero	Entre 0,1h e 0,3h
Gravidade	Um ou mais trechos (Usualmente menor do que a metade do comprimento da crista)	Normalmente zero	Entre 0,1h e 0,3h
Terra e Enrocamento	Entre 1 e 5 vezes a altura da barragem (normalmente entre 2 e 4 vezes)	Entre 0,25 e 1	Entre 0,1h e 1,0h (compactada) e entre 0,1h e 0,5h (não compactada)

Fonte: adaptado de Eletrobras (2003).

Gomes et al. (2015) avaliaram três cenários de altura da brecha, concluindo que quanto maior a altura da brecha maior o volume liberado pelo reservatório, ocasionando uma onda de cheia maior em vazão de pico e em volume propagado. Quando realizou a variação da largura da brecha, obteve resultados bem semelhantes, que não impactaram significativamente nas variáveis analisadas. Já para os cenários avaliados pela declividade lateral da brecha, verificou-se que quanto maior a declividade lateral, maior a vazão de pico, principalmente na seção imediatamente a jusante da barragem.

Mota (2017) em seus estudos comparou quatro cenários para analisar a influência da altura da brecha e percebeu que conforme se aumenta a altura da brecha à vazão de pico diminui, porém, ao decorrer do tempo o cenário com altura de brecha maior tem maior vazão. Também analisou quatro cenários variando a largura da brecha, concluindo que a vazão de pico aumenta

com o aumento da largura da brecha. Já para a declividade lateral da brecha, os quatro cenários avaliados tiveram resultados bem semelhantes, tendo uma pequena diminuição da vazão de pico quando se aumenta a declividade lateral da brecha.

2.4.2 Vazão de Pico

Para simular o rompimento hipotético de uma barragem, é necessário primeiramente determinar a vazão de pico e o hidrograma da vazão defluente no momento do rompimento. As principais características a serem determinadas referem-se à forma e o tempo de formação da brecha (BRASIL, 2005).

Conforme Veról (2010), os hidrogramas resultantes, ocasionados pelo rompimento das obras são muito maiores comparados às cheias excepcionais em diferentes tempos de recorrência.

Brasil (2005) reuniu conforme Tabela 2, equações matemáticas deduzidas de modo empírico, com base em alguns autores consagrados, que relacionam a vazão máxima de descarga a características da barragem e da brecha do rompimento.

Tabela 2 – Equações empíricas para determinação da vazão de pico

Autores	Vazão de Pico	Características
Lou (1981)	$Q_p = 7,683H_d^{1,909}$	Baseada na análise de 19 diferentes casos de rompimento de natureza diversa.
Hagen (1982)	$Q_p = 1,205(H_d V)^{0,48}$	Baseada em observações de valores relativos a casos já ocorridos de rompimento.
Saint-Venant (-)	$Q_p = \frac{8}{27} B_d \sqrt{g} Y_{médio}^{\frac{3}{2}}$	Desenvolvida por Saint-Venant para o caso de remoção instantânea e total do barramento.
Schoklistch (1917)	$Q_p = \frac{8}{27} \left(\frac{B_d}{B_b}\right)^{\frac{1}{2}} B_b \sqrt{g} Y_{médio}^{\frac{3}{2}}$	Considera a situação em que o rompimento ocorre em parte da crista de uma barragem.
Bureau of Reclamation (1982)	$Q_p = 19H_d^{1,85}$	Baseada em dados coletados de vazões de pico históricas e da profundidade da lâmina d'água no reservatório no momento do rompimento.

Vertedor de Soleira
Espessa (Singh,
1996)

$$Q_p = 1,7B_b H_b^{\frac{3}{2}}$$

De acordo com Singh, o escoamento que passa pela brecha pode ser assumido como análogo ao escoamento que passa por um vertedor retangular de soleira espessa.

Wetmore e Fread
(1981)

$$Q_p = 1,7B_b \left\{ \frac{1,94 \frac{A_s}{B_b}}{T_p + \left[\frac{1,94A_s}{(B_b\sqrt{H_d})} \right]} \right\}$$

Considera a formação de uma brecha retangular, desenvolvendo-se em um intervalo de tempo (t).

Q_p = descarga máxima defluente da barragem em rompimento ($m^3.s^{-1}$)

Vr = volume do reservatório para o NA máximo (m^3)

As = área do reservatório para o NA máximo (m^2)

Bd = largura da barragem (m)

Hd = altura da barragem (m)

Bb = largura final da brecha (m)

Hb = altura final da brecha (m)

Y_{medio} = profundidade média no reservatório no instante do rompimento (m)

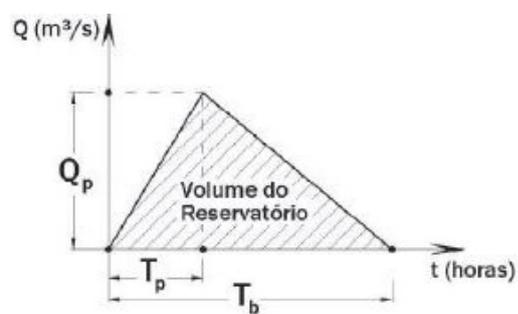
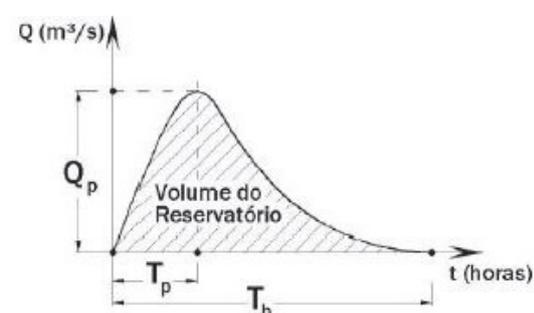
tp = tempo para o desenvolvimento da brecha (s)

Fonte: adaptado de Brasil (2005).

Vale salientar que os valores obtidos pelas equações apresentadas não são valores exatos, apenas uma estimativa do que pode acontecer. Deve-se analisar a natureza do problema em estudo e o critério de segurança, para definir qual equação adotar em cada caso (VERÓL, 2010).

Já Lauriano (2009) apresentou tipos simplificados de hidrogramas de dois principais autores, como pode ser visto na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Hidrogramas de rompimento

Autores	Hidrograma
<p data-bbox="225 683 750 750">Hidrograma triangular simplificado (MASCARENHAS, 1990)</p>	<p data-bbox="798 369 1236 448">Figura 5 – Hidrograma triangular simplificado.</p>  $Q_p = \frac{2V}{T_b}$ $Q(t) = Q_p \left(\frac{t}{T_p} \right), \text{ para } 0 \leq t \leq T_p$ $Q(t) = Q_p - Q_p \left(\frac{t - T_p}{T_b - T_p} \right), \text{ para } t \geq T_p$
<p data-bbox="225 1355 710 1433">Hidrograma com decaimento parabólico (BARFIELD et al., 1981)</p>	<p data-bbox="798 1131 1324 1209">Figura 6 – Hidrograma com decaimento parabólico.</p>  $Q(t) = Q_p \left[\left(\frac{t}{T_p} \right) e^{\left(1 - \frac{t}{T_p} \right)} \right]^k$ <p data-bbox="225 1691 1228 1899"> Q_p = descarga máxima defluente da barragem em rompimento ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) Vrb = volume do reservatório da barragem no momento do rompimento (m^3) T_p = tempo de pico (s) T_b = tempo de base (s) K = fator de ponderação, varia entre 1,5 e 5,0. </p>

Fonte: adaptado de Lauriano (2009).

Nota-se que ao relacionar as vazões máximas do rompimento com parâmetros de altura da barragem e de volume do reservatório, há um grau de variabilidade nos dados referentes aos

estudos de caso utilizados. Percebe-se também que as vazões variam em pelo menos uma ordem de grandeza na maioria dos dados disponíveis (Lauriano, 2009).

2.5 MODELAGEM HIDRODINÂMICA COM HEC-RAS APLICADA PARA ROMPIMENTO DE BARRAGEM

O HEC-RAS é um software de domínio público desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (HEC) do United States Army Corps of Engineers (USACE), a primeira versão do HEC-RAS (versão 1.0) foi lançada em julho de 1995. O software permite executar fluxo constante unidimensional, cálculos de fluxo instáveis unidimensionais e bidimensionais, o HEC-RAS é um sistema integrado, projetado para uso interativo em um ambiente de rede multitarefa e multiusuário. O sistema é composto por uma interface gráfica do usuário, componentes de análise hidráulica separados, armazenamento de dados e recursos de gerenciamento, recursos gráficos e de relatórios (USACE, 2016).

Segundo Lauriano (2009), o usuário pode definir uma modelagem com escoamento permanente ou não permanente, simulada a partir do algoritmo UNET (Unsteady NETWORK model) do software, os resultados do algoritmo UNET são então importados de volta para o HEC-RAS para visualização das simulações. Já os resultados do modelo hidráulico são apresentados em Modelo Digital do Terreno (MDT), pois através do software HEC-GeoRAS, o HEC-RAS trabalha com o software de geoprocessamento ArcView, permitindo assim, a criação dos mapas de inundação.

Conforme Brunner (2015), o HEC-RAS é o pacote de software hidráulico fluvial amplamente utilizado no mundo. Há pouco tempo, o software foi limitado a cálculos hidráulicos unidimensionais de rios. Porém, nos últimos anos, a equipe técnica de desenvolvimento vem realizando análises de segurança de barragens que incluem modelagem hidráulica detalhada e análises de risco e incerteza. Houve uma grande demanda e necessidade para que a ferramenta pudesse executar hidrodinâmica combinada 1D e 2D, de maneira rápida e robusta. Por causa das necessidades de análise de segurança de barragens e diques, o HEC-RAS desenvolveu e integrou a hidrodinâmica bidimensional no mecanismo computacional de fluxo instável do RAS. E agora tem a capacidade de executar modelagem hidrodinâmica 1D, 2D e 1D/2D integrado.

Segundo USACE (2016), para análises, a solução da simulação se dá a partir da resolução das Equações de Saint-Venant. As equações de Saint-Venant 1D são formadas pela

equação da conservação da massa (Equação 1) e pela equação da conservação da quantidade de movimento (Equação 2), a seguir apresentadas:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gAS_0 - gAS_f \quad (2)$$

Onde, Q é a vazão; t é o tempo; A é área da seção; x é a distância do trecho do rio; h é a profundidade do escoamento; S_0 é a declividade do fundo do rio; S_f é a declividade da linha de energia; g é a aceleração da gravidade.

A equação da conservação da quantidade de movimento, também conhecida como equação dinâmica, conforme destacam Fan et al. (2014), pode ser decomposta em 5 termos, observados em sequência, temos: (a) inércia local, (b) inércia advectiva, (c) força de pressão, (d) força de gravidade e, (e) força de atrito.

Para Tschiedel (2017), uma vez considerado todos os termos presentes na Equação de Saint-Venant, temos o escoamento unidimensional na sua forma mais completa, ou seja, temos o HEC-RAS como modelo hidrodinâmico.

Já Ferla (2018) destaca algumas simplificações para as Equações de Saint-Venant, onde o fluido é incompressível e homogêneo, a pressão é hidrostática e que são desprezadas as variações de velocidade nas direções transversal e vertical.

Para a modelagem 2D no HEC-RAS utilizando as equações de Saint-Venant 2D consiste basicamente em duas equações para simular a propagação do fluido, as equações de conservação da massa (Equação 3) e a equação da conservação de momento nos eixos x e y (Equação 4 e Equação 5). Ainda há a equação da Onda Difusa que é basicamente uma simplificação da equação de Saint-Venant. Ambas são resolvidas através de um esquema numérico de volumes finitos, de primeira ordem e implícitos (USACE, 2016).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} + q = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad (5)$$

Onde H é a elevação da superfície da água; h é a profundidade da água; u e v são as velocidades nas direções cartesianas; t é o tempo; q são as contribuições ou abstrações de fluxo; ν_t é o coeficiente de viscosidade turbulenta; c_f é o coeficiente de atrito; f é o parâmetro de Coriolis; e g é a aceleração gravitacional.

O coeficiente de atrito é calculado usando a fórmula de Manning, conforme apresentada pela Equação 6 (USACE, 2016):

$$c_f = \frac{n^2 g |V|}{R^{4/3}} \quad (6)$$

Já a propagação do fluido através da equação de Onda Difusa, trata-se de uma simplificação da equação de Saint-Venant. Considerando apenas dois termos: os termos de gravidade e atrito que possuem maior relevância no modelo. Desta forma, a equação de Onda Difusa (Equação 7) é expressa a seguir (USACE, 2016):

$$q \, g \nabla H = -c_f V \quad (7)$$

Na modelagem bidimensional, o HEC-RAS contabiliza a diferença entre volumes iniciais e finais na região modelada para o controle de possíveis erros das simulações. Desta forma, o HEC-RAS considerando as entradas e saídas do modelo, fornece a quantidade de volume total criada durante as simulações, assim como o erro percentual total obtido (TSCHIEDEL, 2017).

Para Veról (2010) algumas características do HEC-RAS o torna uma ferramenta muito útil para a simulação de fenômenos de rompimento de barragens, amplamente utilizada em nível mundial. Entre as características, a disponibilidade de adquirir a licença de uso do software gratuitamente, diretamente do site oficial do USACE. Além disso, o USACE disponibiliza a extensão HEC-GeoRAS, que possibilita importar as informações geométricas

de softwares de SIG para o HEC-RAS para a simulação da propagação da onda de cheia, bem como para a elaboração de mapas de inundação.

De acordo com Lauriano (2009) alguns parâmetros devem ser inseridos como dados de entrada para a simulação no HEC-RAS, os principais são: (a) condição de contorno de montante (hidrograma ou cotograma); (b) condição de contorno de jusante (depende das características da respectiva seção); (c) seções transversais ao longo do eixo do rio (seções topobatimétricas); (d) estruturas hidráulicas e suas características (barragens, pontes, diques); (e) coeficientes de rugosidade da superfície (coeficiente de Manning).

Existem diversos estudos que utilizaram o HEC-RAS para simular o rompimento de barragens, Mota (2017), por exemplo, utilizou o modelo HEC-RAS para avaliar alguns cenários de formação de brecha de rompimento de barragem. Concluiu que conforme aumenta a altura da brecha, a vazão de pico imediatamente a jusante da barragem diminui. Porém, quando a largura da brecha aumenta a vazão de pico imediatamente a jusante da barragem aumenta. Quanto a declividade da brecha, conforme aumenta a declividade lateral, a vazão de pico imediatamente a jusante da barragem diminui.

Tschiedel, Monte e Paiva (2017) realizaram uma comparação dos modelos 1D e 2D do HEC-RAS e perceberam que no modelo unidimensional tende a apresentar maiores vazões de pico e chegada mais rápida da onda de cheia, com antecipação do tempo de pico. Concluíram também quem em locais mais bem encaixados na área de estudo, o modelo 2D apresenta profundidades maiores, já para as áreas com vale aberto, o modelo 1D apresenta profundidades maiores.

Kuhlkamp (2016) aplicou o modelo HEC-RAS para avaliar 3 cenários de rompimento de barragem, vazão média de logo termo e tempo de retorno de 10 e 100 anos. Como esperado, a maior área inundada ocorreu com os hidrogramas de pico para o cenário com tempo de retorno de 100 anos. Porém, o tamanho relativo da onda foi maior, para os cenários com vazões menores.

Pereira et al. (2017), realizaram uma comparação dos resultados obtidos com o modelo HEC-RAS com um modelo simplificado para o rompimento de três barragens. Observaram que as áreas de inundação simuladas pelo modelo simplificado é de 25 a 33% maiores em relação ao HEC-RAS.

Já Tschiedel e Paiva (2018) avaliaram diferentes simulações de onda de cheia de rompimento de barragem, alterando os dados de entrada do modelo (parâmetros da brecha, topografia do vale a jusante, coeficiente de Manning, volume do reservatório e tipo de

equacionamento considerado). Concluíram que as incertezas existentes quanto aos dados de entrada do modelo impactam de forma variada na onda de cheia gerada (tempo e vazão de pico e velocidade e profundidade máxima).

2.6 MAPEAMENTO DE PERIGO, VULNERABILIDADE E RISCO

O risco representa a possibilidade de perda esperada para uma região habitada em um determinado tempo, devido à presença de um perigo. Frequentemente, o risco é definido como função do perigo e da vulnerabilidade (WISNER et al., 2004; UNISDR, 2016; MONTE et al., 2021). Desta forma, através do perigo estimado e do índice de vulnerabilidade, Goerl et al. (2012) propuseram um método para mapeamento do índice de risco de inundação. Já Monte et al. (2017) analisaram o índice de risco para um possível rompimento de uma barragem, obtido pelo índice de vulnerabilidade e índice de perigo, este último obtido através do modelo hidrodinâmico HEC-RAS 2D.

O perigo pode ser definido como a possível ação de um evento que pode ocorrer em épocas e região conhecidas que pode causar sérios danos socioeconômicos às comunidades expostas (UNDP, 2004; UNISDR, 2016; MONTE et al., 2021). O mapeamento de perigo é uma ferramenta importante, que auxilia no gerenciamento de desastres, identificando os locais inadequados para determinados usos e ocupações do solo (WMO, 2016). Para a elaboração do mapa de perigo são necessários dados hidrológicos e topográficos. Monteiro e Kobiyama (2014) propuseram uma metodologia para o mapeamento de perigo de inundação, com base nesses dados.

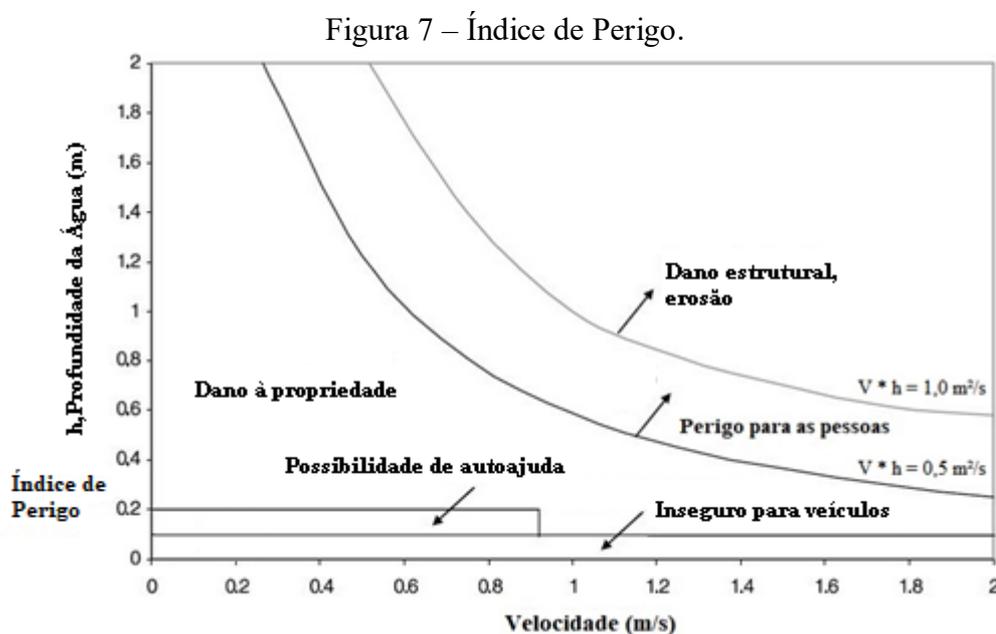
Conforme Goerl e Kobiyama (2005), em escala local, poucas comunidades possuem sistemas de alerta para inundações, e também não recebem instruções de como agir diante da ocorrência de um evento. Por isso, é necessário elaborar um zoneamento preventivo em relação a áreas passíveis de inundação, bem como restringir o acesso a estas áreas, quando ocorre uma inundação.

Conforme o Decreto Nº 7.257 de Agosto de 2010, considera as ações de prevenção de desastres naturais por meio da identificação, mapeamento e monitoramento de riscos, ameaças e vulnerabilidade locais. Sendo assim, é necessário a criação de mapas de perigo em âmbito nacional (BRASIL, 2010).

Os três principais parâmetros, destaca ANA (2011), necessários ao mapeamento das zonas de risco são: os tempos de chegada da onda de cheia, as profundidades e as velocidades

do fluxo. Já Preneve (2001) propôs que o mapa de perigo é uma função de frequência de inundação (período de retorno) e intensidade (índice de perigo).

Para Stephenson (2002) a construção de edificações em áreas de inundações coloca em perigo vidas e propriedades. Com relação às inundações, as características físicas principais são: a profundidade (h) e a velocidade (v) da água e o tempo de duração (t). Sendo a velocidade e a altura, os fatores responsáveis pela maior parte dos danos. Essa relação pode ser melhor entendida na Figura 7, onde quanto maior a velocidade e a profundidade da lâmina de água, maior perigo e danos serão causadas pela inundação.



Fonte: Adaptado de Stephenson (2002)

Neto et al. (2016) utilizaram o HEC-RAS e propuseram uma metodologia para mapeamento de perigo, combinando a velocidade e profundidade da lâmina de água com indicadores, como: energia específica, força do escoamento e intensidade. Os autores classificaram esses indicadores conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – Limiares de indicadores para construir um mapa de perigo

Indicador	Baixo	Médio	Alto
Profundidade da água (m)	0 - 0,60	0,60 - 1,20	> 1,20
Velocidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0 - 0,60	0,60 - 1,20	> 1,20
Energia específica (m)	0 - 1,00	1,00 - 2,00	> 2,00
Força do escoamento ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-2}$)	0 - 1,00	1,00 - 2,00	> 2,00
Intensidade ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	0 - 0,36	0,36 - 1,50	> 1,50

Fonte: Adaptado de Neto et al. (2016)

Já Monte et al. (2017), utilizaram os indicadores propostos por Neto et al. (2016) em uma única equação e, também usando o HEC-RAS compararam os resultados obtidos com a metodologia proposta por Neto et al. (2016) e Stephenson (2002). O índice de perigo obtido pelos autores teve maior concentração na categoria de perigo baixo, ficando assim, mais próximo da metodologia proposta por Stephenson (2002).

Já a vulnerabilidade pode ser definida como a capacidade que uma pessoa, família ou comunidade possui de enfrentar, lidar e resistir a um impacto de um evento de perigo na qual foi exposto (WISNER et al., 2004). A vulnerabilidade para um determinado perigo, aumenta a probabilidade de ocorrência de danos a construções e perda de vidas humanas (KOHLENER et al., 2004).

Segundo Kohler et al. (2004), a vulnerabilidade pode ser dividida em quatro fatores: físico, ambiental, econômico e social. Sendo cada fator dividido em subcategorias, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Fatores referentes a vulnerabilidade

Fatores	Categorias
Físicos	Urbanização; Densidade demográfica; Características das construções; Tipo de construção
Ambientais	Uso do solo; Recursos hídricos; Vegetação e biodiversidade; Sustentabilidade
Econômicos	Condição socioeconômica; Pobreza e nutrição; Solidez da economia; Acesso a serviços básicos; Agroindústria; Insumos agrícolas; Taxa de desemprego
Sociais	Percepção do risco; Educação; Direitos humanos; Participação social e ONGs; Gênero, raça e idade; Renda; Acesso a informação

Fonte: Adaptado de Kohler et al. (2004)

Moreira e Kobiyama (2021) analisaram 21 estudos brasileiros sobre índices de vulnerabilidade e verificaram que a maioria dos estudos utilizaram os indicadores obtidos do censo 2010 realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), sendo que os indicadores mais utilizados foram: renda per capita, domicílios com banheiro sem esgotamento sanitário, densidade demográfica, domicílios com ou sem abastecimento de água na rede, e domicílios particulares precários. Marcelino et al. (2006), Goerl et al. (2012) e Reis et al. (2014) utilizaram indicadores com base nas características socioeconômicas dos setores censitários do

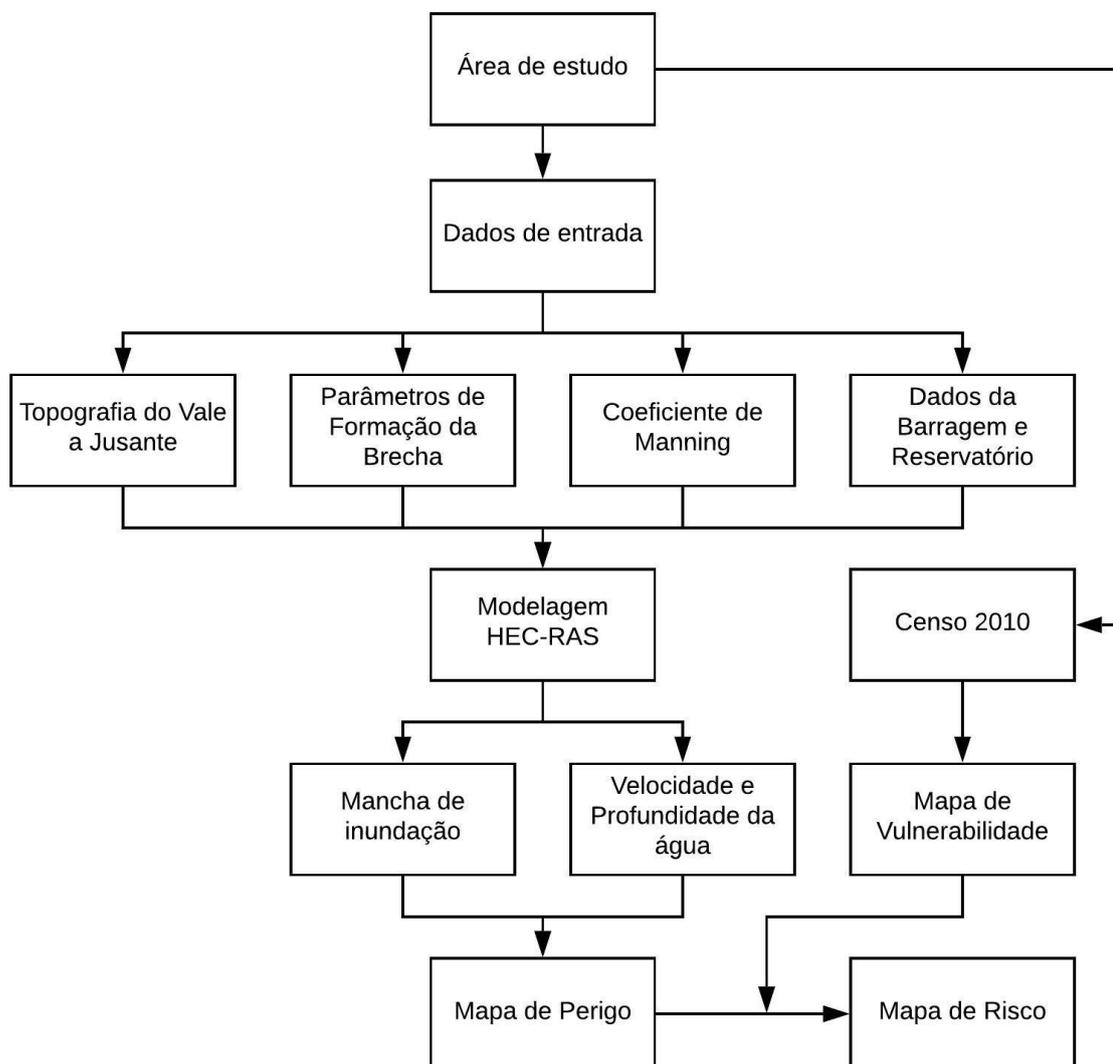
município realizado pelo IBGE. Já Andrade et al. (2017) e Debortoli et al. (2017) calcularam o índice de vulnerabilidade em escala municipal.

Neste contexto, o mapeamento de risco é uma importante ferramenta de análise de áreas sujeitas ao risco de inundação, pois através do mapa é possível estabelecer medidas preventivas, quanto às possíveis emergências que podem acontecer, bem como realizar um planejamento da ocupação das áreas sujeitas à inundação (BRITO, 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 8 apresenta o fluxograma com o resumo dos procedimentos metodológicos utilizados no presente trabalho. Para simular a onda de cheia devido ao rompimento hipotético da barragem do rio São Bento utilizou-se o modelo HEC-RAS 2D. Os principais dados de entrada do modelo foram: (a) topografia do vale a jusante; (b) parâmetros da brecha; (c) coeficiente de Manning; (d) curva cota-volume do reservatório.

Figura 8 – Fluxograma metodológico.



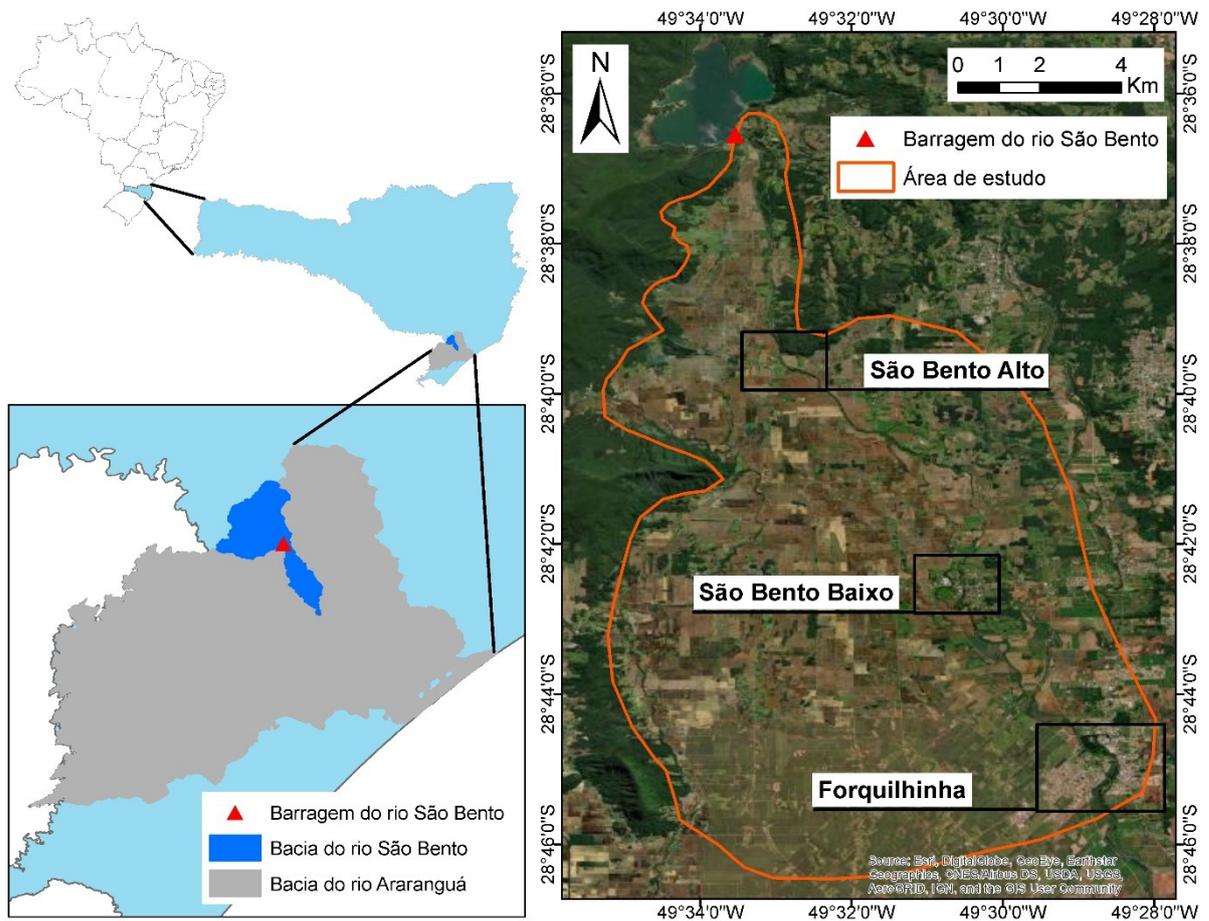
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020)

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é o trecho a jusante da barragem do rio São Bento que abrange 25 km de extensão, dentro da sub-bacia do rio São Bento (157,40 km²), que faz parte da bacia do rio Araranguá (3.089 km²), localizada no sul de Santa Catarina (Figura 9), onde está situada a barragem do rio São Bento, no município de Siderópolis. Essa barragem recebe a contribuição de dois rios: São Bento e Serrinha.

A bacia hidrográfica do rio Araranguá abrange total ou parcialmente os municípios de Criciúma, Siderópolis, Treviso, Cocal do Sul, Içara, Nova Veneza, Forquilha, Maracajá, Araranguá, Arroio do Silva, Meleiro, Turvo, Ermo, Jacinto Machado, Morro Grande e Timbé do Sul. Essa bacia pertence ao sistema da vertente atlântica, que drena parte das águas da escarpa da Serra Geral e da planície costeira, convergindo para o Oceano Atlântico (DANTAS et al., 2005).

Figura 9 – Localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

A jusante da barragem do rio São Bento estão localizadas as comunidades de São Bento Alto (149 habitantes) e São Bento Baixo (786 habitantes), no município de Nova Veneza (13.309 habitantes), que estão a 6,5 km e 15,5 km de distância da barragem, respectivamente (IBGE, 2010). Essas comunidades, devido à distância da barragem estão sujeitas aos danos causados por um possível rompimento da barragem. De acordo com ANA (2021), a barragem do rio São Bento é classificada como risco médio, porém com dano potencial associado alto, devido à existência de população a jusante e o grande volume do reservatório (58,20 hm³).

A região da bacia, segundo a classificação de Köppen apresenta dois subtipos climáticos: Cfa (subtropical mesotérmico úmido, com verão quente) e Cfb (subtropical mesotérmico úmido, com verão fresco) (ALVARES et al., 2014).

A precipitação média total anual é de 1694 mm, com uma média total anual de 115 dias de chuva, tendo uma umidade relativa média anual de 82% (BACK, 2020; BACK e POLETO, 2018). Nessa região, o verão é a estação mais chuvosa, representando 36% dos totais anuais de chuva. Já o inverno é a estação que menos chove, contabilizando apenas 17%, ficando a primavera e o outono com o restante, 23,5% cada. Devido ao relevo montanhoso e as características dos ventos, além das chuvas frontais e convectivas, também ocorrem chuvas orográficas (MING, 2007). A intensidade da chuva máxima com duração de 15 minutos (I15) para período de retorno de 10 anos para o município de Siderópolis (SC) é de 107,2 mm.h⁻¹ (BACK et al., 2021).

A cobertura vegetal nativa da bacia do rio São Bento pertence à formação Floresta Ombrófila Densa (Domínio Mata Atlântica) (COSTA, 2008). Entretanto, com as atividades agrícolas e intenso processo de extração da madeira que ocorreu nessa região, ela está bastante alterada, apresentando a menor cobertura florestal de Mata Atlântica de Santa Catarina (CASAN, 2003). De acordo com Costa (2008), a mata nativa primária foi praticamente substituída pela vegetação secundária, as áreas de desmatamento, principalmente a jusante da barragem de São Bento foram substituídas por lavouras de arroz, feijão, fumo, mandioca e milho. Nessa região ainda há manchas isoladas de mata nativa e vegetações de porte médio. Já a montante da barragem a vegetação apresenta-se sob a forma predominante de matas e floresta, com algumas áreas com vegetação de porte baixo e culturas temporárias. Resquícios da Floresta Ombrófila Densa estão localizados quase exclusivamente nas escarpas da Serra Geral, onde a vegetação florestal está bem preservada, devido às condições de pouca acessibilidade e inaptidão dos solos para cultivos agrícolas.

O relevo da região a montante da barragem do rio São Bento é formado pelos contrafortes da Serra Geral, com ombreiras íngremes em formato de “V”, apresentando grandes

escarpas basálticas cortadas por vales profundos. A drenagem nessa região é considerada jovem, com corredeiras e trechos de alta declividade, tendo um desnível de 1280 metros entre a parte mais elevada e a estrutura da barragem (CASAN, 2004). A jusante da barragem o relevo é de planície aluvial, apresenta características de formação em ambiente lacustre, composta por várias camadas de seixos rolados. Tanto a montante, quanto a jusante da barragem, são encontradas camadas de até 3 metros de profundidade em determinados locais. A principal composição dos seixos é de rocha basáltica e arenitos silicificados (CASAN, 2004), oriundos das rochas da Serra Geral. A escarpa da Serra Geral, na região da bacia do rio São Bento, durante eventos de chuvas intensas, apresenta uma condição geocológica muito propensa a deslizamentos rasos translacionais, devido às altas declividades e ao clima muito úmido. Esse tipo de terreno, mesmo coberto por vegetação de porte florestal, apresenta solos que tendem a ser muito rasos e facilmente erodidos (KREBS, 2004).

A estrutura da barragem do rio São Bento é composta por três obras distintas: a barragem principal e os diques principal e secundário. A barragem principal (

Figura 10) possui um comprimento total de 476 m, sendo a parte central com 240 m construída de concreto compactado a rolo do tipo gravidade, já as ombreiras foram construídas com espaldares em cascalho compactado com núcleo impermeável de argila, sendo 128 m à margem esquerda e 108 m à margem direita. A elevação máxima até a fundação é de 49 m e sobre o leito do rio de 38 m (CASAN, 2004).

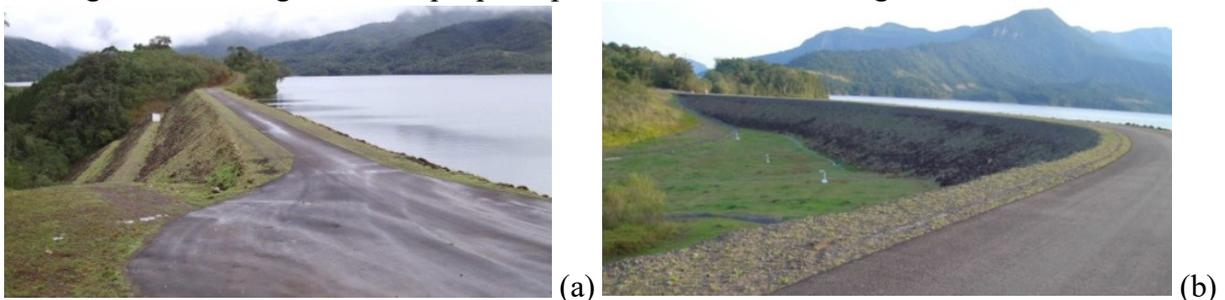
Os diques principal e secundário (Figura 11 a, b) são formados por uma barragem zoneada, com espaldares em cascalho com núcleo impermeável de argila compactada. O dique principal está localizado na margem esquerda do rio Serrinha, foi construído sobre um ponto de fuga e possui 258 m de comprimento de crista, com 4,0 m de largura, com altura máxima sobre a fundação de 25 m. Já o dique secundário possui extensão de 250 m, 4,0 m de largura e altura sobre a fundação de 20 m (CASAN, 2004).

Figura 10 – Fotografia da barragem principal do rio São Bento.



Fonte: Picoli (2018)

Figura 11 – Fotografia do dique principal e secundário da barragem do rio São Bento.



Fonte: CASAN (2006)

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Dados hidrológicos da barragem

Para simular a onda de cheia devido ao rompimento hipotético no modelo HEC-RAS 2D são necessários dados relativos ao reservatório, como: (a) curva cota-volume, (b) área de armazenamento e (c) vazão. A Tabela 6 mostra os dados da barragem de São Bento, em Siderópolis (SC), utilizados no HEC-RAS 2D.

Tabela 6 – Dados hidrológicos da barragem do rio São Bento

Dados	Valor adotado
Nível máximo normal	157,50 m
Volume total	58,20 hm ³
Área inundada	4,50 km ²
Vazão inicial	29,80 m ³ /s

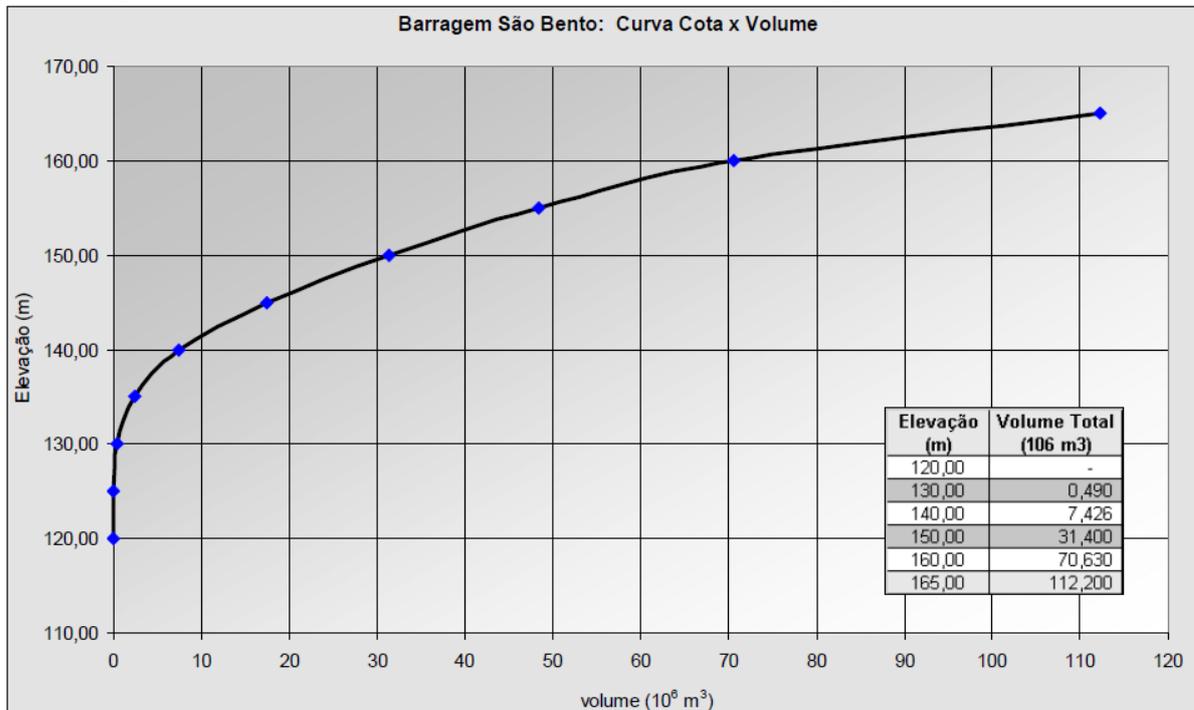
Fonte: CASAN (2003)

O nível máximo normal do reservatório, delimitado pela cota da soleira do vertedouro, é de 157,50 m, com um volume acumulado de 58,2 hm³ (Figura 12) e uma área inundada de 4,5 km², este foi o nível utilizado como referência para a simulação da onda de cheia no HEC-RAS.

Os valores de vazão da barragem aumentam conforme aumenta o nível de água do reservatório, e a água é extravasada pelo vertedouro, descarregadores de fundo e a válvula dispersora.

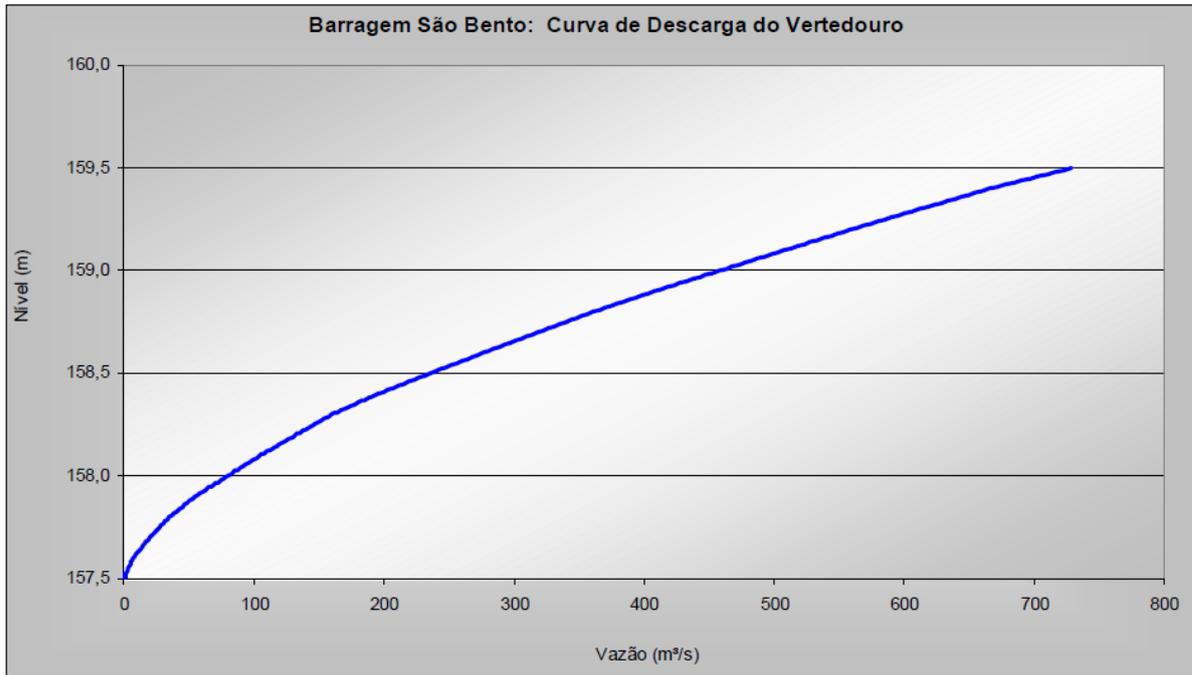
Segundo CASAN (2003), o vertedouro da barragem apresenta 105 m de comprimento e está localizado no centro da estrutura da barragem, tendo a cota da soleira na elevação de 157,50 m, caracterizado como do tipo soleira livre, frontal com calha de descarga em degraus. A capacidade de descarga máxima de 729 m³.s⁻¹ corresponde ao nível máximo maximum do reservatório (Figura 13). A barragem do rio São Bento possui 3 descarregadores de fundo, com diâmetros de 1000 mm, 800 mm e 400 mm. Esses descarregadores têm a finalidade de atender a vazão ecológica e às demandas para as áreas cultivadas a jusante. A Figura 14 mostra a vazão dos descarregadores de fundo de acordo com o nível do reservatório. Já a válvula dispersora é um equipamento de descarga, sendo de grande importância no controle das vazões defluentes. A Figura 15 demonstra a vazão da válvula dispersora de acordo com o nível do reservatório.

Figura 12 – Curva cota x volume do reservatório da barragem do rio São Bento.



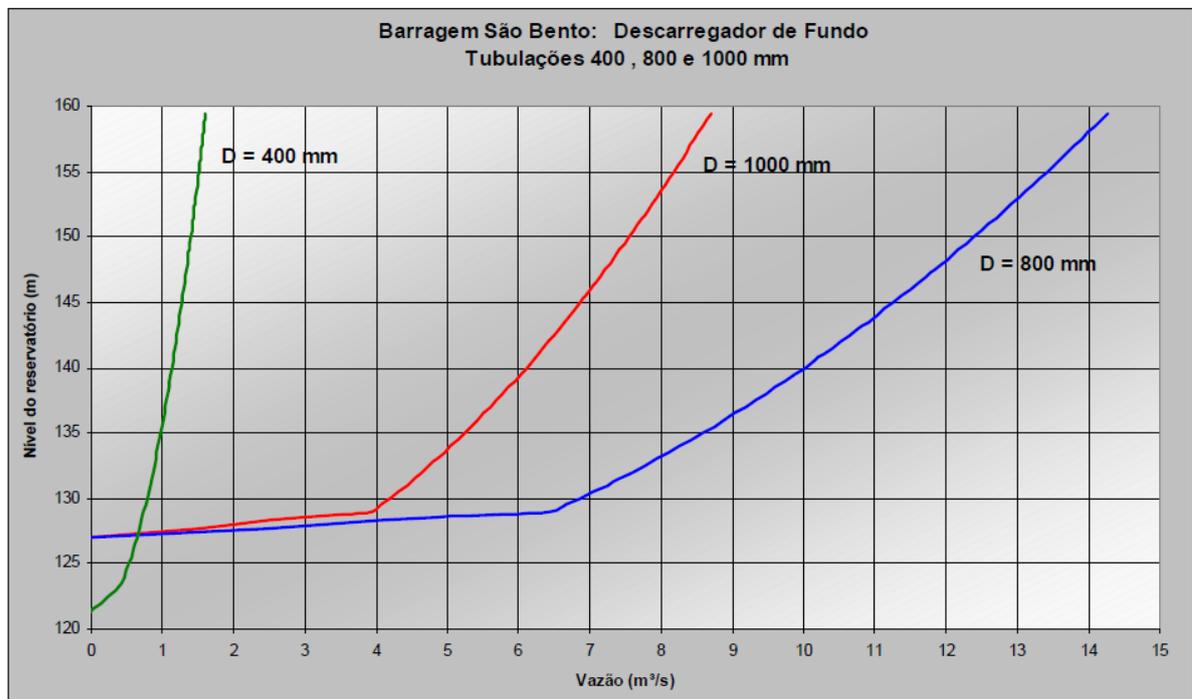
Fonte: CASAN (2003)

Figura 13 – Curva de descarga do vertedouro do reservatório da barragem do rio São Bento.



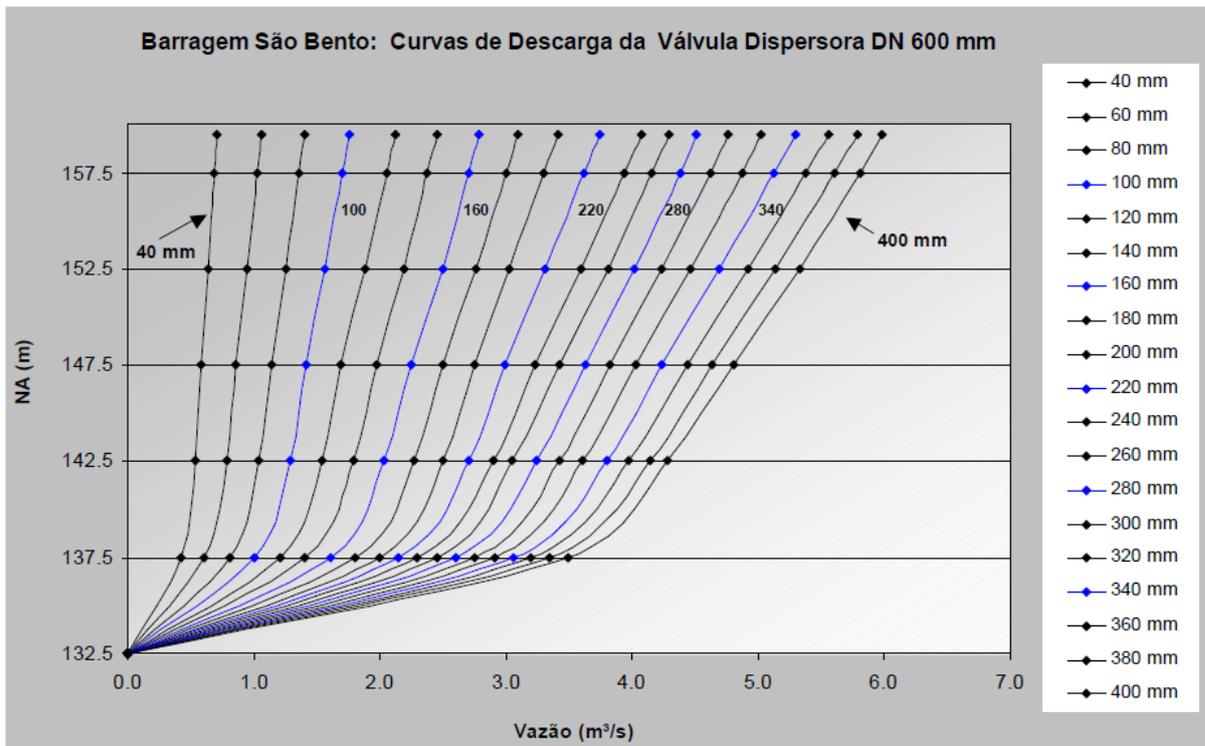
Fonte: CASAN (2003)

Figura 14 – Curva de vazões dos descarregadores de fundo do reservatório da barragem do rio São Bento.



Fonte: CASAN (2003)

Figura 15 – Curva de descarga da válvula dispersora do reservatório da barragem do rio São Bento.



Fonte: CASAN (2003)

Conforme observado nas Figuras 10, 11 e 12, o valor da vazão de cada um dos elementos de descarga de água aumenta conforme o nível do reservatório aumenta. A Tabela 7 mostra os valores de vazão de cada uma das estruturas da barragem quando o nível do reservatório está no nível máximo normal (157,5 m). Sendo o valor total da vazão utilizado como vazão inicial no modelo HEC-RAS 2D, no momento do rompimento hipotético.

Tabela 7 – Vazões características do reservatório de São Bento no nível máximo maximorum

Estrutura	Características	
	Diâmetro (mm)	Vazão ($m^3 \cdot s^{-1}$)
Descarregador	400	1,5
Descarregador	800	14,0
Descarregador	1000	8,5
Válvula dispersora	600	5,8
Total		29,8

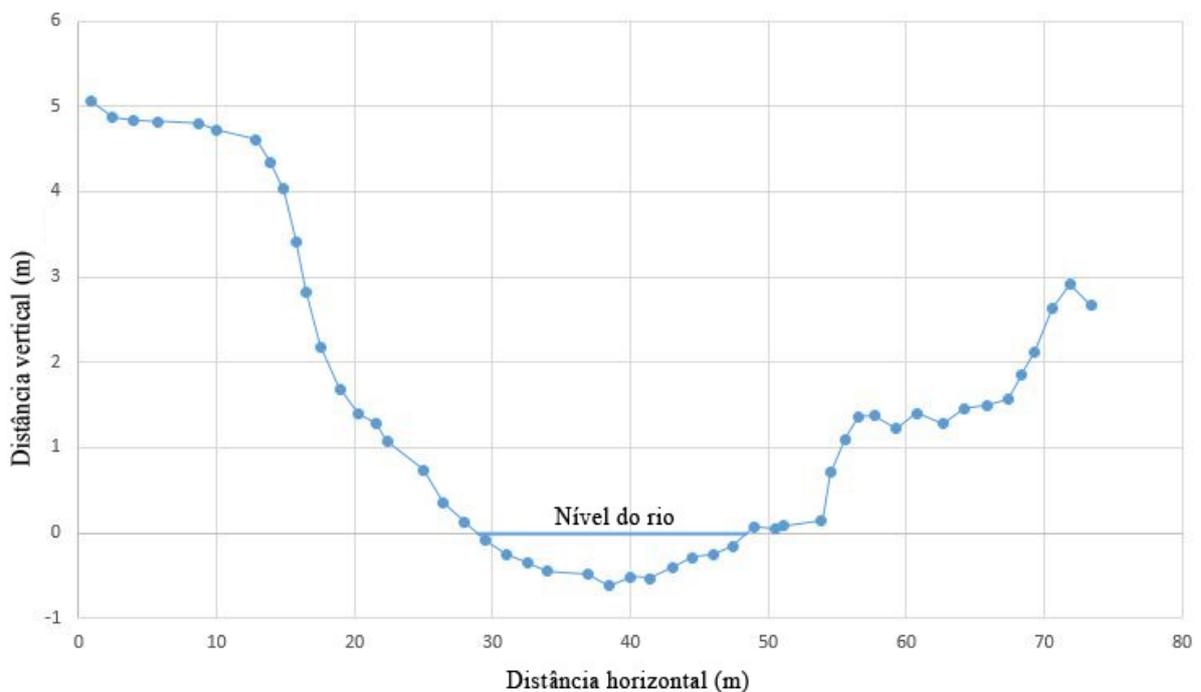
Fonte: CASAN (2003)

3.2.2 Dados topográficos

Para a propagação da onda de cheia a jusante da barragem e para gerar a mancha de inundação, devido ao rompimento hipotético da barragem no HEC-RAS 2D foi utilizado um Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução espacial de 1,0 m x 1,0 m da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Social de Santa Catarina (SDS), obtido pelo Sistema de Informações Geográficas (SIGSC) (SDS, 2013).

Foi realizada uma conferência do MDE, visando analisar se a calha do rio São Bento estava sendo bem representada no modelo. Foi analisado o levantamento topobatimétrico do rio São Bento realizado pela CASAN em 2003. Neste levantamento foram realizadas 18 seções transversais a jusante da barragem. Outro dado utilizado foi o perfil transversal do nível mínimo do rio São Bento (Figura 16) extraído da estação fluviométrica de código 84800000 (Serrinha - Jus 200 m - CASAN), a estação fica localizada a 200 m a jusante da barragem do Rio São Bento e sua operação é realizada pela EPAGRI-SC, os dados foram obtidos através do Sistema de Informações Hidrológicas (HIDROWEB) da ANA.

Figura 16 – Perfil transversal do nível mínimo do rio São Bento da estação Serrinha – Jus 200 m - CASAN.



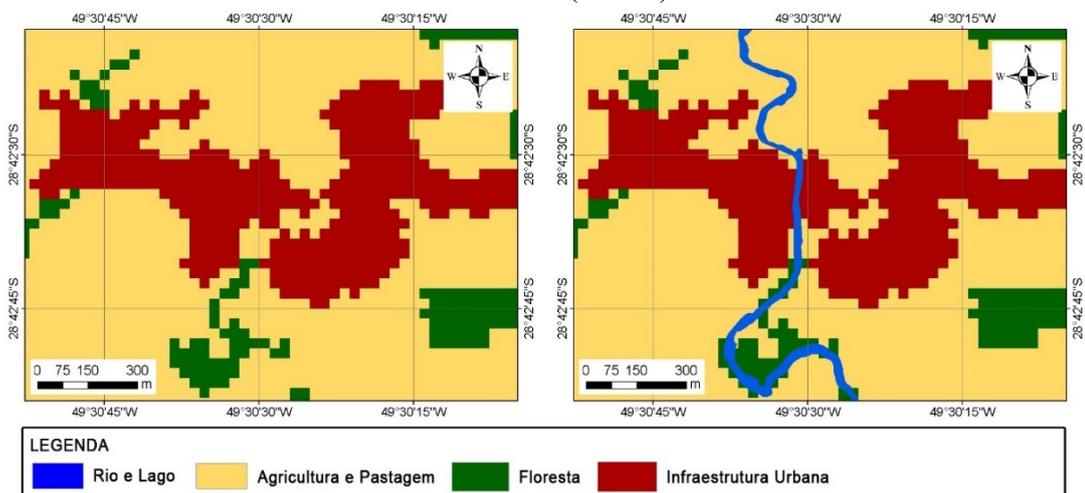
Fonte: ANA(2021)

Em ambos dados analisados, constatou-se que as informações do MDE estavam condizentes com o terreno real, tal como também foi avaliado através de visitas realizadas em campo.

3.2.3 Mapa de uso e ocupação do solo

O modelo hidrodinâmico HEC-RAS 2D estima a resistência do escoamento da água, com base no coeficiente de rugosidade de Manning. Assim, para estimar o coeficiente de Manning no canal principal e na planície de inundação a jusante da barragem do rio São Bento foi utilizado o mapa de uso e ocupação do solo, obtido da coleção 5 do projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MAPBIOMAS, 2020), correspondente ao ano de 2019. Esse mapa possui uma resolução espacial de 30 m x 30 m, a qual não permite uma boa representação dos rios com larguras menores que essa dimensão. Assim foi necessário modificar o mapa de uso e ocupação do solo original, integrando os rios da base cartográfica digital da SDS (2014) e, utilizando as fotografias aéreas de 2010, como base para ajustar as margens dos mesmos. Como resultado obteve-se um novo mapa de uso e ocupação do solo, com uma melhor representação das calhas dos rios. Para a conferência dos usos e ocupação do solo foram utilizadas as fotografias aéreas de 2014 da SDS, imagem do Google Earth de 2021 e dados coletados (coordenadas de localização) em campo com GPS de navegação (Garmin eTrex 30x). A Figura 14 mostra o detalhe da calha no rio nos mapas de uso do solo original (esquerda) e o modificado (direita) da área a jusante da barragem do rio São Bento.

Figura 17 – Detalhe da calha do rio São Bento nos mapas de uso do solo original (esquerda) e modificado (direita).



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

3.3 MÉTODOS

3.3.1 HEC-RAS 2D

Para a simulação do rompimento hipotético da barragem do rio São Bento e propagação da onda de cheia foi utilizado o modelo hidrodinâmico HEC-RAS 2D 5.0.7. Na propagação da onda de cheia foram utilizadas as equações de Saint-Venant 2D, apresentadas no item 2.5, que é composto pela equação de conservação da massa (Equação 8) e a equação da conservação de momento nos eixos x e y (Equação 9 e Equação 10).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} + q = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad (10)$$

Onde H é a elevação da superfície da água; h é a profundidade da água; u e v são as velocidades nas direções cartesianas; t é o tempo; q são as contribuições ou abstrações de fluxo; ν_t é o coeficiente de viscosidade turbulenta; c_f é o coeficiente de atrito; f é o parâmetro de Coriolis; e g é a aceleração gravitacional.

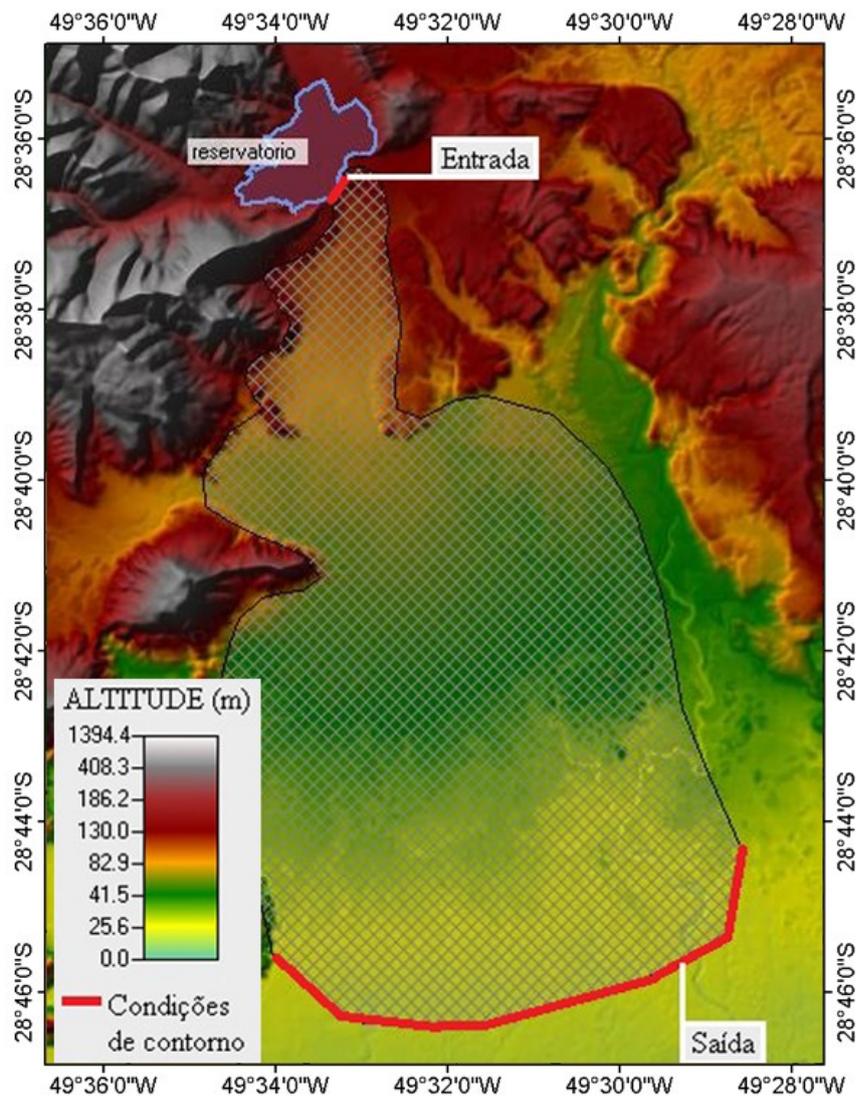
No modelo HEC-RAS 2D para a propagação da onda de cheia é necessário definir as condições de contorno, tanto a jusante, quanto a montante da barragem. Em situações de rompimento de barragem, a condição de contorno a montante do trecho onde está localizada a barragem é definida utilizando o nível e o volume do reservatório no momento do rompimento.

Para propagar a onda de inundação no HEC-RAS 2D utilizou-se uma malha computacional com resolução espacial de 15 m x 15 m para a planície de inundação, a qual permitiu uma melhor estabilidade ao modelo e um menor tempo de processamento. A área utilizada para malha computacional foi de 136,72 km², a qual abrange as comunidades de São Bento Alto e São Bento Baixo e a região central do município de Forquilha, que ficam a jusante da barragem, com isso, foi possível determinar o grau de risco de inundação que essas comunidades estão expostas no caso de uma inundação brusca causada pelo rompimento da

barragem. Na propagação do hidrograma adotou-se um regime de escoamento “não permanente”, com intervalo de tempo computacional de 15 s, o qual permitiu uma melhor estabilidade ao modelo. Esse tempo computacional levou em consideração o intervalo estipulado pela USACE (2014), que sugere um intervalo entre 1 a 60 segundos, devido ao curto espaço de tempo de subida do hidrograma e da velocidade de onda de inundação serem muito rápidos.

Já para a condição a jusante da barragem, utilizou-se como parâmetro a declividade da planície de inundação, determinada usando o MDE. A Tabela 8 apresenta os valores utilizados como condições de contorno, já os locais de entrada e saída da onda de inundação podem ser observados na Figura 18.

Figura 18 – Locais de entrada e saída do hidrograma na área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Tabela 8 – Condições de contorno de entrada e saída

Condições de contorno		Valores adotados
Condições de entrada	Cota	157,5 m
	Volume	58,2 hm ³
Condições de saída	Declividade da planície de inundação	0,0054 m.m ⁻¹

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

3.3.1.1 Coeficiente de Manning

Tschiedel (2017) destaca que a escolha e a calibração do coeficiente de Manning (n) é de difícil aplicação para eventos de rompimento de barragem, uma vez que não há medições de cota e vazões dessa magnitude. Nesse contexto, tabelas de referência da literatura são muito utilizadas em estudos envolvendo rompimento de barragens.

No presente trabalho os valores de n foram ajustados para toda malha computacional, considerando os diferentes usos e ocupação do solo da planície de inundação a jusante da barragem, descritos no item 3.2.3. A Tabela 9 mostra os valores do coeficiente de Manning adotados para a planície de inundação a jusante da barragem, os quais foram definidos com base em Chow (1959).

Tabela 9 – Valores do coeficiente de Manning para a bacia do rio São Bento

Descrição do local	Coeficiente de Manning
Rios	0,045
Floresta	0,055
Agricultura e Pastagem	0,035
Infraestrutura Urbana	0,030

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

3.3.1.2 Dados da brecha

O modo de formação da brecha pode ser definido no modelo HEC-RAS de duas maneiras: (i) utilização de um modelo físico simplificado de evolução de brecha; (ii) entrada direta de dados relativos à evolução da brecha, nesta opção é necessário fornecer todos os parâmetros de formação de brecha, tais como: dimensões, tempo de formação, progressão da brecha, entre outros (USACE, 2014).

A barragem do presente estudo é de concreto e, conforme Vischer e Hager (1997) o tipo de rompimento mais comum de ocorrer é do tipo galgamento (*overtopping*).

ANA (2016) reconhece a dificuldade em definir os parâmetros de formação da brecha nas barragens de concreto, e não especifica qual método ou equação deverá ser utilizada.

Amaral (2019) analisou as equações (largura final da brecha, tempo de formação da brecha e vazão de pico) de USBR (1998), Von Thun e Gillette (1990) e Froehlich (1995) e comparou com os dados de 14 rompimentos reais de barragens. O autor verificou que a formulação de Froehlich (1995) foi a que mais se aproximou dos valores registrados na maioria dos casos.

Froehlich (2008) atualizou suas equações baseado em novas informações de rompimento de barragem. Ele utilizou 74 dados de rompimento de barragens para calcular a largura média da brecha (Equação 11) e o tempo de formação da brecha (Equação 12). Os dados adotados na equação de Froehlich (2008) para as barragens foram: altura entre 3,05 e 92,96 metros e volume do reservatório no momento do rompimento entre 0,0139 e 660 x 10⁶ m³ (USACE, 2014).

$$B_{média} = 0,27 * k_0 * V_w^{0,32} * h_b^{0,04} \quad (11)$$

$$T_f = 63,2 * \sqrt{\frac{V_{rb}}{g * h_b^2}} \quad (12)$$

Em que $B_{média}$ é a largura média da brecha (m); T_f é o tempo de formação da brecha (horas); k_0 é 1,0 para entubamento e 1,3 para galgamento; V_{rb} é o volume do reservatório no momento do rompimento (m³); h_b é a altura da brecha (m); g é a aceleração gravitacional (9,80665 m.s⁻²).

Desta forma, para o presente, conforme Tabela 10, foram utilizados os seguintes parâmetros da brecha, com base em Froehlich (2008).

Tabela 10 – Dados da brecha

Dados	Valor adotado
Largura da brecha na base	104 m
Largura da brecha no topo	134 m
Altura da brecha	15 m
Inclinação da brecha	45°
Tempo de formação da brecha	2,85 h

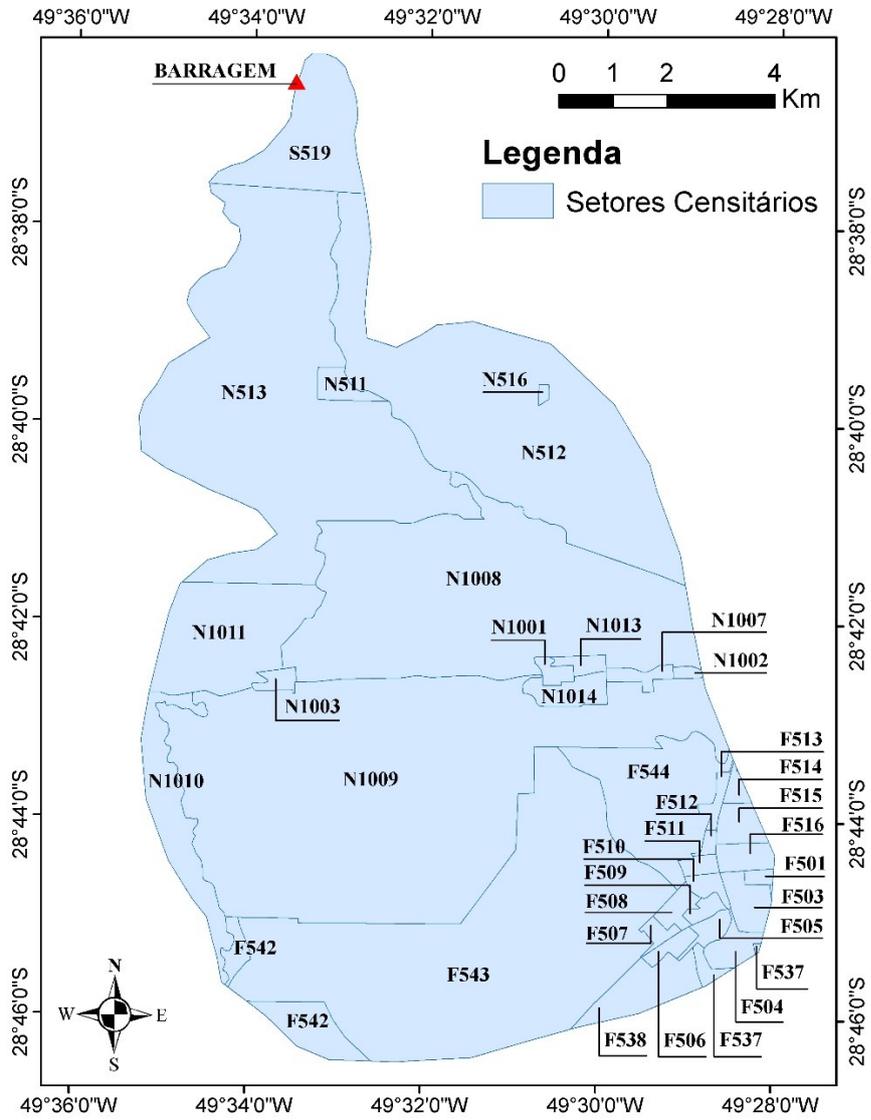
Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

3.3.2 Mapeamento do índice de vulnerabilidade

Para realizar a análise e o mapeamento de risco é necessário avaliar a vulnerabilidade, a qual pode ser definida como a capacidade que uma pessoa, família ou comunidade possui de enfrentar, lidar e resistir a um impacto de um evento de perigo ao qual foi exposta (WISNER et al., 2004). Assim, utilizaram-se indicadores para mensurar a vulnerabilidade, com base nas características socioeconômicas coletadas durante o Censo de 2010, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010).

Para o presente estudo, foram utilizados os indicadores dos setores censitários do Censo, que é a menor unidade territorial para qual o IBGE divulga as informações dos dados levantados em campo. De acordo com o IBGE, o município de Siderópolis é dividido em 27 setores, já o município de Nova Veneza é dividido em 33 setores, enquanto o município de Forquilha é dividido em 47 setores. No entanto, foram considerados na análise os setores delimitados pela malha computacional (Figura 19), sendo ainda, determinado um número de identificação (Tabela 11) para cada setor censitário para melhor identificá-los no presente trabalho.

Figura 19 – Setores censitários a jusante da barragem do Rio São Bento.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Tabela 11 – Identificação dos setores censitários

Código de Identificação	Código do Setor	Cidade
F501	420545605000001	Forquilha
F503	420545605000003	Forquilha
F504	420545605000004	Forquilha
F505	420545605000005	Forquilha
F506	420545605000006	Forquilha
F507	420545605000007	Forquilha
F508	420545605000008	Forquilha
F509	420545605000009	Forquilha
F510	420545605000010	Forquilha
F511	420545605000011	Forquilha
F512	420545605000012	Forquilha
F513	420545605000013	Forquilha
F514	420545605000014	Forquilha
F515	420545605000015	Forquilha
F516	420545605000016	Forquilha
F537	420545605000037	Forquilha
F538	420545605000038	Forquilha
F542	420545605000042	Forquilha
F543	420545605000043	Forquilha
F544	420545605000044	Forquilha
N511	421160305000011	Nova Veneza
N512	421160305000012	Nova Veneza
N513	421160305000013	Nova Veneza
N516	421160305000016	Nova Veneza
N1001	421160310000001	Nova Veneza
N1002	421160310000002	Nova Veneza
N1003	421160310000003	Nova Veneza
N1007	421160310000007	Nova Veneza
N1008	421160310000008	Nova Veneza
N1009	421160310000009	Nova Veneza
N1010	421160310000010	Nova Veneza
N1011	421160310000011	Nova Veneza
N1013	421160310000013	Nova Veneza
N1014	421160310000014	Nova Veneza
S519	421760005000019	Siderópolis

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

O índice de vulnerabilidade foi estabelecido com base na metodologia proposta por Goerl et al. (2012), na qual foram definidas oito variáveis Censitárias, posteriormente agrupadas em seis variáveis, conforme o Quadro 3.

Quadro 3 – Variáveis censitárias e variáveis utilizadas para mensurar a vulnerabilidade

Variáveis Censitárias	Variáveis de Vulnerabilidade
Número de moradores no setor	Número de moradores no setor
Média de moradores por domicílio	Média de moradores por domicílio
Densidade Demográfica	Densidade Demográfica
% da população abaixo de 12 anos	Soma da porcentagem da população acima de 60 e abaixo de 12 anos
% da população acima de 60 anos	
% de pessoas analfabetas acima de 12 anos	% de pessoas analfabetas acima de 12 anos
% de Responsáveis sem rendimento	Soma da porcentagem dos responsáveis sem rendimento e com rendimento de até 1 Salário Mínimo
% de responsável com rendimento até 1 Salário Mínimo	

Fonte: Goerl et al. (2012)

A pesquisa realizada pelo IBGE (2010), teve como data de referência o dia 31 de julho de 2010, sendo ainda, adotados os seguintes critérios:

- a) Pessoa alfabetizada: ter 5 anos ou mais de idade, capaz de ler e escrever um bilhete simples, no idioma que conhece. Aquelas que aprenderam a ler e escrever, mas esqueceram e as que apenas assinassem o próprio nome foram consideradas analfabetas;
- b) Pessoa responsável: para a pessoa (homem ou a mulher) de 10 anos ou mais de idade, reconhecida pelos moradores como responsável pela unidade domiciliar;
- c) Rendimento: a soma do rendimento nominal mensal de trabalho com o proveniente de outras fontes;
- d) Dependência: nesse quesito adotou-se como limite 12 e 60 anos. Os 12 anos porque o Estatuto da Criança e do Adolescente, Lei 8.069/90, considera-se criança pessoa com idade inferior a 12 anos. Considerou-se 60 anos porque segundo o estatuto do idoso, Lei nº 10.741, de 1º de outubro de 2003, em seu art. 1º, considera-se como idoso a pessoa com idade igual ou superior a 60 anos.

Desta forma, o índice de vulnerabilidade (IV) foi estabelecido através da somatória das variáveis de vulnerabilidade dividido pelo Índice de Desenvolvimento Humano do Município (IDH-M):

$$IV = \frac{Dd + Nm + Mm + Td + E + R}{IDHM} \quad (13)$$

Onde, Dd é a densidade demográfica (habitante/km²); Nm é o número de moradores no setor; Mm é média de moradores por residência; Td é a taxa de dependência de crianças (até 12 anos) e idosos (igual ou superior a 60 anos); E é a educação (analfabetos acima de 12 anos); R é a renda (responsável sem rendimento ou com até 1 salário mínimo); e $IDH-M$ é o Índice de Desenvolvimento Humano do Município.

De acordo com Goerl et al. (2012), a vulnerabilidade é inversamente proporcional a capacidade e preparo do município em dar uma resposta e suporte ao acontecimento. Em um desastre natural, todo o município é afetado pela falta de água, falta de luz, estradas são bloqueadas, aulas suspensas, entre outras situações. Sendo, portanto, o IDH-M um índice que representa a capacidade do município em dar uma resposta ao desastre ocorrido.

Os IDH-M de Siderópolis, Nova Veneza e Forquilha (Tabela 12) foram utilizados como indicadores desta capacidade para seus respectivos setores censitários. O IDH-M é um índice composto por três indicadores: vida longa e saudável (longevidade), acesso ao conhecimento (educação) e padrão de vida (renda) e é dividido em cinco classes: de 0 a 0,499 (muito baixo), 0,5 a 0,599 (baixo), 0,6 a 0,699 (médio), 0,7 a 0,799 (alto) e 0,8 a 1 (muito alto).

Tabela 12 – Índice de Desenvolvimento Humano dos Municípios a jusante da barragem

Município	IDH-M	Classe
Siderópolis	0,774	Alto
Nova Veneza	0,768	Alto
Forquilha	0,753	Alto

Fonte: IBGE (2010)

Para uniformizar as unidades das variáveis, estes foram escalonados de 0 a 1, conforme Equação 14, sendo 1 para o valor máximo e 0 para o valor mínimo.

$$Ve = \frac{Vo - Vmín}{Vmáx - Vmín} \quad (14)$$

Onde, Ve é o valor escalonado; Vo é o valor observado; $Vmín$ é o valor mínimo; $Vmáx$ é o valor máximo. O escalonamento foi baseado na metodologia proposta por Marcelino et al. (2006).

O IV foi classificado em quatro classes, baixa, média, alta e muito alta, que foram definidas usando o método *Natural Breaks*, que de acordo com ESRI (2016), este método faz agrupamentos naturais dos dados, agrupando os valores similares de cada grupo e maximizando as diferenças entre as classes, os limites estabelecidos pelo método são configurados onde existem diferenças consideráveis grandes entre os valores dos dados. Este mesmo método foi utilizado por Reis et. al. (2014) e Souza et. al. (2006).

3.3.3 Mapeamento do índice de perigo

O mapa do índice de perigo foi gerado a partir das manchas de inundação simuladas no HEC-RAS. Para a determinar o índice de perigo (IP) foi utilizado a metodologia proposta por Stephenson (2002), que considera a combinação da altura da lâmina de água e a velocidade do fluido para um determinado ponto da área inundada. Logo, o índice de perigo é calculado:

$$IP = h \times v \quad (15)$$

Onde, h é a profundidade da água (m); e v é a velocidade do escoamento ($m.s^{-1}$).

O mapa de perigo para o rompimento hipotético da barragem foi obtido multiplicando os mapas de profundidade da lâmina de água e velocidade do fluxo, obtidos no HEC-RAS 2D, utilizando a ferramenta *Raster Calculator* do ArcGIS 10.5. Esse mapa foi caracterizado utilizando as classes de perigo propostas por Prevene (2001). Os perigos associados para cada grau de perigo são apresentados na Tabela 13:

Tabela 13 – Níveis de Perigo de Inundação

Nível de Perigo	Classe	Cor no Mapa	Descrição
Alto	$>1,0 \text{ m}^2.s^{-1}$	Vermelho	As pessoas estão em perigo, dentro ou fora de suas casas. As construções possuem alta possibilidade de serem destruídas.
Médio	$0,5 \text{ a } 1,0 \text{ m}^2.s^{-1}$	Laranja	As pessoas estão em perigo fora de suas casas. As construções podem sofrer danos e serem destruídas.
Baixo	$0,1 \text{ a } 0,5 \text{ m}^2.s^{-1}$	Amarelo	Baixa ou inexistente possibilidade de fatalidades. As construções podem sofrer danos.

Fonte: Adaptado de Prevene (2001)

3.3.4 Mapeamento do índice de risco

O mapa do índice de risco é o resultado final deste trabalho, e conforme comentado anteriormente, o índice de risco (IR) é em função do perigo e da vulnerabilidade, conforme demonstra a Equação 16. A vulnerabilidade foi determinada através do índice de vulnerabilidade para cada setor censitário. Já o índice de perigo foi determinado através do produto da velocidade e altura da lâmina de água da mancha de inundação.

$$IR = IP \times IV \quad (16)$$

Onde IP é o índice de perigo; e IV é o índice de vulnerabilidade. O mapa do IR foi dividido em três classes, seguindo os mesmos critérios adotados para o IP . Desta forma, as classes que dividem o IR é de 0,1 a 0,5 $m^2 \cdot s^{-1}$ para baixo, 0,5 a 1,0 $m^2 \cdot s^{-1}$ para médio e mais do que 1,0 $m^2 \cdot s^{-1}$ para a alto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Para a simulação do rompimento hipotético da barragem do rio São Bento, foi necessário fornecer o coeficiente de Manning, na qual foram definidas com base em Chow (1959), tendo como base o mapa de uso e ocupação do solo (Figura 20). Além de poder determinar o valor de Manning para cada região, com o mapa de uso e ocupação do solo é possível identificar e compreender de qual forma são utilizadas as terras que estão a jusante da barragem, permitindo também identificar as regiões que são habitadas.

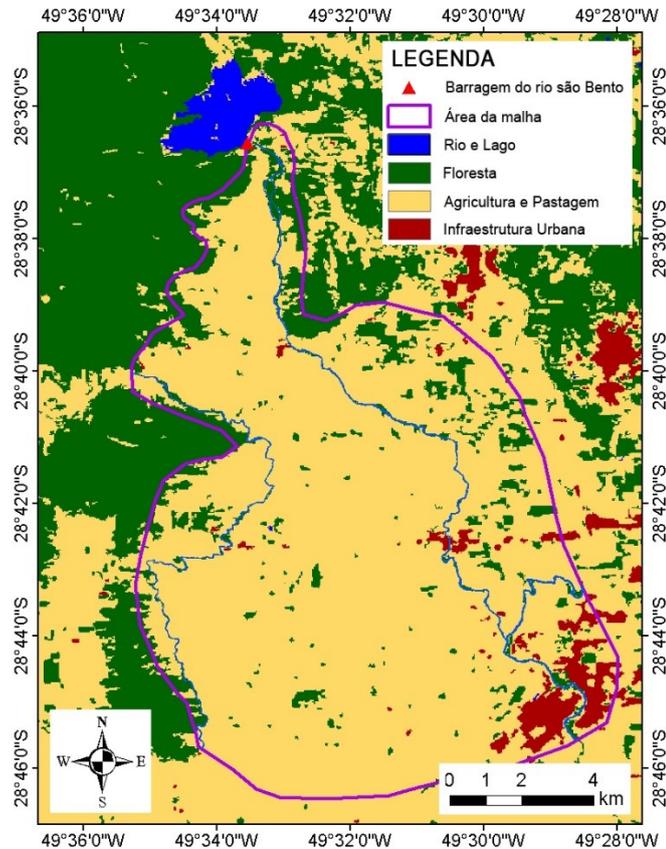
Observa-se que a jusante da barragem do rio São Bento, dentro das limitações da malha computacional, a maior área é usada para agricultura (Tabela 14), tendo como principal cultivo, a plantação de arroz, esta área representa 85,40 % de toda área da malha. Em seguida, com maior representatividade são as florestas (10,39 %), seguido por infraestrutura urbana (3,42 %) e rios e lagos (0,8 %).

Tabela 14 – Área e valores do coeficiente de Manning para cada uso do solo da malha computacional

Descrição do local	Área (km²)	Área (%)	Coeficiente de Manning
Rios	1,09	0,8	0,045
Floresta	14,24	10,39	0,055
Agricultura e Pastagem	117,01	85,40	0,035
Infraestrutura Urbana	4,68	3,42	0,030

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021)

Figura 20 – Mapa de uso e ocupação do solo.

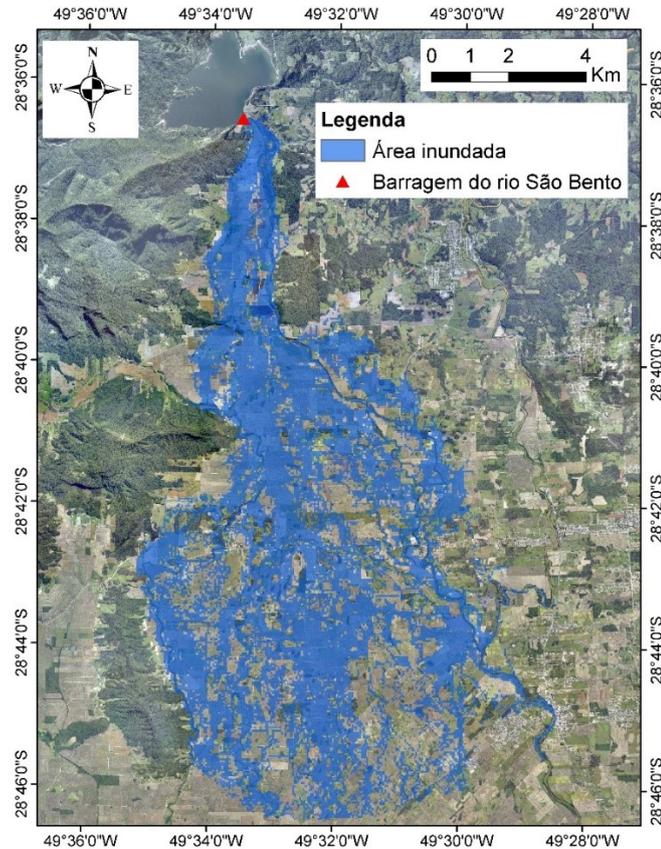


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

4.2 ÁREA INUNDADA COM O MODELO HEC-RAS 2D

A simulação do rompimento da barragem de São Bento com o HEC-RAS 2D resultou numa área de inundação de 64,8 km², abrangendo várias comunidades localizadas a jusante da barragem e extensas áreas de plantio de arroz, como mostra a Figura 21. O resultado da simulação mostra que a onda de cheia atinge primeiro a comunidade de São Bento Alto (149 habitantes), que fica a 6,5 km da barragem, em seguida São Bento Baixo (786 habitantes), a 15,5 km, e por último a região central do município de Forquilha (22 km de distância). As duas primeiras comunidades pertencem ao município de Nova Veneza (SC).

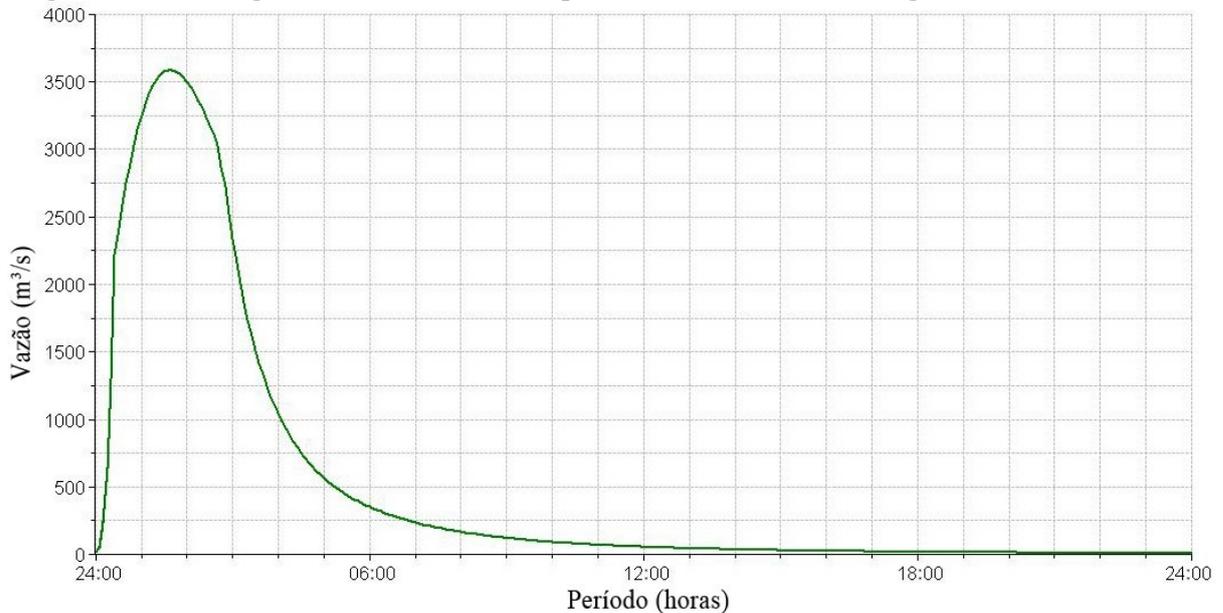
Figura 21 – Extensão da área de inundação simulada no HEC-RAS 2D.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 22 mostra o hidrograma defluente devido à brecha simulada no HEC-RAS 2D, obtido com base nos parâmetros da Tabela 1. Observa-se que a formação da brecha acontece num intervalo de 2 horas e 51 minutos, sendo que o pico de vazão, estimado em $3586,60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ocorreu em 1 hora e 40 minutos. O volume total extravasado estimado devido ao rompimento da barragem foi de $44,75 \text{ hm}^3$, que representa cerca de 79% do volume total do reservatório no nível máximo normal.

Figura 22 – Hidrograma resultante do rompimento simulado da barragem do rio São Bento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

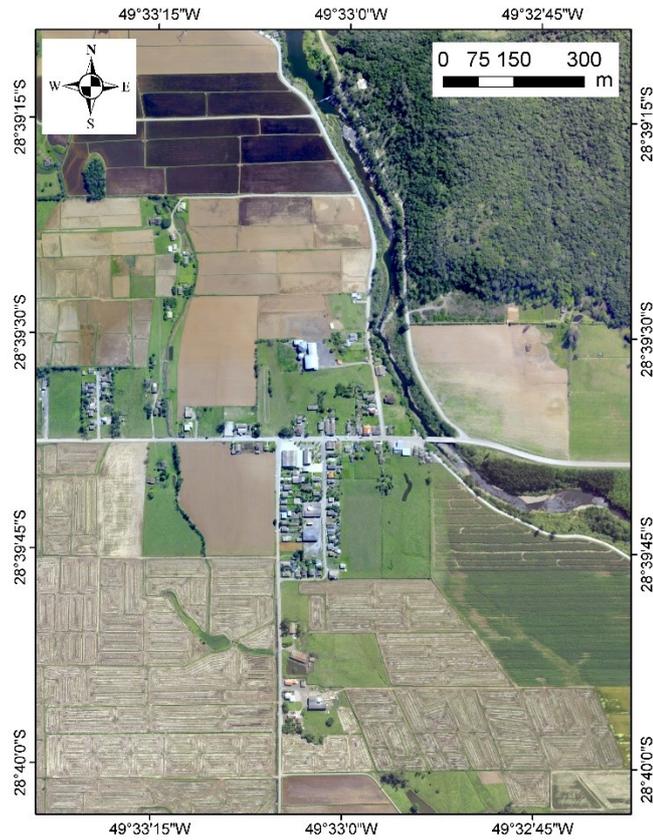
Para que se torne possível um planejamento e uma plano de emergência faz-se necessário analisar o tempo que a onda de cheia do rompimento da barragem chega até as comunidades a jusante do barramento.

As Figura 23, 25 e 27 mostram as comunidades antes de serem atingidas pela onda de cheia, já as Figura 24, 26 e 28 mostram o momento de chegada da onda de cheia nas comunidades. Na comunidade de São Bento Alto o tempo estimado de chegada da onda de cheia foi de 55 minutos, com a profundidade máxima (Figura 24a) e a velocidade máxima (Figura 24b) da água de 0,30 m e $1,7 \text{ m.s}^{-1}$, respectivamente. Em São Bento Baixo o tempo de chegada da onda de cheia foi de 2h45min, com uma profundidade máxima (Figura 26a) de 0,8 m e a velocidade máxima (Figura 26b) de $1,4 \text{ m.s}^{-1}$. Já na região central do município de Forquilha a onda de cheia chegou em 4h30min, com uma profundidade máxima (Figura 28a) de 0,6 m e uma velocidade máxima (Figura 28b) de $0,8 \text{ m.s}^{-1}$ as margens do trecho do rio São Bento.

Para o valor de IP calculado no momento de chegada da cheia nas comunidades, obtido pela Equação 15 e caracterizado por Prevene (2001), observa-se que: na comunidade de São Bento Alto, a maior área do perigo é baixo (Figura 24c), porém já apresenta em alguns locais perigo médio e alto, ou seja, desde a chegada da onda, as pessoas já estão em perigo, dentro ou fora de suas casas e com alta possibilidade das construções serem destruídas; já na comunidade de São Bento Baixo (Figura 26c) e na região central de Forquilha (Figura 28c), o perigo é alto apenas na calha do rio, apresentando perigo baixo na comunidade, desta forma, as pessoas

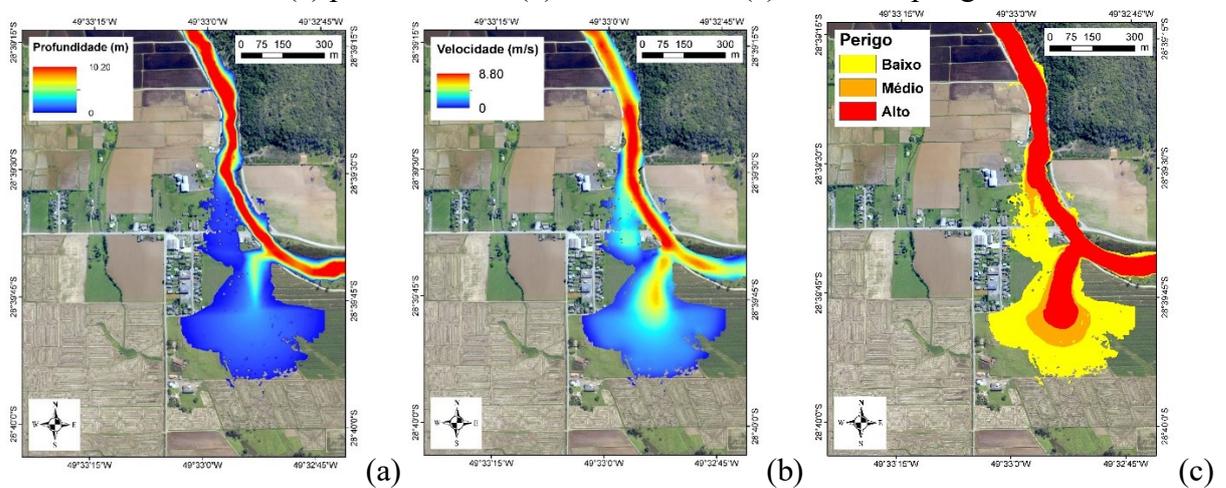
possuem baixa ou inexistente possibilidade de fatalidades, porém as construções podem sofrer algum tipo de dano.

Figura 23 – Comunidade de São Bento Alto antes da chegada da onda.



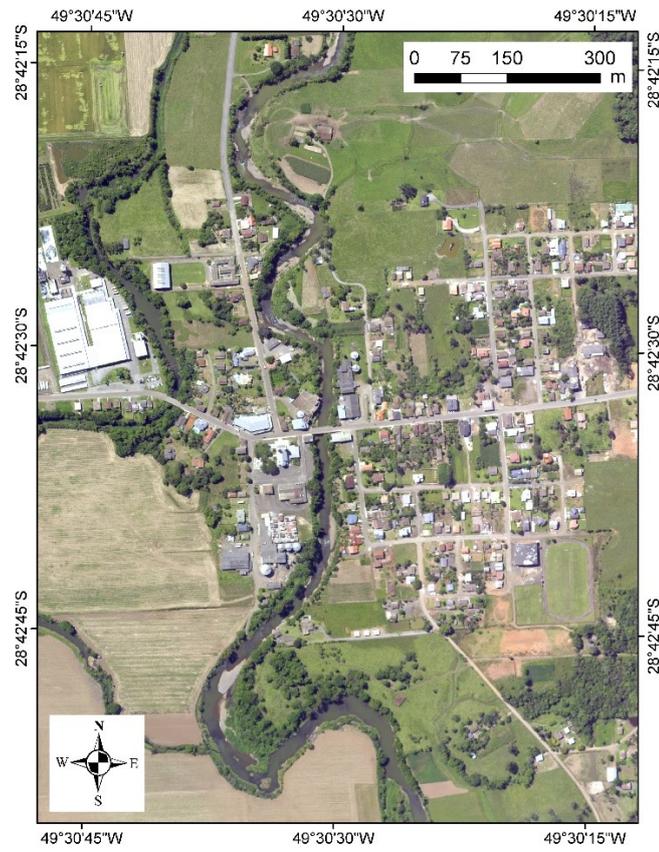
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 24 – Situação no momento da chegada da onda (55min) na comunidade de São Bento Alto: (a) profundidade; (b) velocidade; e (c) índice de perigo.



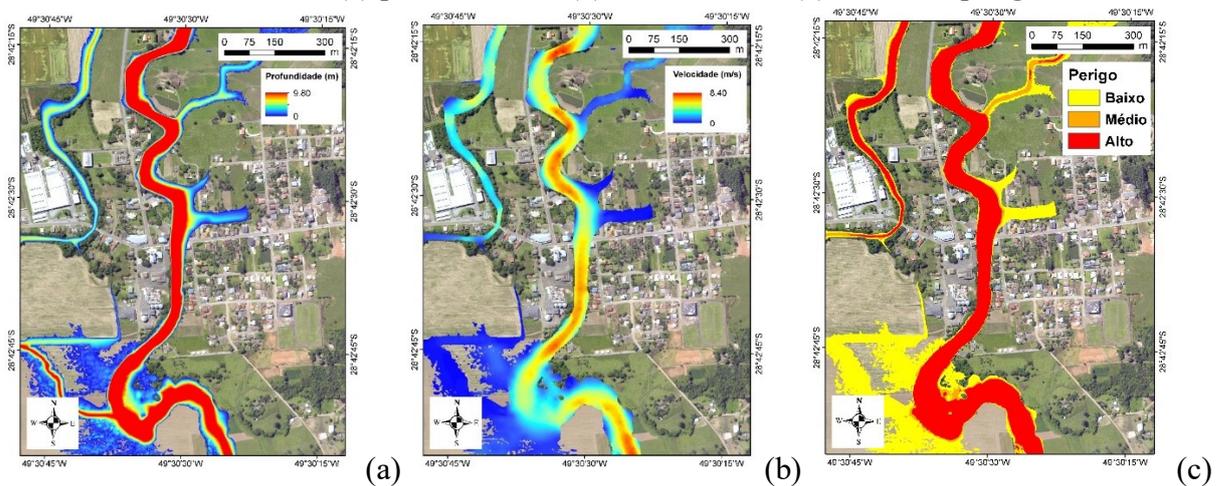
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 25 – Comunidade de São Bento Baixo antes da chegada da onda.



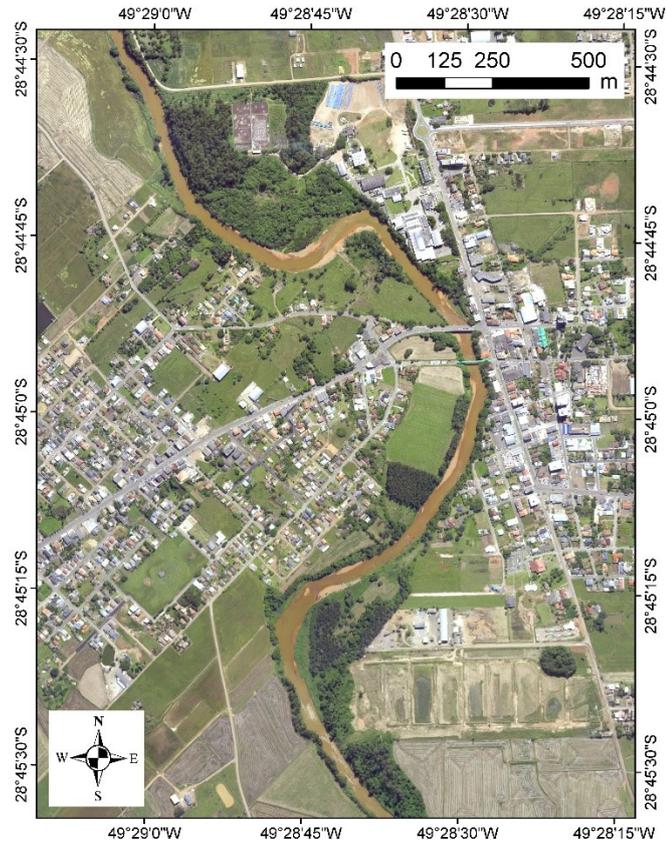
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 26 – Situação no momento da chegada da onda (2h45min) na comunidade de São Bento Baixo: (a) profundidade; (b) velocidade; e (c) índice de perigo.



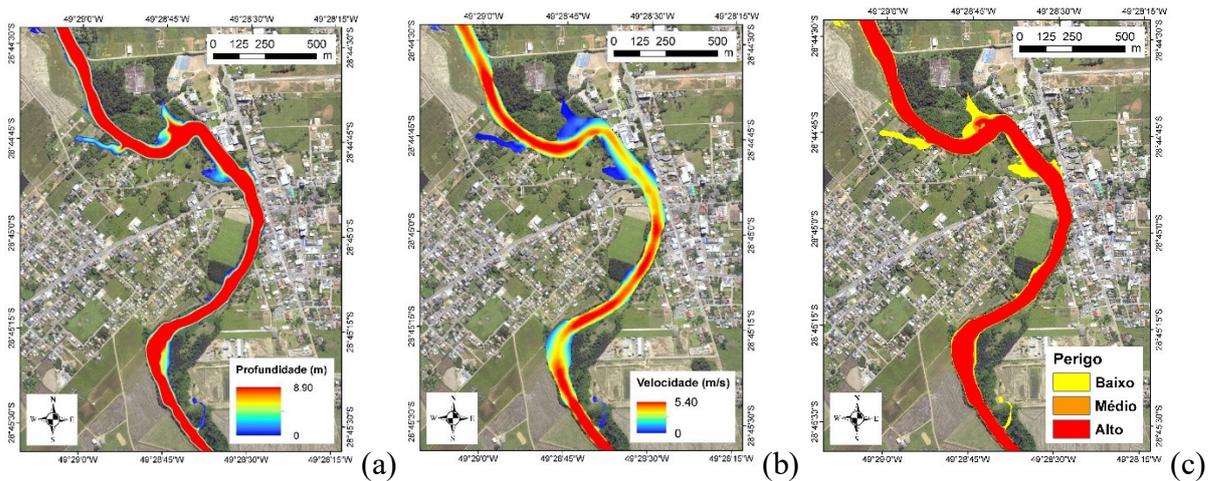
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 27 – Região central de Forquilha antes da chegada da onda.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 28 – Situação no momento da chegada da onda (4h30min) em Forquilha: (a) profundidade; (b) velocidade; e (c) índice de perigo.



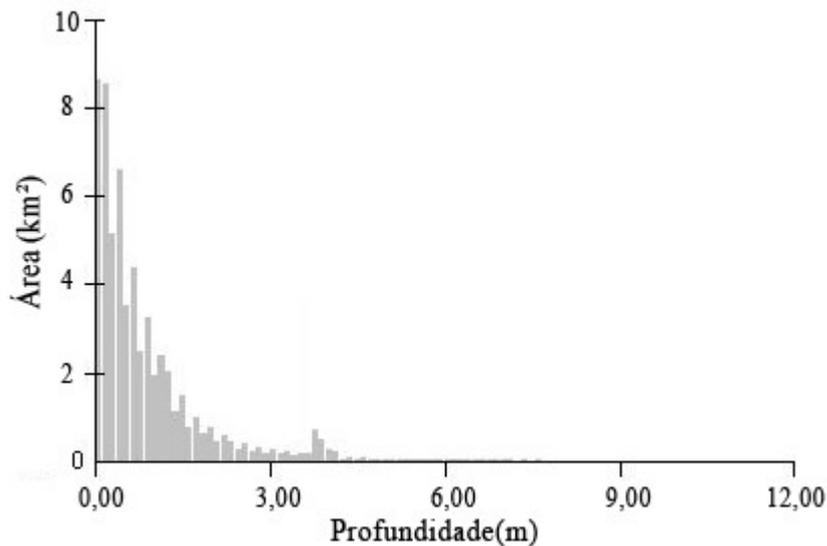
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

4.3 MAPA DE ÍNDICE DE PERIGO

O mapeamento do índice de perigo representa a espacialização do possível e potencial dano que a onda de inundação pode ocasionar. Desta forma, o mapa de índice de perigo foi obtido através da Equação 15 proposta por Stephenson (2002), utilizando o mapa de profundidade e o mapa de velocidade simulados pelo HEC-RAS com o rompimento hipotético da barragem do rio São Bento.

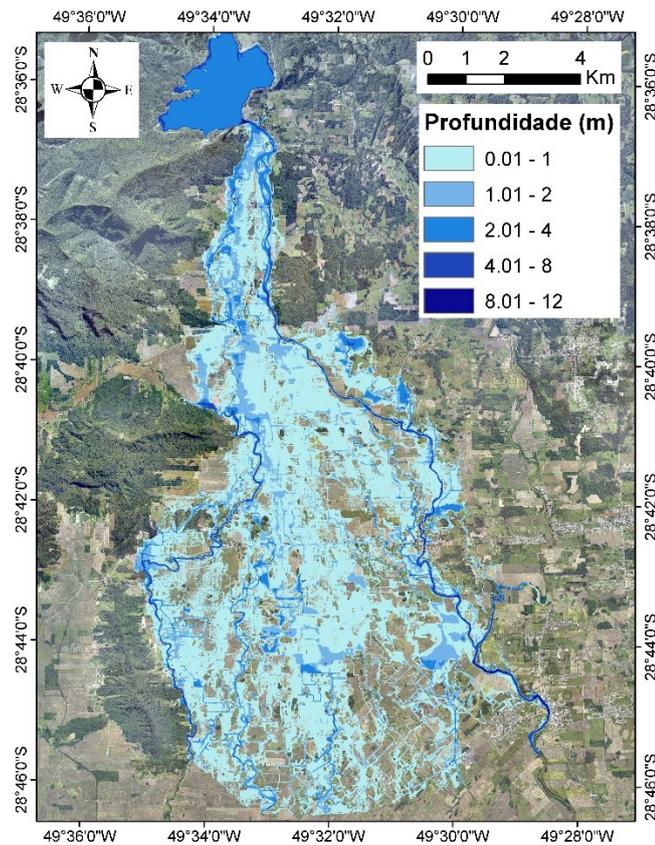
Percebe-se que no mapa de profundidade (Figura 30), a maior parte da área de inundação possui uma profundidade de até 2 metros de altura, conforme Figura 29, que representa a área da mancha de inundação (64,8 km²) do mapa em relação a profundidade da água, possuindo uma maior profundidade nas regiões mais próximas da barragem, até 6 km de distância, e também nas calhas dos rios e córregos.

Figura 29 – Relação área do mapa por profundidade da lâmina de água.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

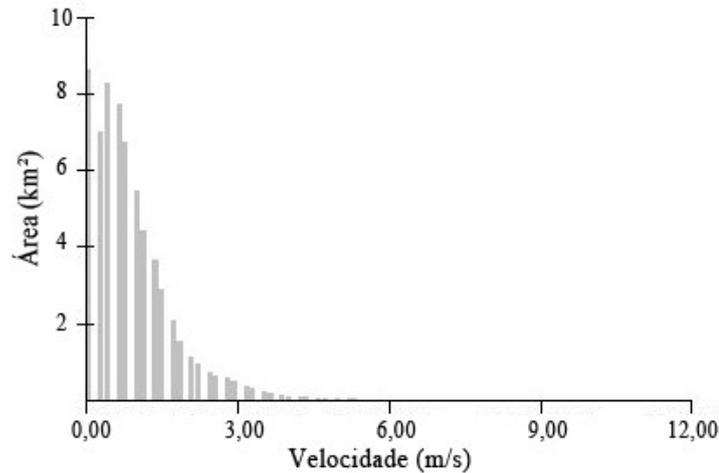
Figura 30 – Mapa de inundação com as profundidades da lâmina de água.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

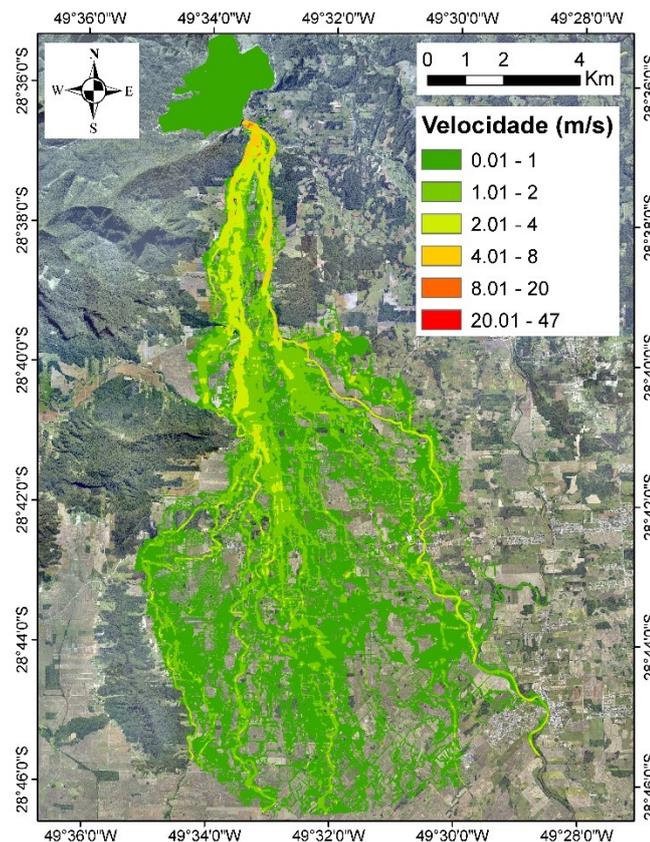
Já para o mapa de velocidade (Figura 32), percebe-se que as maiores velocidades estão logo após a barragem (até 6 km), pois é o início da propagação da onda proveniente do rompimento, assim como nas calhas dos rios, principalmente nos trechos onde possui uma maior declividade ou com presença de curvas. Já a maior região inundada ficou com velocidades menores, de até 2 m.s^{-1} (Figura 31), predominando na região agrícola.

Figura 31 – Relação área do mapa por velocidade da água.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 32 – Mapa de inundação com as velocidades da lâmina de água.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Como resultado da multiplicação do mapa de profundidade pelo da velocidade, obteve-se um mapa onde cada pixel representa um IP (Figura 33). Esse mapa foi classificado em três classes de perigo (Tabela 13). Observa-se que a maior área inundada (36,68 m²) é classificada como perigo baixo, representando 56,60 % da área total (Tabela 15), ou seja, a onda de cheia apresentou valores de IP < 0,5 m².s⁻¹. Nessas regiões, conforme Prevene (2001), as pessoas

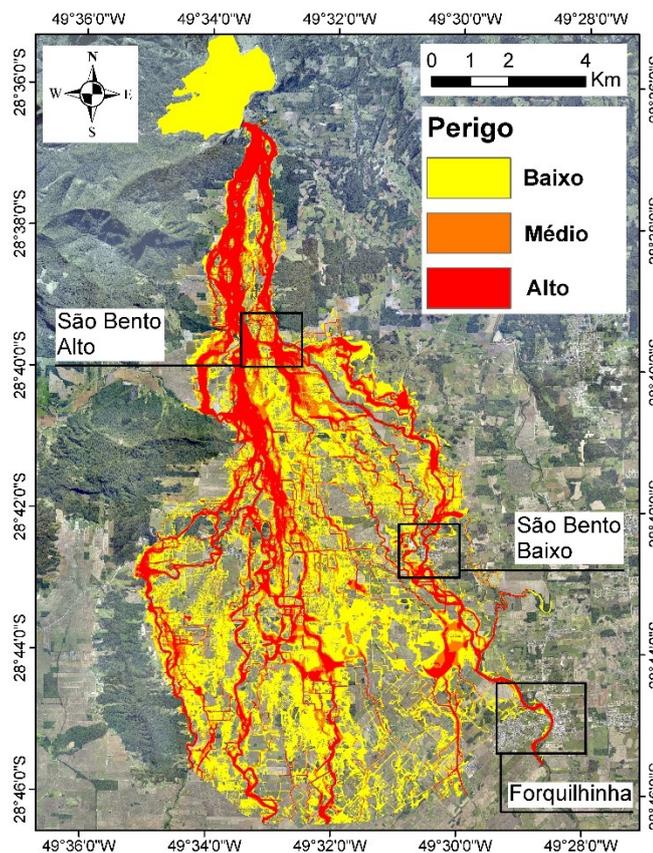
possuem baixa ou inexistente possibilidade de fatalidades, porém as construções podem sofrer algum tipo de dano.

Tabela 15 – Classificação das áreas de inundação em km² para cada grau de perigo

Nível de Perigo	Área (km ²)	Área (%)
Baixo	36,68	56,60
Médio	9,96	15,37
Alto	18,16	28,02
Total	64,80	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 33 – Mapa de índice de perigo de inundação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

As Figura 34, 35 e 36 mostram os mapas de profundidade máxima (a), velocidade máxima (b) e índice de perigo (c) nas três comunidades atingidas, já a Tabela 16 apresenta a relação da área inundada com a área de cada comunidade e também a porcentagem de cada nível de perigo. Na comunidade de São Bento Alto (Figura 34), a profundidade máxima é de 2,90 m e a velocidade máxima é de $5,70 \text{ m.s}^{-1}$, desta forma, o nível de perigo alto é o que predomina na região, assim, as pessoas estão em perigo, dentro ou fora de suas casas e com alta

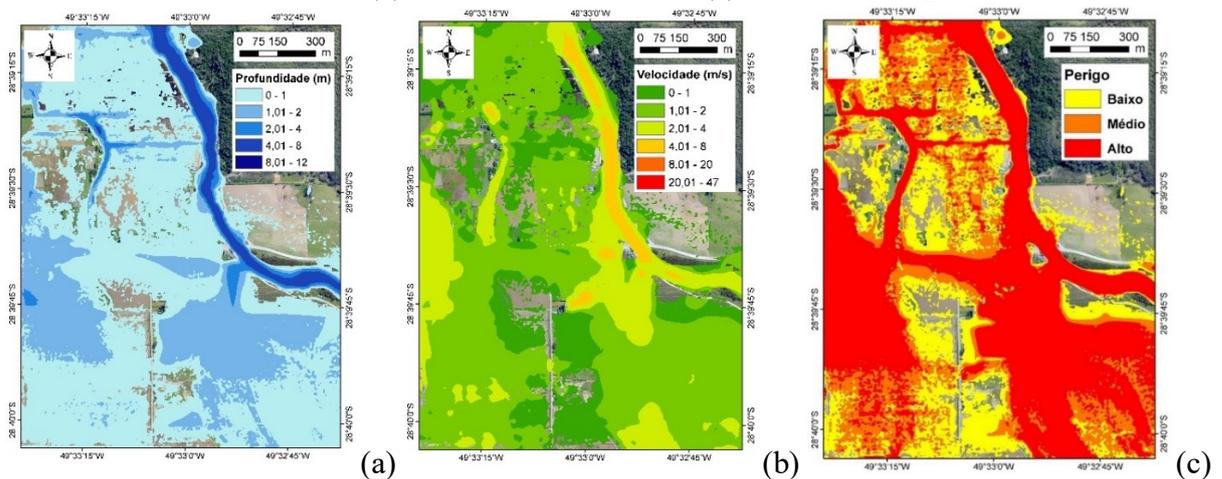
possibilidade das construções serem destruídas. Já na comunidade de São Bento Baixo (Figura 35), a onda de cheia atinge parcialmente as residências, com uma profundidade máxima de 2,60 m e a velocidade máxima de $2,00 \text{ m.s}^{-1}$, prevalecendo o perigo alto na calha do rio São Bento e nas áreas com pouca ou nenhuma ocupação humana. Nas áreas mais habitadas o IP predomina como baixo e alguns pontos como médio. Já na região central do município de Forquilha (Figura 36), região analisada que está mais afastada da barragem, pouco sofre com os impactos provenientes do rompimento hipotético da barragem, as poucas áreas atingidas pelo rompimento possuem uma profundidade máxima de 0,60 m e a velocidade máxima de $0,70 \text{ m.s}^{-1}$, tendo como nível de perigo alto principalmente na calha do rio e próximo de suas margens (20 metros), ocasionando uma maior preocupação as construções e habitantes próximos as margens do rio, pois estão com alta possibilidade de sofrerem danos.

Tabela 16 – Classificação das áreas de inundação das comunidades para cada grau de perigo

Localidade	Área do setor (km ²)	Área Inundada (%)	Nível de Perigo (%)		
			Baixo	Médio	Alto
São Bento Alto	0,45	85,01	29,13	19,78	51,10
São Bento Baixo	1,26	27,27	42,85	16,80	40,35
Forquilha	3,23	10,36	41,67	5,47	52,87

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 34 – Mapas de inundação na comunidade de São Bento Alto: (a) profundidade máxima; (b) velocidade máxima; e (c) índice de perigo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 35 – Mapas de inundação na comunidade de São Bento Baixo: (a) profundidade máxima; (b) velocidade máxima; e (c) índice de perigo.

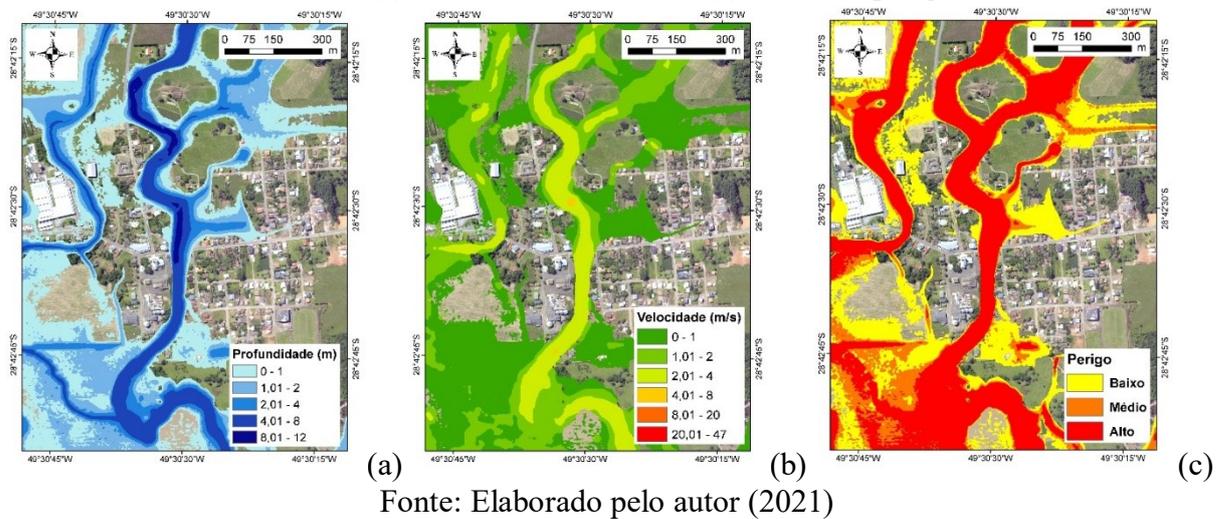
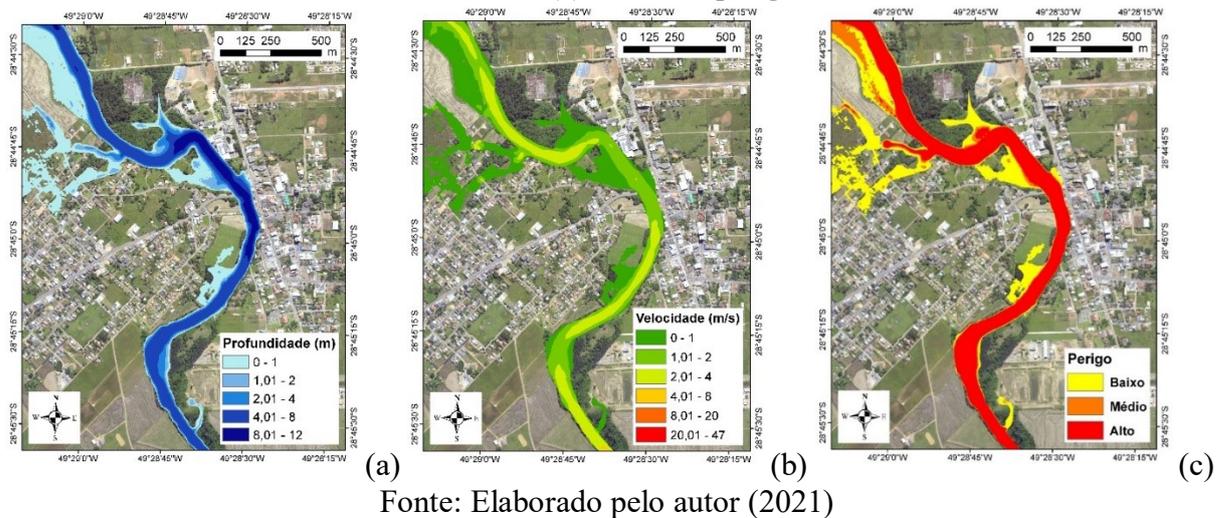


Figura 36 – Mapas de inundação em Forquilha: (a) profundidade máxima; (b) velocidade máxima; e (c) índice de perigo.



4.4 MAPA DE ÍNDICE DE VULNERABILIDADE

Foram utilizadas 6 variáveis do Censo demográfico de 2010 para definir o índice de vulnerabilidade da região a jusante da barragem. Optou-se por essas variáveis, pois são as que representam melhor a vulnerabilidade, abordando aspectos populacionais, educacionais e de renda. A Tabela 17 apresenta os valores das 6 variáveis para cada setor censitário.

Tabela 17 – Dados das variáveis de vulnerabilidade por setor censitário

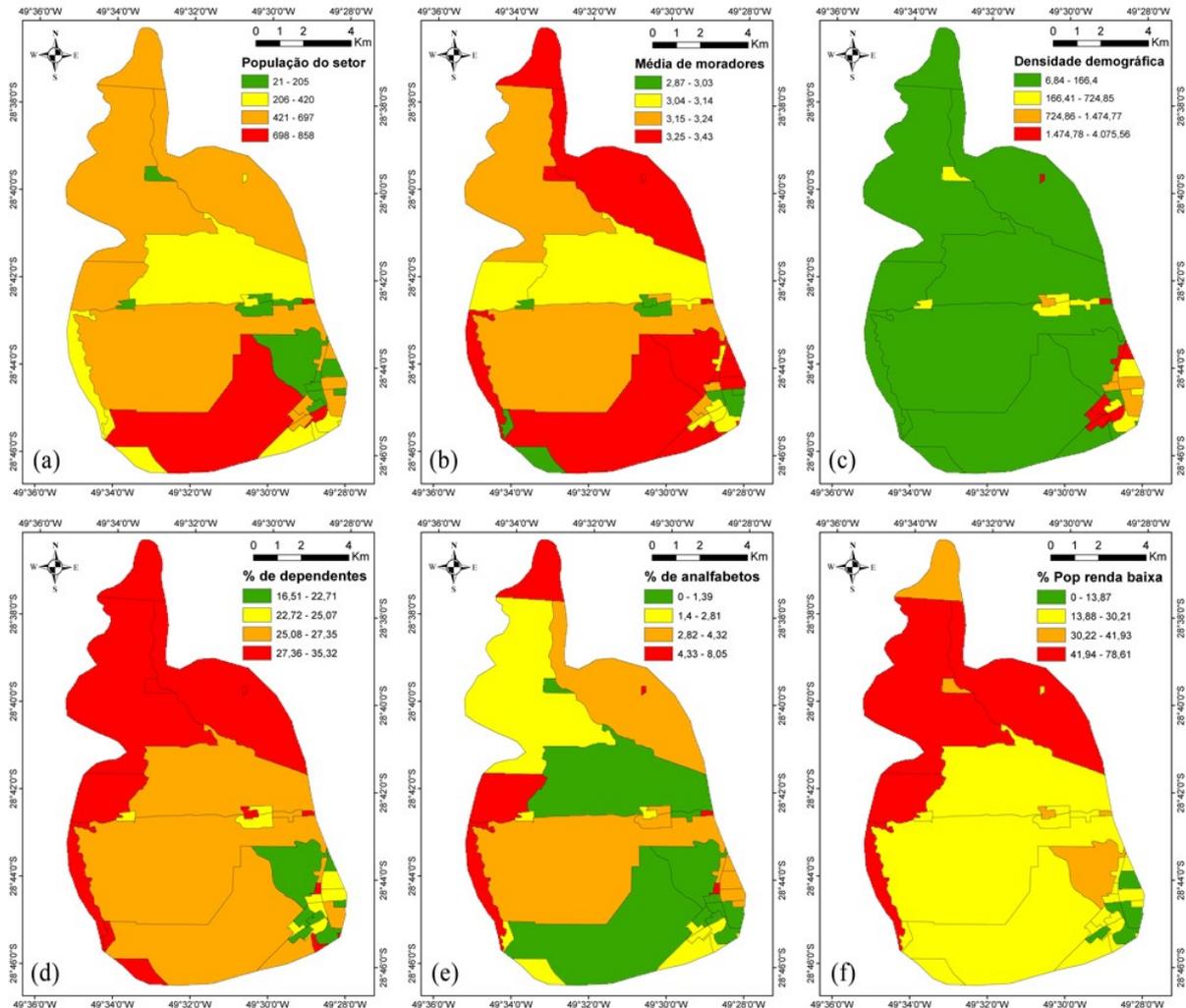
Código do Setor	Dd	Nm	Mm	Td	E	R
F501	674.14	108	3,00	22,22%	3,37%	22,22%
F503	857.47	601	2,96	25,96%	0,55%	10,34%
F504	581.4	380	3,06	21,05%	0,00%	0,00%
F505	2556.14	784	3,12	23,72%	2,29%	17,13%
F506	2327.68	641	3,13	20,75%	2,17%	13,66%
F507	3316.93	666	3,19	23,42%	2,31%	16,75%
F508	1948.51	697	3,14	22,38%	1,35%	20,72%
F509	509.01	109	3,03	16,51%	0,94%	21,62%
F510	80.2	21	3,00	23,81%	0,00%	0,00%
F511	733.34	154	3,21	22,73%	0,80%	20,83%
F512	1261.45	140	3,41	28,57%	6,19%	26,83%
F513	2266.74	513	3,13	26,90%	3,79%	26,22%
F514	1474.94	686	3,27	22,45%	4,30%	20,95%
F515	173.71	133	3,33	23,31%	2,83%	10,00%
F516	1123.77	597	3,24	23,95%	3,53%	18,48%
F537	14.11	356	3,33	28,37%	2,31%	14,02%
F538	15.2	420	3,36	25,71%	1,39%	21,60%
F542	23.54	389	3,02	35,22%	2,65%	23,08%
F543	37.66	834	3,31	26,74%	0,98%	22,35%
F544	19.02	161	3,29	21,74%	0,74%	38,78%
N511	365.22	149	3,31	32,21%	0,82%	35,56%
N512	19,31	654	3,32	29,20%	3,97%	42,13%
N513	8,6	555	3,21	29,01%	2,27%	78,61%
N516	4075.56	230	3,43	27,39%	8,05%	29,85%
N1001	1011.82	235	2,87	35,32%	2,34%	30,49%
N1002	3844.65	858	3,34	29,72%	4,35%	40,86%
N1003	634.63	148	2,90	25,00%	2,22%	26,92%
N1007	609.76	175	3,13	25,14%	1,30%	21,05%
N1008	14.51	256	3,12	27,34%	1,32%	19,51%
N1009	22.17	613	3,21	26,10%	3,68%	22,40%
N1010	7.69	243	3,24	28,40%	4,76%	72,00%
N1011	10.07	613	3,13	32,79%	5,25%	73,47%
N1013	658.87	161	3,22	24,84%	3,79%	16,00%
N1014	307.6	205	2,97	24,39%	3,35%	20,29%
S519	6,84	601	3,43	30,28%	4,67%	31,64%

Onde, Dd é a densidade demográfica (habitante/km²); Nm é o número de moradores no setor; Mm é média de moradores por residência; Td é a taxa de dependência de crianças (até 12 anos) e idosos (igual ou superior a 60 anos); E é a educação (analfabetos acima de 12 anos); R é a renda (responsável sem rendimento ou com até 1 salário mínimo).

Fonte: IBGE (2010)

A Figura 37 apresenta as seis variáveis censitárias utilizadas para estimar o índice de vulnerabilidade.

Figura 37 – Mapa das variáveis censitárias: (a) população total do setor; (b) média de moradores por residência; (c) densidade demográfica; (d) % de população dependente; (e) % de analfabetos; e (f) % da população com baixa renda.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

No trecho a jusante da barragem os setores mais populosos (Figura 37a) estão localizados nos setores que possuem maior área territorial, porém com baixa densidade demográfica (Figura 37b), com 6,84 a 166,4 habitantes.km⁻² e número médio de moradores por domicílio (Figura 37c) de 2,87 a 3,43. Os setores com maior densidade demográfica, têm entre 1474,78 a 4075,56 habitantes.km⁻², entre eles, as comunidades de São Bento Alto, São Bento Baixo e região central de Forquilha. Apesar da baixa densidade demográfica na zona rural, essa é uma área onde a maioria dos moradores tem idade acima de 60 anos (Figura 37d). Isso aumenta a vulnerabilidade das pessoas ao perigo de inundação, no caso do rompimento da

barragem. Reis et al. (2014), que utilizaram a mesma metodologia proposta por Goerl et al. (2012) para definir as variáveis censitárias do índice de vulnerabilidade, também encontrou menor densidade demográfica e maior taxa de dependentes nos setores rurais analisados correspondentes aos municípios de Alto Feliz e São Vendelino, no Rio Grande do Sul.

Também observa-se que a população de baixa renda (Figura 37f) está concentrada mais próxima da barragem (até 9 km). Já os setores com maior renda per capita estão localizados em áreas mais distantes da barragem (20 km), principalmente na zona urbana do município de Forquilha. Reis et al. (2014) também verificaram que os setores urbanos apresentam maior renda em relação aos setores rurais. Com relação à taxa de analfabetismo de pessoas acima de 12 anos, por setor censitário, o mapa mostra que a região não apresenta uma distribuição homogênea (Figura 37e), porém apresentou uma relação com a população de baixa renda, demonstrando que setores onde possuem maior renda, tende a ter menor taxa de analfabetismo.

Na Tabela 18 são apresentados os dados escalonados de cada variável censitária e o resultado final do Índice de Vulnerabilidade de cada setor censitário obtidos através da Equação 13. Utilizando o método de classificação Natural Breaks, estes setores foram agrupados em quatro classes: Muito Alta, Alta, Média e Baixa, conforme apresenta a

Figura 38. Desta forma é possível observar a vulnerabilidade de cada setor para a área a jusante da barragem do rio São Bento.

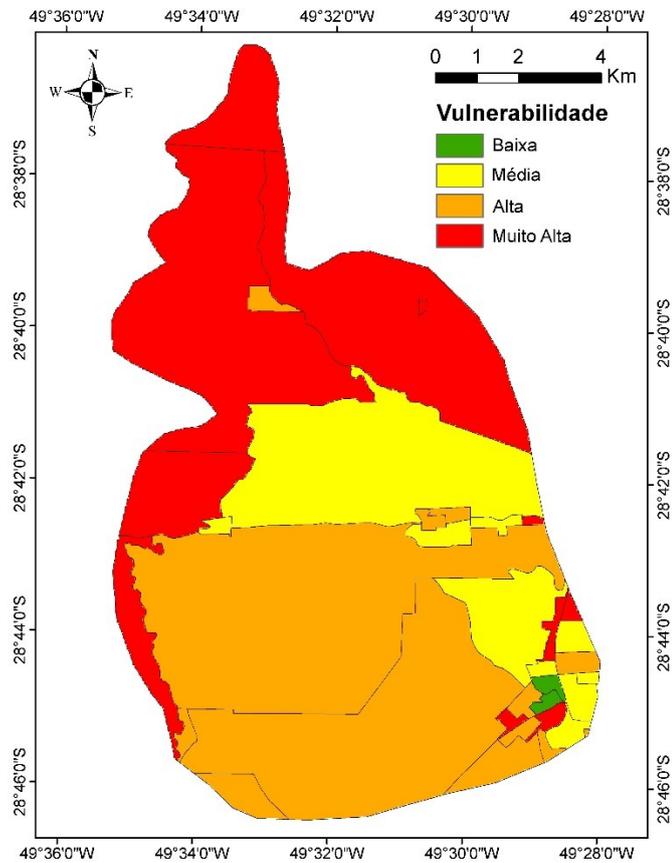
Entre 35 setores analisados que estão dentro da área inundada simulada pelo HEC-RAS 2D, apenas 2 apresentaram baixa vulnerabilidade, sendo estes os setores censitários F509 e F510, os quais apresentaram valores baixos para todas as variáveis analisadas (Figura 37). Observa-se também que, os setores mais próximos da barragem apresentaram a vulnerabilidade alta e muito alta. Esse aspecto, chama atenção em relação a inundação causada por um possível rompimento da barragem do rio São Bento devido à falha na sua estrutura. Outros setores mais afastados da barragem também apresentaram vulnerabilidade muito alta, como por exemplo, os setores N1002, F505, F507, F513 e F514. No entanto, o setor N1002, apresentou o maior valor de índice de vulnerabilidade devido ao maior número de moradores (858), elevada média de moradores por domicílio (3,34), alta densidade demográfica (3844.65 habitantes.km⁻²) e uma elevada taxa de dependentes (29,72 %).

Tabela 18 – Dados das variáveis escalonadas e o índice de vulnerabilidade por setor censitário

Código do Setor	Dd	Nm	Mm	Td	E	R	IDH-M	IV
F501	0,164	0,104	0,232	0,304	0,419	0,283	0,753	2,00
F503	0,209	0,693	0,161	0,502	0,069	0,132	0,753	2,34
F504	0,141	0,429	0,339	0,242	0,000	0,000	0,753	1,53
F505	0,627	0,912	0,446	0,384	0,284	0,218	0,753	3,81
F506	0,570	0,741	0,464	0,225	0,270	0,174	0,753	3,25
F507	0,814	0,771	0,571	0,368	0,287	0,213	0,753	4,02
F508	0,477	0,808	0,482	0,312	0,168	0,264	0,753	3,33
F509	0,123	0,105	0,286	0,000	0,117	0,275	0,753	1,20
F510	0,018	0,000	0,232	0,388	0,000	0,000	0,753	0,85
F511	0,179	0,159	0,607	0,331	0,099	0,265	0,753	2,18
F512	0,308	0,142	0,964	0,641	0,770	0,341	0,753	4,21
F513	0,555	0,588	0,464	0,552	0,472	0,334	0,753	3,94
F514	0,361	0,795	0,714	0,316	0,534	0,267	0,753	3,97
F515	0,041	0,134	0,821	0,361	0,352	0,127	0,753	2,44
F516	0,275	0,688	0,661	0,396	0,439	0,235	0,753	3,58
F537	0,002	0,400	0,821	0,631	0,287	0,178	0,753	3,08
F538	0,002	0,477	0,875	0,489	0,173	0,275	0,753	3,04
F542	0,004	0,440	0,268	0,995	0,329	0,294	0,753	3,09
F543	0,008	0,971	0,786	0,544	0,122	0,284	0,753	3,60
F544	0,003	0,167	0,750	0,278	0,091	0,493	0,753	2,37
N511	0,088	0,153	0,786	0,835	0,102	0,452	0,768	3,15
N512	0,003	0,756	0,804	0,675	0,494	0,536	0,768	4,25
N513	0,000	0,638	0,607	0,665	0,282	1,000	0,768	4,16
N516	1,000	0,250	1,000	0,579	1,000	0,380	0,768	5,48
N1001	0,247	0,256	0,000	1,000	0,290	0,388	0,768	2,84
N1002	0,943	1,000	0,839	0,702	0,540	0,520	0,768	5,92
N1003	0,154	0,152	0,054	0,451	0,276	0,342	0,768	1,86
N1007	0,148	0,184	0,464	0,459	0,161	0,268	0,768	2,19
N1008	0,002	0,281	0,446	0,576	0,164	0,248	0,768	2,24
N1009	0,004	0,707	0,607	0,510	0,458	0,285	0,768	3,35
N1010	0,000	0,265	0,661	0,632	0,592	0,916	0,768	3,99
N1011	0,001	0,707	0,464	0,866	0,653	0,935	0,768	4,72
N1013	0,160	0,167	0,625	0,443	0,471	0,204	0,768	2,70
N1014	0,074	0,220	0,179	0,419	0,417	0,258	0,768	2,04
S519	0,000	0,693	1,000	0,732	0,580	0,402	0,774	4,40

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 38 – Mapa de índice de vulnerabilidade por setor censitário.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

4.5 MAPA DE ÍNDICE DE RISCO

O mapa de índice de risco é apresentado na Figura 39. Nesse mapa os níveis de risco foram caracterizados em três classes: baixo, médio e alto, seguindo os mesmos critérios adotados para o IP (Tabela 13), pois é através da onda de inundação, com determinada velocidade e profundidade, que é possível dimensionar os danos potenciais para a população e para às construções a jusante da barragem de São Bento.

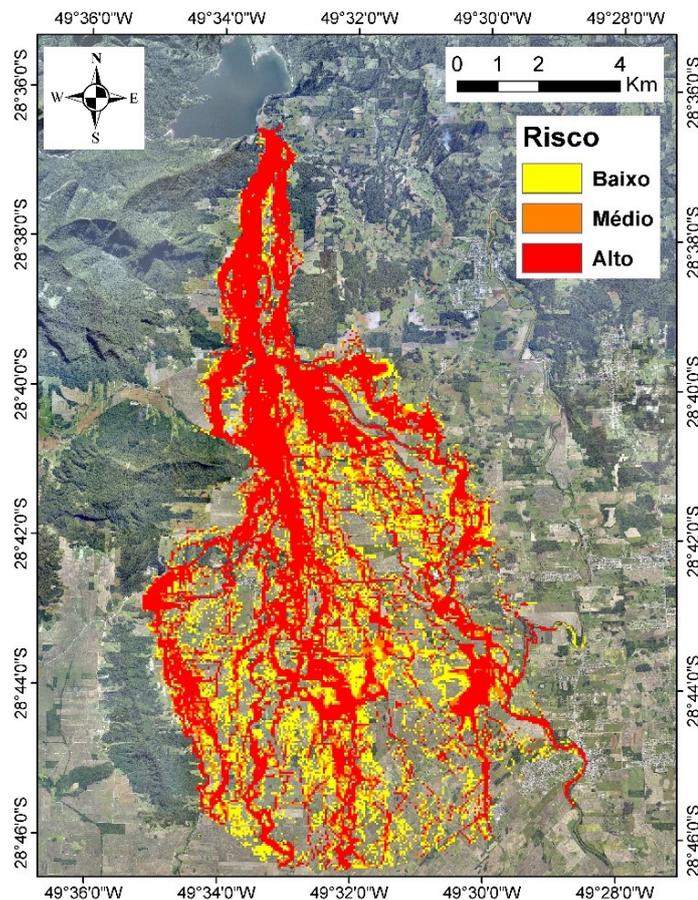
Assim, observa-se que mapa de risco ficou parecido com o mapa de perigo, porém sendo sua maior área inundada (36,53 km²) classificada como risco alto, a qual representa 56,37 % da área total (Tabela 20). Esse resultado foi devido ao fato do IV, calculado com base nas variáveis socioeconômicas, que potencializou o risco decorrente de um possível rompimento da barragem. Os 6 km após a barragem apresentaram o índice de risco alto, mesmo a região apresentando baixa densidade demográfica. Por ser uma área rural, as pessoas estão mais vulneráveis ao perigo, pois possuem idade acima de 60 anos e são de baixa renda. Observa-se

que, mesmo algumas regiões apresentando um índice de vulnerabilidade muito alto, o risco é zero, porque não apresenta perigo de ser inundada. Isso mostra que, o risco está diretamente relacionado ao perigo de inundação com o rompimento da barragem.

No mapa de risco, também observa-se que a comunidade de São Bento Alto foi totalmente atingida pela onda de inundação, sendo sua maior área (76,75%) classificada como de risco alto (Tabela 19). Por outro lado, a comunidade de São Bento Baixo, que também teve sua maior área classificada como de risco alto (61,19%), foi parcialmente atingida pela onda de cheia. Já a região central de Forquilha, apresentou um índice de risco alto apenas nas regiões próximas das margens do rio São Bento (cerca de 20 m).

Ressalta-se que, nas áreas que apresentaram risco alto e médio há muitas residências, escolas, unidades básicas de saúde, comércios, postos de combustíveis, indústrias, restaurantes, entre outras infraestruturas. Nesses locais, as pessoas não estão seguras dentro e fora das edificações, porque há probabilidade de serem destruídas devido à profundidade e velocidade média da água.

Figura 39 – Mapa de índice de risco de inundação



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Tabela 19 – Classificação das áreas de inundação das comunidades para cada grau de risco

Localidade	Área do setor (km ²)	Área Inundada (%)	Nível de Perigo (%)		
			Baixo	Médio	Alto
São Bento Alto	0,45	85,01	8,65	14,60	76,75
São Bento Baixo	1,26	27,27	21,45	17,35	61,19
Forquilha	3,23	10,36	31,33	9,29	59,38

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Tabela 20 – Classificação das áreas de inundação em km² para cada grau de risco

Nível de Risco	Área (km ²)	Área (%)
Baixo	18,68	28,83
Médio	9,59	14,80
Alto	36,53	56,37
Total	64,80	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou o índice de risco de inundação devido ao rompimento da barragem do rio São Bento, região sul catarinense, calculado em função do perigo de inundação e da vulnerabilidade da área a jusante.

O índice de perigo foi calculado pela equação proposta por Stephenson (2002), multiplicando a velocidade e a profundidade da lâmina d'água, simuladas pelo HEC-RAS 2D. A vulnerabilidade foi calculada considerando-se seis variáveis do censo demográfico de 2010 do IBGE e o setor censitário como unidade de análise.

O resultado obtido na forma de mapa de índice de risco permite inferir que nas áreas mais próximas da barragem (até 6 km de distância) o nível de risco é alto. Ainda, na área possível de ser atingida pela onda de cheia, existem residências, escolas, comércios e indústrias. Nesses locais, as pessoas não estão seguras dentro das edificações, porque têm alta possibilidade de serem destruídas devido à velocidade e profundidade da onda de cheia.

O PNSB exige para a construção de algumas barragens o PAE, mas não aborda o mapeamento de vulnerabilidade da região a jusante. Porém, o estudo demonstrou que o índice de vulnerabilidade influencia no cálculo do índice de risco de inundação, devido ao rompimento da barragem, pois considera na sua determinação fatores socioeconômicos da região afetada. Portanto, o mapeamento de índice de vulnerabilidade se mostra uma importante ferramenta para identificar os locais prioritários para a implementação de políticas públicas e ações de prevenção e mitigação em situações de emergência.

O mapeamento de risco é de extrema importância para identificar de forma espacializada a propagação da onda de cheia devido ao possível rompimento da barragem do rio São Bento, uma vez que leva em consideração a profundidade e a velocidade da água, bem como a vulnerabilidade das pessoas que moram a jusante da barragem.

Os desastres relacionados com rompimento de barragens acontecem quase todos os anos no Brasil. Assim, metodologias de baixo custo, como o mapeamento de risco podem ser adotadas como medida de prevenção. Além desse aspecto, esse mapa pode auxiliar na elaboração de um plano de ação emergencial, bem como um instrumento de educação para as comunidades e para o planejamento territorial, para futuras construções e infraestruturas urbanas.

5.2 RECOMENDAÇÕES

O presente estudo pode ser utilizado por diversos órgãos e instituições, como por exemplo, a CASAN, Defesa Civil, Prefeituras e pela comunidade, no planejamento de uso e ocupação do solo da região a jusante da barragem, bem como para a gestão de risco de inundação devido ao possível rompimento da barragem do rio São Bento.

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

Realizar um levantamento topobatimétrico mais detalhado dos canais, com objetivo de melhorar os resultados das simulações do modelo hidrodinâmico.

Avaliar as variáveis utilizadas para calcular o índice de vulnerabilidade, analisando as relações destas com o índice de risco e de perigo, para verificar quais influenciam significativamente nestes cálculos.

Nas simulações hidrodinâmicas, considerar as lavouras de arroz, que são predominantes a jusante da barragem, cheias de água, pois em alguns períodos do plantio, elas se encontram desta forma.

Avaliar o rompimento hipotético dos diques primário e secundário do reservatório da barragem do rio São Bento e avaliar o comportamento da onda de cheia, no caso destes apresentarem falha na sua estrutura.

Avaliar o tempo de resiliência das comunidades após a chegada da onda de cheia e o tempo de duração da inundação.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J.L. de M.; SPAROVEK, G. 2014. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.

AMARAL, G. L. **Análise das diferentes formulações de parâmetros definidores da formação da brecha de ruptura de uma barragem: avaliação das variações nos hidrogramas de ruptura.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Vitória da Conquista, 2019.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2019.** Brasília – DF, 2019.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **HidroWeb: Sistema de Informações Hidrológicas.** Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 21 de março de 2020.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens – Volume IV – Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE.** Brasília – DF, 2016.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens – Volume V – Diretrizes para a Elaboração de Projeto de Barragens.** Brasília – DF, 2016.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos.** Brasília – DF, 2011.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Relatório de Segurança de Barragens 2020.** Brasília – DF, 2020.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens – SNISB.** Disponível em: <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb>. Acesso em: 21 de março de 2020.

ANDRADE, M. M. N. De; ANDRADE, Á. de S.; BEZERRA, P. E. S. Índice de vulnerabilidade aos desastres naturais no estado do Pará (Brasil). *Revista Desarrollo Local Sostenible*, v. 30, p. 1–9, 2017.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil.** Brasília – DF, 2002.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **BIG - Banco de Informações de Geração.** Brasília: ANEEL, 2020. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 14 de março de 2020.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Guia do Empreendedor de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Brasília – DF, 2003.

BACK, Á. J. **Chuvas intensas e chuva para o dimensionamento de estruturas de drenagem para o Estado de Santa Catarina (com programa hidrochuSC para cálculos)**. Florianópolis: Epagri, 2013. 193p.

BACK, Á. J. **Informações climáticas e hidrológicas dos municípios catarinenses (com programa HidroClimaSC)**. Florianópolis: Epagri, 2020. 157p.

BACK, Á. J.; POLETO, C. Distribuição espacial e temporal da erosividade das chuvas no estado de Santa Catarina, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p.381-403, 2018.

BACK, Á.J.; WILDNER, L.P.; PEREIRA, J.R. Chuvas intensas para projetos de conservação do solo e da água no estado de Santa Catarina. **Agropecuária Catarinense**, v.34, n.2, p.65-72, 2021.

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), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

BRASIL. **Decreto Nº 7.257, de 4 de agosto de 2010**. Regulamenta a Medida Provisória nº 494 de 2 de julho de 2010, para dispor sobre o Sistema Nacional de Defesa Civil. Brasília, DF, 2010.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. Brasília, DF, 2010.

BRASIL. **Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012**. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil. Brasília, DF, 2012.

BRASIL. Secretaria de Infraestrutura Hídrica. Ministério da Integração Nacional. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Brasília: Cartaz, 2002. 148 p.

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 de rio de Pedras – MG**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

BRITO, T. R. R. L. **Modelagem hidrológica e hidráulica a partir de dados TRMM aplicada a análise de risco em áreas inundáveis: estudo de caso do município de Atalaia**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.

BRUNNER, G. W. PIPER, S. S. JENSEN, M. R. CHACON, B. Combined 1D and 2D hydraulic modeling within HEC-RAS. **World Environmental and Water Resources Congress**. 2015.

CASAN - COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO. **Dados Hidrometeorológicos** - Complexo São Bento/Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina – CIRAM, 2006.

CASAN - COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO. **Manual de operação do reservatório: barragem do rio São Bento**. 2003.

CASAN - COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO. **Programa de gerenciamento de risco da barragem São Bento**. 2004.

CBDB - COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **A História das Barragens no Brasil - Séculos XIX, XX e XXI - 50 Anos do Comitê Brasileiro de Barragens**. Comitê Brasileiro de Barragens, Rio de Janeiro, 2011.

CHAUHAN, S. S.; BOWLES, D. S.; ANDERSON, L. R. Do current breach parameter estimation techniques provide reasonable estimates for use in breach modeling. **Proceedings of the annual conference of the association of state dam safety officials**. Phoenix, EUA. 2004.

CHOW, V. T. **Open-channel hydraulics**. New York, McGraw-Hill, 1959. 680 p.

CNRH - CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Resolução nº 143 de 10 de julho de 2012**. Publicada no Diário Oficial da União em 04/09/2012.

COLFERAI, M. N. **Análise da influência da topobatimetria de jusante em estudo de rompimento de barragem**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

COSTA, P. R. **Processos hidrológicos aplicados ao controle hidráulico-operacional de reservatórios de acumulação de água: o caso da barragem do rio São Bento – SC**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2008.

COSTA E SILVA, D. C. **Segurança de pequenas barragens: estudo comparativo com as principais políticas internacionais para aprimoramento da aplicação da política nacional de segurança de barragens**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia), Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2021.

DA FONSECA NETO, G. C.; RODRIGUES, A. B.; GOMES, M. M. A.; DA SILVA JÚNIOR, M. A. B.; CABRAL, J. J. S. P. Análise de risco em virtude de rompimento hipotético de barragem no semiárido de Pernambuco. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, p. 1–8, 2017.

DANTAS, M. E.; GOULART, D. R.; JACQUES, P.D.; ALMEIDA, I. S.; KREBS, A. S. J. Geomorfologia aplicada à gestão integrada de bacias de drenagem: bacia do rio Araranguá (SC), zona carbonífera sul-catarinense. **In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005**, João Pessoa, PB., Anais... João Pessoa, PB: ABRH, 2005. 74p. CD Rom.

DEBORTOLI, N. S.; CAMARINHA, P. I. M.; MARENGO, J. A.; RODRIGUES, R. R. An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. **Natural Hazards**, v. 86, n. 2, p. 557–582, 2017.

DELLA, J. P. **Simulações hidrológicas para apoio a gestão de operação da barragem do Rio São Bento**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2014.

ELETROBRAS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Diretoria de Engenharia. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – Eletrobras – Ministério de Minas e Energia, 2003.

ELETROBRAS. **Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Diretoria de Engenharia. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – Eletrobras – Ministério de Minas e Energia, 2000.

ELETROBRAS. **Potencial Hidrelétrico Brasileiro**. Diretoria de Engenharia. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – Eletrobras – Ministério de Minas e Energia, 2018. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Potencial-Hidreletrico-Brasileiro.aspx>. Acesso em: 25 de abril de 2020.

ESRI. **Classifying Numerical Fields for Graduated Symbology**. Disponível em: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/map/working-with-layers/classifying-numerical-fields-for-graduated-symbols.htm>. Acesso em: 26 de abril de 2021.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2019**. Rio de Janeiro, 2019.

FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; PAIVA, R. C. D. Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 4, p.137-147, 2014.

FERLA, R. **Metodologia simplificada para análise de aspectos hidráulicos em rompimento de barragens**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

FERREIRA, A. L. M.; ANDRZEJEWSKI, E. A. Comparação de métodos de cálculo da ruptura de uma barragem hipotética. **Comitê Brasileiro de Barragens - XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens**, Foz do Iguaçu, v. 30, n. 1, p.1-12, 2015.

GOERL, R.F.; KOBIYAMA, M. Considerações sobre as Inundações no Brasil. **XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2005.

GOERL, R.F.; KOBIYAMA, M.; PELLEIN, J.R.G.M. Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundações: Estudo de caso do município de Rio Negrinho - SC. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 30, n.1, p. 81-100, 2012.

GOMES, J.; VEIGA, B. V.; ROMERO, A.; GUERRA, A. A. Investigação da influência dos parâmetros definidores da formação da brecha de ruptura de uma barragem sobre o

hidrograma de cheia a jusante. **XXX - Seminário Nacional de Grandes Barragens**. Foz do Iguaçu, 2015.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malhas digitais - Censo 2010 - Unidades censitárias**. Disponível em: http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm. Acesso em: 12 de março de 2021.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Uso da Terra**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências, 2013. 171 p. (Manuais Técnicos em Geociências).

ICOLD - INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Dams & the World's Water – An educational book that explains how dams help to manage the world's water**. International Commission on Large Dams, Paris, 2007.

JUNG, C. G.; KIM, S. J. Comparison of the Damaged Area Caused by an Agricultural Dam-Break Flood Wave Using HEC-RAS and UAV Surveying. **Agricultural Sciences**, v. 8, p.1089-1104, 2017.

KOHLER, A.; JÜLICH, S.; BLOEMERTZ, L. **Risk Analysis – a basis for disaster risk management**. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Eschborn, 2004. 76p.

KREBS, A. S. J. **Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do rio Araranguá, SC**. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

KUHLKAMP, J. F. **Análise do efeito em cascata da propagação da onda de cheia gerada pelo rompimento hipotético de uma das barragens existentes no rio Irani-SC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

LAURIANO, A. W. **Estudo de ruptura da barragem de funil: comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

LEOUL, A.; KASSAHUN, N. Dam Breach Analysis Using HEC-RAS and HEC-GeoRAS: The Case of Kesem Kebena Dam. **Open Journal of Modern Hydrology**, v. 9, p.113-142, 2019.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomass - Coleção 5 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**. Disponível em: <http://mapbiomas.org>. Acesso em: 21 de fevereiro de 2021.

MARANGONI, T. T.; SANTINI JUNIOR, M. A.; OLIVEIRA, J. N. A utilização do HEC-RAS para determinar a cota de inundação na ruptura hipotética de uma barragem - estudo de caso da PCH Salto Buriti. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Florianópolis, 2017.

MARCELINO, E. V.; NUNES, L. H.; KOBİYAMA, M. Mapeamento de risco de desastres naturais do estado de Santa Catarina. **Caminhos da Geografia (UFU)**, Uberlândia, v. 7, n. 17, p. 72-84, 2006.

MASCARENHAS, F. C. B. **Modelação Matemática de Ondas Provocadas por Ruptura de Barragens**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

MERWADE, V.; OLIVERA, F.; ARABI, M.; EDLEMAN, S. Uncertainty in Flood Inundation Mapping: Current Issues and Future Directions. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 13, n. 7, p. 608-620, 2008.

MING, L. **Sistema computacional para previsão de inundações: aplicação à bacia hidrográfica do rio São Bento - SC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MONTE, B. E. O.; GOLDENFUM, J. A.; MICHEL, G. P.; CAVALCANTI, J. R. A. Terminology of natural hazards and disasters: A review and the case of Brazil. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 52, 2021.

MONTE, B. E. O.; TSCHEDDEL, A. DA F.; GOLDENFUM, J. A. Índice de risco aplicado a potencial rompimento de barragem por simulações 1d e 2d. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Florianópolis, 2017.

MONTEIRO, L. R.; KOBİYAMA, M. Influências da distribuição temporal de precipitação no mapeamento de inundação. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 11, n. 2, p. 25-35, 2014.

MONTEIRO, L. R.; SANTOS, C. I.; KOBİYAMA, M.; CORSEUIL, C. W.; CHAFFE, P. L. B. Effects of return periods on flood hazard mapping: an analysis of the UFSC Campus Basin, Florianópolis city, Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 26, n. 9, p. 1-13, 2021.

MOREIRA, L. L.; KOBİYAMA, M. Panorama de estudos sobre índice de vulnerabilidade às inundações no Brasil através de revisão bibliográfica. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 22, n. 79, p. 309-320, 2021.

MOTA, K. R. R. **Rompimento hipotético e delimitação da área de inundação da barragem Salto Moraes em Ituiutaba/MG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

NETO, A. R.; FERREIRA, L.; BATISTA, D. R.; COUTINHO, R. Q. Metodologias para Geração de Mapa de Indicadores de Perigo e Áreas Inundáveis: Município de Ipojuca/PE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 2, p. 377-390, 2016.

ORO, S. R.; CHAVES NETO, A.; NEUMANN JÚNIOR, C. Monitoramento conjunto dos deslocamentos das estruturas dos blocos de uma barragem de concreto. **Cadernos do IME - Série Estatística**, p. 1-18, 2017.

PANDOLFO, C.; BRAGA, H.J.; SILVA JÚNIOR, V.P.; MASSIGNAN, A.M.; PEREIRA, E.S.; THOMÉ, V.M.R.; VALCI, F.V. **Atlas climatológico do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: Epagri, 2002. CD-ROM. Disponível em: <http://ciram.epagri.sc.gov.br>. Acesso em: 21 de março de 2020.

PEREIRA, C. E.; VISEU, M. T.; MELO, J. F.; MARTINS, T.; SALLA, M. R.; MOTA, K. R. R. Comparação entre modelos simplificados e o modelo HEC-RAS no estudo de áreas de inundação para o caso de Minas Gerais, Brasil. **Revista Recursos Hídricos**, v. 38, n. 1, p.75-90, 2017.

PREVENE. **Contribution to “Natural” Disaster Prevention in Venezuela**. Cooperation: Venezuela – Switzerland – PNUD. 2001.

RAMOS, C. S.; SANCHEZ, M. C. Estudo metodológico de classificação de dados para cartografia temática. **Geografia**, v. 25, n. 2, p. 23-52, 2000.

REIS, J. T.; DA SILVA, J. S.; MICHEL, G. G.; KOBIYAMA, M. Mapeamento da vulnerabilidade a desastres hidrológicos nos municípios de Alto Feliz e São Vendelino/RS como forma de contribuição à engenharia de sedimentos. **XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**, 2014.

REZENDE, E.; SILVA, V. V. C. De Mariana a Brumadinho: a efetividade da responsabilidade civil ambiental para a adoção das medidas de evacuação. **Revista do Direito**, v. 1, n. 57, p.160-181, 2019.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Planejamento. Diretoria de Estatística e Cartografia. **Atlas geográfico de Santa Catarina: diversidade da natureza – Fascículo 2**. 2ª ed. Florianópolis: Editora da UDESC, 2016.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1- Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p.1-14, 2015.

SCARPATO, P. M. **Caracterização ambiental da bacia hidrográfica do rio são bento com base nos conceitos da ecologia de paisagem**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2008.

SCHWALM, H. **Geoprocessamento aplicado à análise ambiental: estudo de caso da barragem do rio São Bento, Siderópolis, Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2008.

SDE – SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SUSTENTÁVEL. **Aerofotogrametria 2010**. Disponível em: <http://sigsc.sc.gov.br/download/index.jsp>. Acesso em: 12 de maio de 2020.

SMITH, G., DAVEY, E., COX, R. (2014). **Flood hazard** (WRL Technical Report 2014/07). Sydney: UNSW.

SOUZA, V. R.; GAVENAGHI, S.; ALVES, J. E. D. Mapeamento dos óbitos por local de ocorrência dos acidentes de trânsito na cidade do Rio de Janeiro. **Anais do XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais**. Caxambu: ABEP, 2006.

STEPHENSON, D. Integrated flood plain management strategy for the Vaal. **Urban Water** v. 4, p.425-430, 2002.

TOLMASQUIM, M. T. (Coord.). **Energia renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

TSCHIEDEL, A. F. **Avaliação de fontes de incerteza em estudos de rompimentos de barragens**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

TSCHIEDEL, A. F.; MONTE, B. E. O; PAIVA, R. C. D. Rompimento da barragem Lomba do Sabão: diferentes abordagens dimensionais. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Florianópolis, 2017.

UNDP - United Nations Development Programme. **Reducing Disaster Risk: a Challenge for Development**. New York, 2004.

UNISDR. **Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction**. United Nations General Assembly. Genebra. Disponível em: https://www.preventionweb.net/files/50683_oiewgreportenglish.pdf. Acesso em: 24 de junho de 2021.

USACE - UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS River Analysis System, User's Manual**. Hydrologic Engineering Center, Version 5.0, Davis, 2016.

USACE - UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Using HEC-RAS for Dam Break Studies**. Hydrologic Engineering Center, Davis, 2014.

VEIZAGA, F. M.; DE PAES, R. P.; ELEUTÉRIO, J. F.; ROCHA, F.; PALMIER, L. R. Modelagem hidráulica de inundação e estimativa de danos diretos causados por rompimento real da barragem São Francisco, Mirai, Minas Gerais. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, p. 1-8, 2017.

VERÓL, A. P. **Simulação da propagação de onda decorrente de ruptura de barragem, considerando a planície de inundação associada a partir da utilização de um modelo pseudo-bidimensional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

VERÓL, A. P.; MIGUEZ, M. G.; MASCARENHAS, F. C. B. Propagação da onda de ruptura de barragem através de um modelo Quasi-2D. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 1, p.165-176, 2013.

VISCHER, D. L.; HAGER, W. H. **Dam Hydraulics**. Zürich: John Wiley E Sons Ltd, 1997. 316 p.

VISEU, T.; ALMEIDA, A. B. Gestão do Risco nos Vales a Jusante de Barragens. **Territorium**, Coimbra, n. 18, p.33-42, 2011.

WISNER, B.; BLAIKIE, P.; CANNON, T.; DAVIS, I. **At Risk Natural hazards, people's vulnerability and disasters**. Second ed. London, 2004.

WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Integrated flood management tools series: the role of land-use planning in flood management**. Genebra, Suíça. 2016.

XIONG, Y. A Dam Break Analysis Using HEC-RAS. **Journal of Water Resource and Protection**, p. 370–379, 2011.