



UFRR



UNIVERSIDADE FEDERAL DE RORAIMA  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS -  
PROFÁGUA

BYATRIZ CORDEIRO LÉDO

**ANÁLISE DO ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DA BARRAGEM DA CAER NO  
MUNICÍPIO DE ALTO ALEGRE/RR**

BOA VISTA, RR

2024

BYATRIZ CORDEIRO LÉDO

**ANÁLISE DO ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DA BARRAGEM DA CAER NO  
MUNICÍPIO DE ALTO ALEGRE/RR**

Projeto de pesquisa apresentado ao Programa de Pós-graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (Prof.Água) pela Universidade Federal de Roraima, como requisito parcial para obtenção do título de mestre profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, na área de concentração: Regulação e Governança de Recursos Hídricos. Salgado Vital.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Frutuoso da Silva  
Coorientador: Prof. Dr. Silvestre Lopes da Nobrega

BOA VISTA, RR

2024

Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)  
Biblioteca Central da Universidade Federal de Roraima

L474a Lédo, Byatriz Cordeiro.

Análise do rompimento hipotético da barragem da Caer no município de Alto Alegre/RR / Byatriz Cordeiro Lédo. – Boa Vista, 2024.  
58 f. : il. Inclui Apêndices.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Frutuoso da Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Silvestre Lopes da Nobrega.

Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Roraima. Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Águas - PROFÁGUA.

1. Rompimento de barragem. 2. Mapa de inundação. 3. HEC-RAS.  
I. Título. II. Silva, Adriano Frutuoso da (orientador). III. Nobrega, Silvestre Lopes da (coorientador).

CDU (2. ed.) 627.82(811.4)

Ficha Catalográfica elaborada pela Bibliotecária/Documentalista (UFRR):  
Maria de Fátima Andrade Costa - CRB-11/453-AM

BYATRIZ CORDEIRO LÉDO

**ANÁLISE DO ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DA BARRAGEM DA CAER NO  
MUNICÍPIO DE ALTO ALEGRE/RR**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – ProfÁgua, da Universidade Federal de Roraima, como requisito à obtenção de grau de Mestra em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, na área de concentração de Regulação e Governança de Recursos Hídricos.

Data de Aprovação: 20 / 10 / 2024  
Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

**ADRIANO FRUTUOSO DA SILVA**  
Data: 10/12/2024 16:23:53-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Adriano Frutuoso da Silva

Orientador/Programa de Pós-graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos da UFRR

SILVESTRE LOPES DA  
NOBREGA:0249232049  
9

Assinado de forma digital por  
SILVESTRE LOPES DA  
NOBREGA:02492320499  
Dados: 2024.12.17 11:36:45 -04'00'

---

Prof. Dr. Silvestre Lopes da Nóbrega

Coorientador/Programa de Pós-graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos da UFRR



Documento assinado digitalmente

**PEDRO ALVES DA SILVA FILHO**  
Data: 12/12/2024 20:26:31-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Pedro Alves da Silva Filho

Programa de Pós-graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos da UFRR



Documento assinado digitalmente

**DEBORA DIAS COSTA MOREIRA**  
Data: 10/12/2024 16:31:24-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Profª. Dra. Débora Dias Costa Moreira

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da UFPA

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas bênçãos e por me guiar em todos os momentos da minha vida, me dando saúde e força.

A minha família, em especial minha mãe e minha irmã, pelo apoio e carinho sem medidas.

À Universidade Federal de Roraima e ao Programa de Pós-graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), pela oportunidade da qualificação profissional.

Agradeço ao meu orientador Dr. Adriano Frutuoso da Silva e ao coorientador Dr. Silvestre Lopes da Nobrega, pelos ensinamentos e orientação desta pesquisa.

Aos professores do ProfÁgua, em nome do professor Dr. Pedro Alves da Silva Filho, que me incentivou a continuar os estudos.

Aos meus superiores na Secretaria Municipal de Obras, na figura da Engenheira Civil Deusiana Gouveia, do Engenheiro Civil Gino Falcão e da Noélia Alves, pela compreensão para que eu pudesse concluir esta caminhada.

Aos meus amigos, em especial o Igor Viana, a Larissa, a Letícia, a Blenda e o Lucas, que me incentivaram e apoiaram durante os estudos.

À turma do ProfÁgua/UFRR 2022, com quem compartilhei bons momentos durante os estudos, viagens e visitas de campo.

Muito obrigada!

## RESUMO

Este estudo tem como objetivo simular o rompimento hipotético da barragem de um reservatório de água localizado no município de Alto Alegre-RR, por meio do "piping", e avaliar, através de um mapa de inundação, os impactos nas áreas próximas ao canal a jusante da barragem. Como objetivos específicos, busca-se inspecionar a estrutura da barragem, analisar a dissipação da onda de cheia gerada pelo rompimento da estrutura utilizando um modelo hidrológico e fornecer subsídios para a gestão e regulação dos recursos hídricos por meio dos mapas gerados. A barragem está cadastrada no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) com o código 5291, sendo a Companhia de Águas e Esgoto de Roraima (CAER) sua proprietária. A escolha da barragem SNISB 5291 para o estudo se deve à ausência de análises periódicas tanto pelo empreendedor quanto pelo órgão fiscalizador estadual, à sua proximidade com a zona urbana e à presença de infraestrutura rodoviária em sua crista, o que representa um risco significativo para a perda de vidas humanas e para as atividades sociais e econômicas do município. O estudo da bacia hidrográfica a montante da barragem permitiu a determinação do hidrograma de vazão afluente e o cálculo da precipitação média anual da região. Com o uso do RAS Mapper, ferramenta do software HEC-RAS, foram definidos o canal principal e a estrutura da barragem para simular o rompimento em regime não permanente. Foram criadas 132 seções transversais ao longo do canal principal, espaçadas a cada 30 metros. A metodologia de MacDonald & Langridge-Monopolis (1984) foi aplicada para determinar os parâmetros de ruptura da brecha, resultando em um tempo de formação de 0,21 horas. A simulação no HEC-RAS revelou que a mancha de inundação a jusante se estende por áreas agrícolas e que uma parte significativa da água não escoou superficialmente, apresentando uma uniformidade na velocidade média ao longo do canal. O mapa de inundação elaborado mostrou que o rompimento da barragem teria impactos substanciais nas atividades socioeconômicas da população residente no município de Alto Alegre-RR.

Palavras chave: Rompimento de barragem, mapa de inundação, HEC-RAS.

## **ABSTRACT**

This study aims to simulate the hypothetical rupture of the dam of a water reservoir located in the municipality of Alto Alegre-RR, through 'piping,' and evaluate, using an inundation map, the impacts on areas near the downstream channel of the dam. The specific objectives are to inspect the dam structure, analyze the dissipation of the flood wave generated by the rupture using a hydrological model, and provide support for the management and regulation of water resources through the generated maps. The dam is registered in the National System of Information on Dam Safety (SNISB) under code 5291, with the Companhia de Águas e Esgoto de Roraima (CAER) as its owner. The selection of the SNISB 5291 dam for the study is due to the lack of periodic analyses by both the operator and the state regulatory agency, its proximity to the urban area, and the presence of road infrastructure on its crest, which represents a significant risk to human life and to the social and economic activities of the municipality. The study of the watershed upstream of the dam allowed for the determination of the inflow hydrograph and the calculation of the region's average annual precipitation. Using RAS Mapper, a tool from the HEC-RAS software, the main channel and the dam structure were defined to simulate the rupture in a non-permanent regime. 132 cross-sections were created along the main channel, spaced 30 meters apart. The methodology of MacDonald & Langridge-Monopolis (1984) was applied to determine the breach failure parameters, resulting in a formation time of 0.21 hours. The simulation in HEC-RAS revealed that the inundation area downstream extends into agricultural areas and that a significant portion of the water does not flow superficially, showing uniformity in the average velocity along the channel. The resulting inundation map showed that the dam rupture would have substantial impacts on the socio-economic activities of the population living in Alto Alegre-RR.

**Keywords:** Dam rupture, flood map, HEC-RAS.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relações matemáticas para determinação da vazão de pico em barragens de terra	23
Tabela 2 - Equações empíricas para determinação do tempo de formação da brecha, em horas .....	24
Tabela 3 - Equações empíricas para determinação da largura média da brecha, em metros....	25
Tabela 4 - Caracterização da estrutura .....	36
Tabela 5 - Cadastro técnico do barramento no SNISB.....	39

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de uma barragem de terra .....	16
Figura 2 - Seção transversal de uma barragem de terra homogênea .....	16
Figura 3 - Estágios do “piping”: (a) erosão interna; (b) continuação; (c) progressão; (d) brecha temporária; (e) brecha final .....	18
Figura 4 - Hidrograma com decaimento parabólico .....	23
Figura 5 - Fluxograma da pesquisa.....	26
Figura 6 - Localização da barragem CAER SNISB 5291 e delimitação da sub-bacia.....	27
Figura 7 - Estações hidrometeorológicas na bacia hidrográfica do rio Mucajaí .....	28
Figura 8 - Precipitações médias registradas na estação Fé e Esperança (2002-2021).....	29
Figura 9 - Imagens de satélite Landsat 5: (a) 31/12/1989; (b) 17/02/1990; (c) 13/09/1990; (d) 18/12/1990.....	30
Figura 10 - Barragem CAER SNISB 5291: estado do vertedouro antes da reforma .....	31
Figura 11 - Vertedouro reformado.....	31
Figura 12 – RAS Mapper: digitalização do MDE da região da sub-bacia (elevação em metros) .....	34
Figura 13 - Seções transversais (verde), barragem (rosa), margens (vermelho), canal principal (azul).....	35
Figura 14 - Parâmetros da barragem e da brecha de ruptura .....	36
Figura 15 - Unsteady Flow Data: condições de contorno .....	37
Figura 16 - Hidrograma sintético afluente ao reservatório.....	38
Figura 17 - Talude de montante da barragem.....	40
Figura 18 - Ravinamento no talude de montante.....	41
Figura 19 - Vertedouro em período de cheia.....	42
Figura 20 - Residência localizada próxima ao vertedouro .....	42
Figura 21 - Crista da barragem.....	43
Figura 22 - Canal de saída para o vertedouro da barragem no período de seca .....	44
Figura 23 - Reservatório no período de seca e cheia.....	44
Figura 24 - Profundidades atingidas no momento da ruptura, em metros.....	45
Figura 25 - Profundidades atingidas 24 horas após a ruptura, em metros.....	46
Figura 26 - Duração da cheia em que a lâmina d'água está acima de 30 cm do nível normal, em horas .....	47
Figura 27 - Velocidade do escoamento no momento da ruptura, em metros por segundo .....	48

Figura 28 - Mapa rodoviário do município de Alto Alegre.....	49
--	----

## SUMÁRIO

1.1	OBJETIVOS .....	13
1.1.1	Objetivo geral .....	13
1.1.2	Objetivos específicos.....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	15
2.1	BARRAGENS: ASPECTOS GERAIS.....	15
2.1.1	Formas de ruptura em barragens de terra .....	16
2.1.2	Política Nacional de Segurança de Barragens .....	18
2.2	SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE CHEIA .....	20
2.2.1	Modelagem de ruptura de barragens utilizando o HEC-RAS .....	21
2.2.2	Vazão de pico .....	22
2.2.3	Formação da brecha de ruptura .....	24
3	METODOLOGIA .....	26
3.1	COLETA DE DADOS E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	26
3.1.1	Área de estudo .....	27
3.2	MODELAGEM DA FORMAÇÃO DA BRECHA DE RUPTURA .....	32
3.2.1	Modo de ruptura e formação da brecha.....	32
3.3	MODELAGEM NUMÉRICA DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE CHEIA.....	33
3.3.1	Preparação do relevo.....	33
3.3.2	Geometria do modelo .....	34
3.3.2.1	Traçado do curso d'água e das seções transversais.....	35
3.3.2.2	Estrutura da barragem .....	36
3.3.3	Simulação no regime não permanente.....	37
3.3.3.1	Coefficientes de rugosidade .....	37
3.3.3.2	Condições de contorno iniciais .....	38
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	39
4.1	INSPEÇÃO DA BARRAGEM .....	39
4.2	MAPAS DE INUNDAÇÃO .....	45
5	CONCLUSÕES .....	50
	REFERÊNCIAS .....	52
	APÊNDICE A – MAPAS .....	56
	MAPA 1 – PROFUNDIDADE NO MOMENTO DA RUPTURA.....	57
	MAPA 2 – PROFUNDIDADE APÓS 24 HORAS DA RUPTURA .....	58
	MAPA 3 – DURAÇÃO DA CHEIA.....	59
	MAPA 4 – VELOCIDADE NO MOMENTO DA RUPTURA.....	60

## INTRODUÇÃO

Em 2010, foi instituída a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) por meio da Lei nº 12.334/2010 (alterada pela Lei nº 14.066/2020) (BRASIL, 2010, 2020). Entre os seus instrumentos, está o Plano de Segurança de Barragens (PSB), que tem o objetivo de definir e garantir que os padrões de segurança sejam seguidos.

Com a alteração da Lei, em 2020, tornou-se obrigatória no PSB a apresentação de estudos de identificação e avaliação de riscos pela definição de hipóteses e de cenários possíveis de acidente ou desastre, com a apresentação do mapa de inundação do pior cenário identificado.

Um dos instrumentos da PNSB é a elaboração anual do Relatório de Segurança de Barragens (RSB), coordenado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), que tem como objetivo apresentar à sociedade um panorama da evolução da segurança das barragens nacionais, da implementação da PNSB e apontar algumas diretrizes para a atuação de fiscais, empreendedores e órgãos de proteção, além de destacar os principais acontecimentos do ano sobre o tema (ANA, 2023).

No Relatório de Segurança de Barragens de 2021 (ANA, 2022), a Fundação Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (FEMARH), órgão ambiental de Roraima, manifesta a preocupação com a barragem SNISB 5291, devido ao risco de colapso da estrutura do vertedouro e à sua localização próxima ao perímetro urbano do município de Alto Alegre.

Segundo dados disponíveis no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), atualizado em 12/09/2019, a barragem SNISB 5291 tem como proprietário a Companhia de Água e Esgoto de Roraima – CAER e possui as seguintes características: altura da barragem igual a nove metros, Dano Potencial Associado (DPA) alto, risco alto e completude mínima de informações, ou seja, sem dados completos sobre o seu estado, servindo para o uso de regularização de vazão e abastecimento humano (SNISB, 2024).

Ainda segundo o Sistema, das sete barragens localizadas no município de Alto Alegre, apenas uma apresenta alto DPA: a SNISB 5291. Contudo, embora seja obrigatório, a barragem não possui plano de segurança nem revisão periódica, o que dificulta o conhecimento atualizado sobre o seu estado de conservação.

No estudo de segurança de barragens, considera-se que toda barragem representa um potencial risco de ruptura ou outro acidente grave, e caso aconteça, os efeitos ocasionados à jusante devem ser reduzidos no âmbito humano, ambiental e econômico-financeiro.

Dada a escassez de análises e revisões periódicas pela FEMARH sobre as condições reais da barragem, sua proximidade à zona urbana e a presença de infraestrutura rodoviária em

sua crista, o estudo da área afetada pela possível ruptura do barramento se torna essencial. Ele auxilia na regulamentação de ações detalhadas para situações de emergência, na identificação de locais para a instalação de equipamentos de monitoramento e no conhecimento sobre os efeitos provocados no meio hídrico.

Assim, de modo a auxiliar nas discussões e propostas do uso e ocupação do solo, bem como na gestão dos recursos hídricos, esta pesquisa visa realizar a inspeção das condições físicas da barragem CAER SNISB 5291 e realizar a classificação quanto ao DPA da estrutura, além da quantificação de riscos e análise da mancha de inundação causada pela simulação da ruptura do barramento com uso do *software* HEC-RAS 6.3.1, de fornecimento gratuito pelos desenvolvedores do *United States Army Corp of Engineers* (USACE).

O produto será fornecido por meio de mapas que detalham o comportamento da mancha de inundação formada após a ruptura, incluindo informações sobre a altura máxima da onda de cheia, a velocidade de escoamento e o tempo de chegada. Essas informações estão conectadas ao 11º Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecido pela Organização das Nações Unidas (2022), que busca tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis. Além disso, o ODS visa reduzir o número de mortes e pessoas afetadas por catástrofes, bem como diminuir as perdas econômicas diretas causadas por elas.

## 1.1 OBJETIVOS

Para responder a proposta do estudo foram listados os seguintes objetivos:

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a mancha de inundação provocada pela ruptura hipotética da barragem da CAER, localizada no município de Alto Alegre, no estado de Roraima.

### 1.1.2 Objetivos específicos

1. Realizar a inspeção na barragem da Companhia de Águas e Esgoto de Roraima;
2. Analisar a atenuação da onda de cheia ao longo de sua propagação no modelo hidrológico;

3. Fornecer subsídios através de mapas de inundação para a elaboração do Plano de Ação Emergencial (PAE) e para o controle na gestão e regulação dos recursos hídricos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção tem como objetivo abordar os conceitos sobre barragens de terra, destacando as formas mais comuns de rompimento, os casos históricos e a legislação nacional vigente relacionada ao assunto. Por fim, traz-se os modelos de simulação para propagação da onda de cheia, os dados de entrada para rompimento de barragens e os principais parâmetros para o zoneamento de riscos hidrodinâmicos.

### 2.1 BARRAGENS: ASPECTOS GERAIS

Barragens são estruturas que foram desenvolvidas com a finalidade de reter água para o abastecimento de cidades, atender a escassez do recurso natural e conter cheias, tornando-se essenciais para a infraestrutura de um país. Entre seus principais usos na atualidade, destacam-se ainda: geração de energia elétrica, turismo, irrigação, controle de assoreamentos e de erosões provocadas pela chuva, acumulação de sedimentos, disposição de resíduos industriais e de rejeitos de mineração.

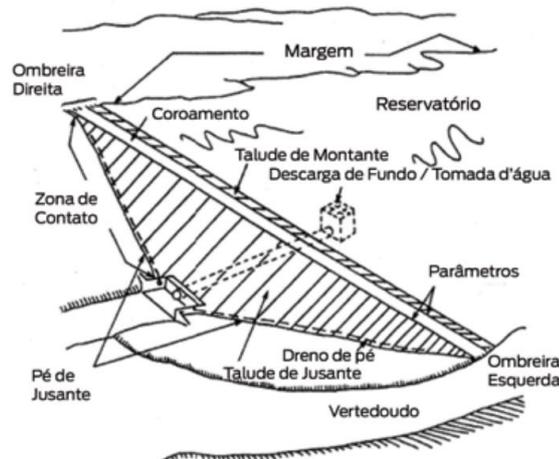
Os fatores que influenciam na escolha do tipo de barragem são a finalidade, os aspectos geológicos e geotécnicos, as condições topográficas do relevo, o custo do investimento, o tempo de construção e os aspectos ambientais da região, sendo necessário, portanto, a previsão de riscos aos quais a barragem estará sujeita.

A classificação principal da estrutura se refere ao tipo de material utilizado para a construção do barramento. Costa (2012) classifica os tipos de barragens em dois grandes grupos: convencionais, comumente utilizadas e de amplo conhecimento pelos especialistas; e não convencionais, com tecnologias mais atuais e pouco utilizadas. Dentre as convencionais temos as barragens de terra, de enrocamento, de concreto e as mistas, já as não convencionais são as de gabião, de madeira e de alvenaria de pedra.

Em Roraima, das 115 (cento e quinze) barragens cadastradas no SNISB, apenas as barragens da Pequena Central Hidrelétrica Alto Jatapu, localizada no município de Caroebe, ao sul do estado, são de concreto convencional, as demais são cadastradas como barragens de terra ou não possuem dados sobre a sua estrutura (SNISB, 2024).

Uma barragem de terra é normalmente composta pelas estruturas de retenção, de fundação e as ombreiras, a zona vizinha a jusante, estruturas extravasoras (vertedouros), as de adução e o reservatório (Figura 1).

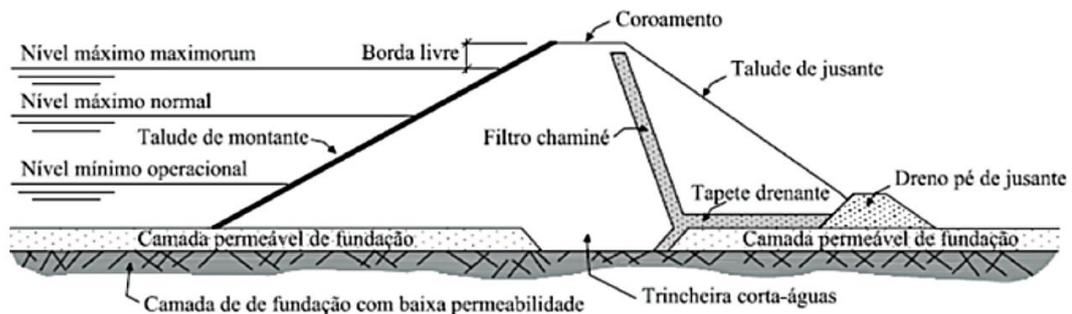
Figura 1 - Esquema de uma barragem de terra



Fonte: ANA (2016c).

A seção transversal mais comum é a trapezoidal, com lado maior servindo de fundação, as laterais inclinadas são denominadas de taludes ou paramentos, e o lado menor de crista ou coroamento (ANA, 2016c), conforme esquematizado na Figura 2.

Figura 2 - Seção transversal de uma barragem de terra homogênea



Fonte: ANA (2016c).

Observamos ainda na Figura 2 outras informações importantes para o funcionamento e segurança da estrutura, como os filtros, drenos e camadas permeáveis, que garantem o controle da percolação no interior da barragem e na fundação, diminuindo o risco de erosão interna e saturação do solo. O conhecimento sobre os níveis de água do reservatório garante ainda o correto dimensionamento do vertedouro para o controle do volume em períodos de cheia.

### 2.1.1 Formas de ruptura em barragens de terra

De acordo com o art. 2º da Lei 12.334, de 2010, os acidentes são caracterizados pelo comprometimento da integridade da estrutura com a liberação descontrolada do volume

represado, resultando no colapso total ou parcial da barragem ou de estrutura anexa. Já os incidentes são referentes a qualquer ocorrência que influencie no funcionamento da barragem que, se não sanada, pode causar um acidente.

No RSB 2021, foram reportados 13 acidentes e 37 incidentes em 16 estados, sendo a maioria pela ocorrência de galgamento de barragens devido às chuvas intensas, com destaque aos eventos de galgamento ocorridos em efeito cascata em 6 barragens no município de Curral de Dentro (MG). No relatório de 2022, houve o aumento dos casos com 24 acidentes e 58 incidentes, sendo ainda o galgamento o principal modo de falha.

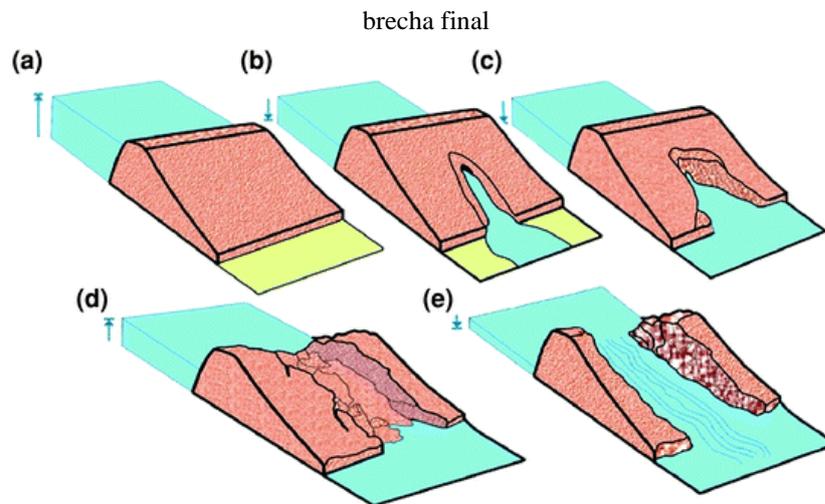
A *International Commission on Large Dams – ICOLD (2024)*, apresenta que as causas mais frequentes de falhas em barragens incluem: o galgamento, que tem como consequência a excedência da vazão do reservatório e o transbordamento de água por cima da crista da barragem; defeitos na fundação, incluindo recalque e instabilidade do talude; e o *piping*, que é a erosão interna causada por infiltração.

O Volume VIII – Guia Prático de Pequenas Barragens do Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens (ANA, 2016c), apresenta o galgamento como resultado da insuficiência da borda livre da barragem, obstruções dos vertedouros e consequência da erosão interna da estrutura. Em seus Estudos de Ruptura de Barragens, a ANA (2012) alerta que a ruptura por galgamento pode ocorrer pela ruptura a montante de outra barragem, elevando o nível do reservatório e provocando o efeito cascata.

O *piping*, também chamado de erosão progressiva tubular, ocorre pelo fluxo de água no corpo da estrutura, com a formação de dutos que crescem aos poucos através do carregamento de partículas de solo até o colapso do maciço. Segundo Okeke et al. (2012), o *piping* ocorre pela progressão de cinco estágios (Figura 3):

- (a) erosão interna e desenvolvimento do ponto úmido;
- (b) continuação;
- (c) progressão;
- (d) formação da brecha temporária com o colapso da crista;
- (e) colapso total com a presença da brecha final.

Figura 3 - Estágios do “piping”: (a) erosão interna; (b) continuação; (c) progressão; (d) brecha temporária; (e)



Fonte: OKEKE et al. (2012).

Cardozo, Pimenta e Zingano (2016), destacam a importância dos drenos para prevenir excessos de propressão, diminuindo as chances de formação de erosão interna com a presença de um sistema de drenagem eficiente para o direcionamento do fluxo de água na barragem.

Em seus estudos sobre as técnicas geofísicas para detecção de *piping*, Santos e Picanço (2022) resumem os casos históricos da ocorrência do fenômeno nos últimos anos, com destaque a barragem de Teton em Idaho (EUA) em 1976, de Panshet na Índia em 1961, Embalse Aromos no Chile em 1984, Gouhou na China em 1993, Fundão (Mariana) em 2015 e Córrego do Feijão (Brumadinho) em 2019, ambos ocorridos no estado brasileiro de Minas Gerais.

Guidicini, Sandroni e Mello (2021) afirmam que as causas relacionadas ao rompimento de barragens são de difícil identificação por tratar-se de uma sequência de eventos e responsabilidades, sendo frequente a falta de informações necessárias para explicar os fenômenos que provocaram tais acontecimentos. Eles citam ainda que, em desastres, o trecho envolvido no acidente costuma ser totalmente perdido ou fortemente alterado, levando consigo as evidências que auxiliariam no diagnóstico.

### 2.1.2 Política Nacional de Segurança de Barragens

A Lei nº 12.334/2010 estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), gerido pela ANA, cujo cadastro de dados é de responsabilidade de cada entidade ou órgão fiscalizador de segurança de barragens via acesso restrito, mediante senha.

Após os desastres ocorridos em Minas Gerais pelo rompimento de barragens de rejeitos de mineração de “Fundão” em 2015 e “Córrego do Feijão” em 2019, as regras para segurança de barragens foram alteradas com a publicação da Lei nº 14.066 em outubro de 2020. A nova lei aumenta as exigências de segurança tanto na fase de construção como de operação de barragens, prevendo uma fiscalização mais ativa e definindo as responsabilidades civil e criminal em caso de rompimento, com multas administrativas que podem chegar a R\$ 1 bilhão.

As barragens que se enquadram na PNSB são as destinadas a acumulação de água, à disposição de rejeitos ou à acumulação de resíduos industriais, apresentando pelo menos uma das cinco características:

- (a) altura do maciço maior ou igual a 15 metros;
- (b) capacidade total do reservatório maior ou igual a 3 milhões de metros cúbicos;
- (c) reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- (d) categoria de Dano Potencial Associado (DPA) médio ou alto; categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador.

Dentre os instrumentos da PNSB, o Plano de Segurança da Barragem tem o objetivo de auxiliar na gestão da segurança da barragem em todos os estágios, desde a construção até a operação e manutenção, com a apresentação de um panorama do estado atual da estrutura. Na atualização, foram incluídos no Art. 8º da Lei 14.066/2020, os incisos X, XI e XII:

Art. 8º O Plano de Segurança da Barragem deve compreender, no mínimo, as seguintes informações:

[...]

X - identificação e avaliação dos riscos, com definição das hipóteses e dos cenários possíveis de acidente ou desastre;

XI - mapa de inundação, considerado o pior cenário identificado;

XII - identificação e dados técnicos das estruturas, das instalações e dos equipamentos de monitoramento da barragem.

(BRASIL, 2020)

Tais estudos eram exigidos apenas para barragens cujo Plano de Ação de Emergência (PAE) era obrigatório, mas que agora passam a ser fornecidos para todas as barragens que se enquadram na PNSB devido a sua obrigatoriedade pela modificação do Art. 11 da nova lei:

Art. 11 A elaboração do PAE é obrigatória para todas as barragens classificadas como de:

I - médio e alto dano potencial associado; ou

II - alto risco, a critério do órgão fiscalizador.

Parágrafo único. Independentemente da classificação quanto ao dano potencial associado e ao risco, a elaboração do PAE é obrigatória para todas as barragens destinadas à acumulação ou à disposição de rejeitos de mineração.

(BRASIL, 2020)

O SNISB é um instrumento importante para a obtenção de informações fundamentais para a avaliação das barragens existentes em território nacional, independentemente de serem submetidas ou não à PNSB. No entanto, apesar do crescimento de cadastro de barragens no Sistema e das legislações para gestão de segurança de barragens, das 23.977 cadastradas, 56% não possuem informações suficientes para avaliação de suas características e classificação quanto à submissão à Lei nº 12.334/2010 (ANA, 2023).

Diante do passivo de informações básicas para a conclusão ao enquadramento na Política Nacional, é desconhecido pela sociedade a quantidade de barragens que carecem de atenção quanto à segurança de suas estruturas (ANA, 2023).

Para a melhoria dos dados cadastrados no sistema, foi criado o Indicador de Completude da Informação – ICI, que apresenta a qualidade do dado inserido no SNISB, com faixas Mínima (que possuem apenas informações de nomenclatura, localização e uso principal), Baixa (além das informações mínimas, possuem dados de altura, capacidade e empreendedor), Média (além dos dados da faixa anterior, possui informações da autorização), Boa (dados da faixa anterior e classificação quanto ao DPA) e Ótima (máximo de informações).

O Progestão, programa de incentivo financeiro aos estados da federação para aplicação em ações de fortalecimento institucional e de gerenciamento de recursos hídricos, tem como uma das principais metas a implementação da PNSB, fomentando a ampliação do ICI, da fiscalização e do número de barragens cadastradas (ANA, 2023).

## 2.2 SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE CHEIA

A fim de salvaguardar vidas, reduzir os prejuízos causados por uma possível ruptura e auxiliar na gestão dos recursos hídricos, a elaboração de um Plano de Segurança da Barragem é essencial para apresentar informações sobre a previsão de situações que coloquem em risco a integridade da estrutura e a área à jusante a ser afetada pela eventual ruptura da barragem, além das ações a serem seguidas pelo Plano de Ação de Emergência (PAE). Para isso, existem diversas ferramentas de modelagem que foram desenvolvidas a fim de auxiliar na avaliação dos impactos resultantes de inundações.

Os mapas de inundação são representações gráficas com informações sobre a extensão da mancha, a profundidade da inundação e a velocidade da onda de cheia. Com informações atualizadas sobre o uso e ocupação do solo, é possível ainda combinar dados da região para prever a população atingida, os custos e as infraestruturas em risco (SANTANA, 2022).

Para a simulação do rompimento de barragens, os modelos hidráulicos mais utilizados, a depender da dimensionalidade, são: o modelo unidimensional (1D), com equações do escoamento não permanente gradualmente variado, indicado para representar o escoamento superficial de cursos hídricos; e o modelo bidimensional (2D), com estudo pelas equações de conservação de massa e do momento nos eixos x e y do curso hídrico modelado, aplicável a cursos hídricos com profundidades insignificantes em comparação às extensões de lâmina d'água (TSCHIEDEL, 2017).

Os modelos hidrodinâmicos desenvolvidos a partir de equações de continuidade e da conservação da quantidade de movimento em escoamentos unidimensionais são de maior abordagem nas pesquisas sobre simulação de rompimento de barragens com o uso de Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Em seu estudo sobre análise dos impactos gerados pela ruptura hipotética da barragem da Central Geradora Hidrelétrica Corujão na área urbana da cidade de Araguaína (TO), Santana (2022) realizou a simulação e geração de mapas de inundação por meio do programa HEC-RAS, uma das ferramentas mais difundidas no mercado que auxilia no cálculo dos processos hidráulicos.

### **2.2.1 Modelagem de ruptura de barragens utilizando o HEC-RAS**

O HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*) é um *software* de modelagem hidrodinâmica desenvolvido pelo United States Army Corp of Engineers (USACE, 2016) em 1995 e disponibilizado gratuitamente para download no site da corporação. O programa permite as simulações de escoamento permanente e não permanente, transporte de sedimentos, modelagem da temperatura e qualidade da água.

O uso da ferramenta permite que sejam avaliados os impactos a jusante de barragens, auxiliando na estimativa dos custos provenientes de uma possível ruptura da estrutura, subsidiando decisões de empreendedores e entes públicos quanto aos investimentos voltados à região (HENRIQUE, 2020).

A modelagem matemática para a propagação da onda de cheia proveniente da ruptura de uma barragem é feita utilizando a abordagem unidimensional das equações de Saint-Venant, que emprega a equação da continuidade e da quantidade de movimento em todos os seus termos (atrito, gravidade, pressão e inércia) pelas seguintes equações (LAURIANO, 2009):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \rightarrow \text{Conservação da Massa} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + h \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f) \quad (\text{Eq. 2})$$

→ Conservação da Quantidade de Movimento

Onde:

t = variável independente relativa ao tempo (s);

x = variável independente relativa à direção do escoamento (m);

u = velocidade média do escoamento (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

h = espessura da lâmina líquida (m);

S<sub>0</sub> = declividade média da calha fluvial ou do fundo do canal (m/m); e

S<sub>f</sub> = declividade da linha de energia (m/m), equivalente ao termo de perda de carga unitária por atrito.

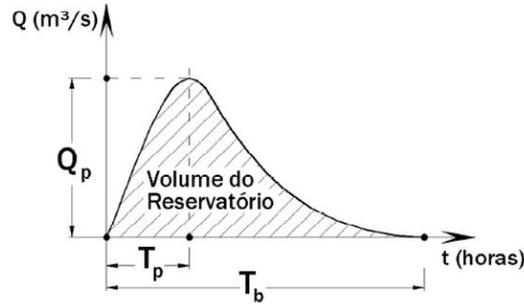
Para a simulação do rompimento de uma barragem, são necessários dados hidrológicos e topográficos de qualidade a serem inseridos no *software*, a fim de gerar resultados satisfatórios diante da complexidade do estudo, visto que tais procedimentos são feitos por meio de dados hipotéticos, com uso de equações empíricas (SILVA et al., 2022).

### 2.2.2 Vazão de pico

Há três principais expressões matemáticas para determinar a variação da vazão do escoamento pela brecha aberta na barragem e simular a propagação da onda de cheia: o triangular simplificado, o triangular gradual e o com decaimento parabólico.

Diferente das barragens de concreto que tendem a colapsar instantaneamente após a ruptura da estrutura, as barragens de terra apresentam uma evolução mais lenta. Para um rompimento gradual em barragens com simulação originadas por *piping*, o hidrograma com decaimento parabólico representa um resultado mais próximo da realidade para a formação da brecha (FARIA et al., 2019).

Figura 4 - Hidrograma com decaimento parabólico



Fonte: Adaptado de Faria et al. (2019).

Nesse caso, a variação da vazão ao longo do tempo será obtida pela equação apresentada por Barfield et al. (1981) *apud* Brasil (2005):

$$Q(t) = Q_p \left[ \left( \frac{t}{T_p} \right) e^{\left( 1 - \frac{t}{T_p} \right)} \right]^k \quad (1)$$

Na equação (1), a vazão de pico ( $Q_p$ ) ocorre no instante ( $T_p$ ). O fator de ponderação ( $k$ ) varia entre 0,1 e 0,5, a área do gráfico sob a curva equivale ao volume escoado. Tomando a integral definida da função  $Q(t)$  no intervalo de zero até o final do tempo de base ( $T_b$ ), será obtido o volume do reservatório que será fixado.

$$V = \int_0^{T_b} Q(t) dt = \int_0^{T_b} Q_p \left[ \left( \frac{t}{T_p} \right) e^{\left( 1 - \frac{t}{T_p} \right)} \right]^k dt \quad (2)$$

A função  $Q(t)$  é exponencial e tem seu valor máximo quando  $t=T_p$ , independente do valor de  $k$ , sendo este considerado igual a 0,5, conforme proposto por Faria (2016) para alcançar a vazão de pico.

Existem diversas equações para se obter a vazão de pico relacionando a vazão máxima de descarga com características da barragem, como altura do barramento, comprimento da crista e o volume do reservatório. Entre elas, as mais conhecidas para barragens de terra são:

Tabela 1 - Relações matemáticas para determinação da vazão de pico em barragens de terra

Modelo	Relação
Mcdonald & Langridge-Monopolis (1984)	$Q_p = 1,154(V_w H_w)^{0,412}$
Froehlich (1995)	$Q_p = 0,607(V_w^{0,295} H_w^{1,24})$

Fonte: Adaptado de Cruz (2019).

Em que  $Q_p$  é a vazão de pico no momento da descarga máxima da barragem em ruptura [ $m^3/s$ ],  $V_w$  é o volume do reservatório da ruptura [ $m^3$ ],  $H_w$  é a altura da coluna d'água acima da elevação do fundo da brecha no momento da ruptura [m].

### 2.2.3 Formação da brecha de ruptura

Os parâmetros necessários para o desenvolvimento da geometria da brecha em barragens de terra, enrocamento ou concreto são: o nível da água no momento em que a brecha começa a se formar ou a profundidade crítica de galgamento, a profundidade final da brecha, a largura média da brecha, as inclinações laterais dos taludes e o tempo de formação da brecha. Tipicamente, os parâmetros geométricos incluem a profundidade final da brecha, a largura média da brecha e a inclinação lateral, enquanto os parâmetros hidráulicos englobam o tempo de desenvolvimento da brecha e a vazão de pico ( $Q_p$ ) (XU & ZHANG, 2009).

Devido às incertezas que envolvem a análise da ruptura e sua localização, tamanho e tempo de formação da brecha, são utilizadas equações empíricas para determinação dos parâmetros de ruptura. Os mais utilizados em pesquisas e disponíveis no HEC-RAS para a escolha do usuário são os de “Macdonald & Langridge-Monopolis (1984)”, “Von Thun & Gillette (1990)”, “Froehlich (1995)” e “Froehlich (2008)”, apresentados na Tabela 2 e 3.

Tabela 2 - Equações empíricas para determinação do tempo de formação da brecha, em horas

Autor	Tempo de formação (h)
Macdonald & Langridge-Monopolis (1984)	$t_f = 0,0179V_{er}^{0,364}$
Von Thun & Gillette (1990)	$t_f = 0,015H_w$ (altamente erodível) $t_f = 0,020H_w + 0,25$ (resistente à erosão)
Froehlich (1995)	$t_f = 0,00254(V_w)^{0,53}H_b^{-0,90}$
Froehlich (2008)	$t_f = 0,0176 \sqrt{\frac{V_w}{gH_b^2}}$

Fonte: Adaptado de Cruz (2019).

Tabela 3 - Equações empíricas para determinação da largura média da brecha, em metros

<b>Autor</b>	<b>Largura média da brecha (m)</b>	<b>Fator</b>	<b>zH:1V</b>
Macdonald & Langridge-Monopolis (1984)	$V_{er} = 0,0261(V_w H_w)^{0,769}$ $V_{er} = 0,00348(V_w H_w)^{0,852}$ $\bar{B} = \frac{V_{er} - H_b^2(W_b z + \frac{H_b z Z_3}{3})}{H_b(W_b + \frac{H_b Z_3}{2})}$	-	0,5
Von Thun & Gillette (1990)	$B_b = 2,5H_w + C_b$	$C_b = \text{função do volume}$	0,33 a 0,5
Froehlich (1995)	$\bar{B} = 0,1803k_0 V_w^{0,32} H_b^{0,19}$	$\left\{ \begin{array}{l} k_0 = 1,4 \text{ (galgamento)} \\ k_0 = 1,0 \text{ (outros)} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 1,4 \\ 0,9 \end{array} \right.$
Froehlich (2008)	$\bar{B} = 0,27k_1 V_w^{0,32} H_b^{0,04}$	$\left\{ \begin{array}{l} k_1 = 1,3 \text{ (galgamento)} \\ k_1 = 1,0 \text{ (outros)} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ 0,7 \end{array} \right.$

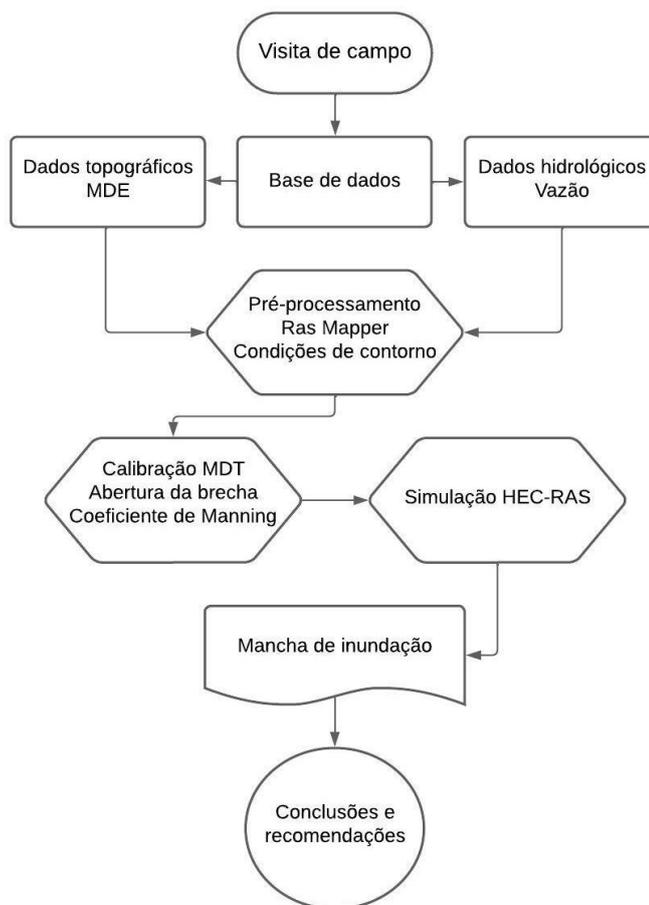
Fonte: Adaptado de Cruz (2019).

Em que  $t_f$  é o tempo de formação da brecha [h],  $V_{er}$  é o volume do maciço removido durante a formação da brecha [m<sup>3</sup>],  $H_w$  é a altura da coluna d'água acima da elevação do fundo da brecha no momento da ruptura [m],  $V_w$  é o volume do reservatório da barragem no momento da ruptura [m<sup>3</sup>],  $H_b$  é a profundidade final da brecha [m],  $\bar{B}$  é a largura média da brecha [m],  $W_b$  é a largura do fundo da brecha [m],  $z$  é a inclinação lateral dos taludes da brecha,  $Z_3$  é a soma da inclinação média dos paramentos de montante e de junte, e  $g$  é a aceleração da gravidade [m<sup>2</sup>/s].

### 3 METODOLOGIA

Nesta seção é apresentada a metodologia empregada para a obtenção dos resultados a fim de atingir o objetivo proposto. A Figura 5 mostra o fluxograma com os procedimentos realizados para a realização do projeto.

Figura 5 - Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autoria própria (2024).

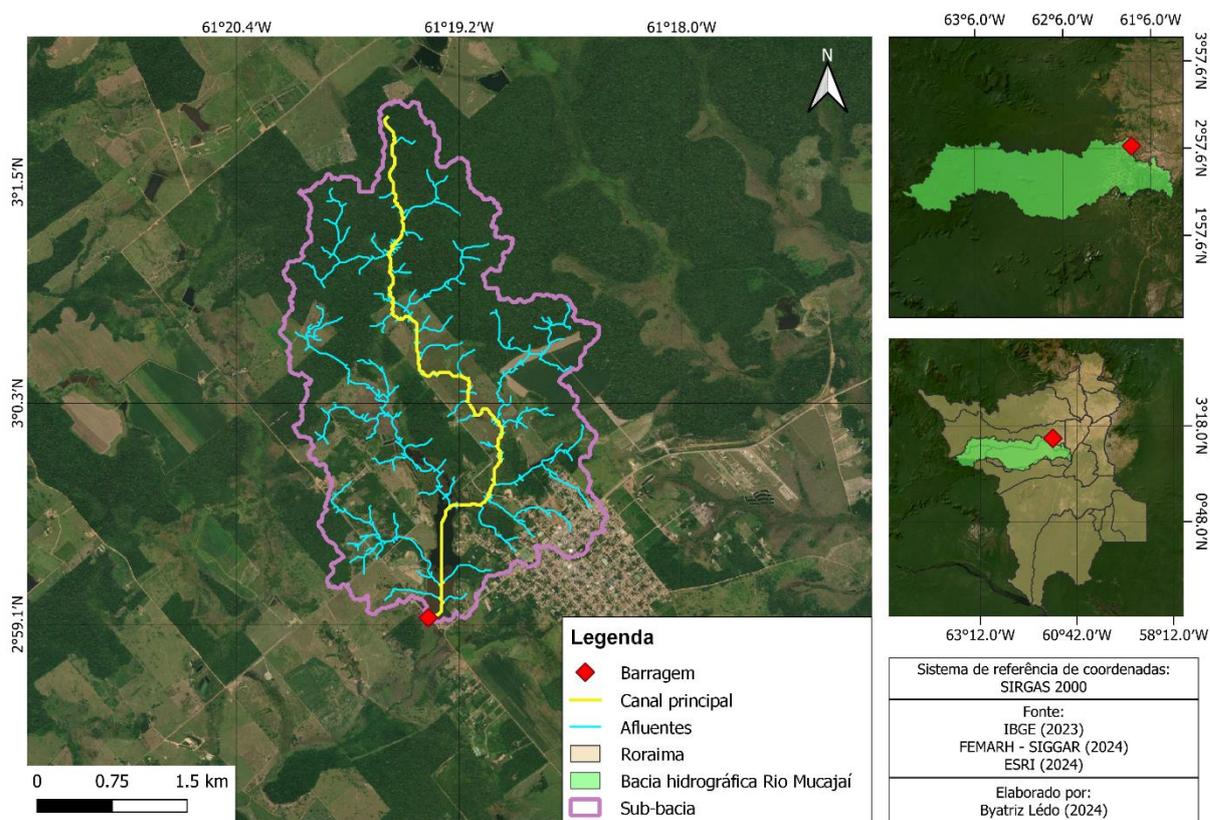
#### 3.1 COLETA DE DADOS E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Primeiramente, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre a região da barragem em análise, complementado por visitas técnicas para inspecionar o barramento. Além disso, foram conduzidas entrevistas com servidores públicos do município de Alto Alegre para coletar informações sobre a construção e manutenção da barragem. Esta etapa foi essencial para caracterizar a área de estudo e obter os dados necessários para a modelagem.

### 3.1.1 Área de estudo

A barragem escolhida para a simulação da mancha de inundação está cadastrada como sendo de domínio da Companhia de Água e Esgoto de Roraima (CAER) com código SNISB 5291, e encontra-se inserida no perímetro urbano do município de Alto Alegre, com coordenadas 2°59'07.5" de latitude Norte e 61°19'21.1" de longitude Oeste. Ela compõe a bacia hidrográfica do rio Mucajaí (Figura 6) e seu uso principal, segundo o SNISB (2024), é para o abastecimento humano e o uso secundário a regularização de vazão.

Figura 6 - Localização da barragem CAER SNISB 5291 e delimitação da sub-bacia



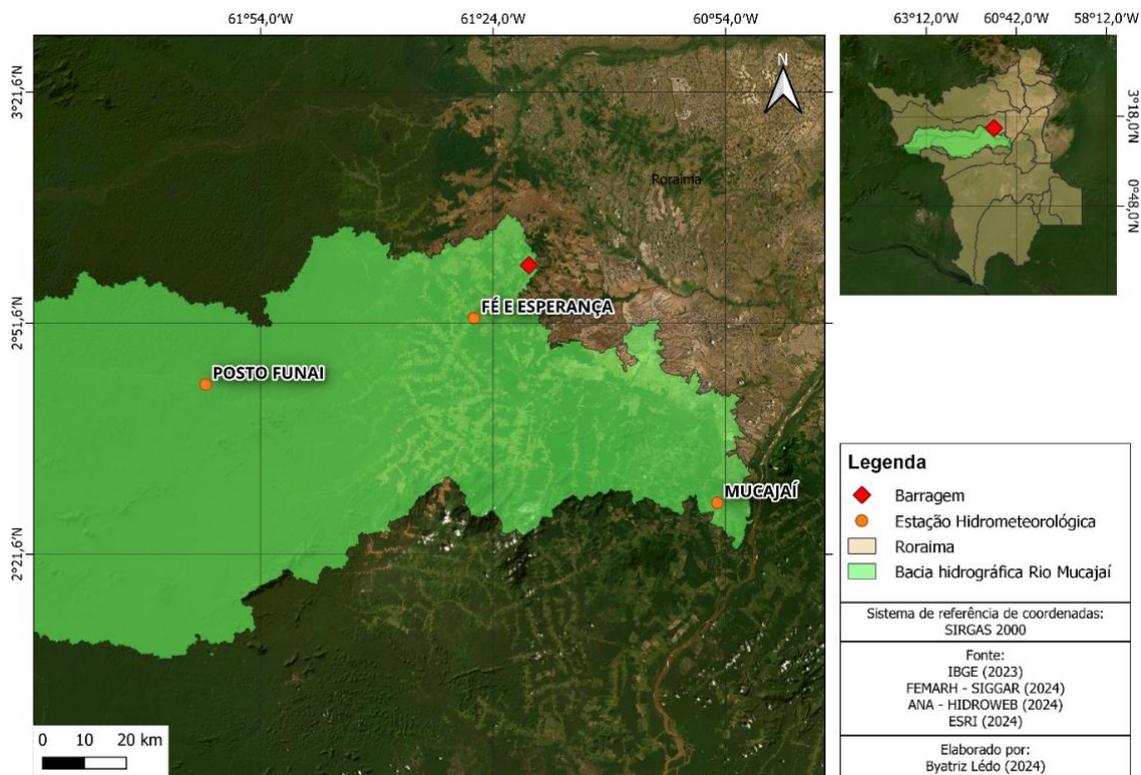
Fonte: Autoria própria (2024).

A bacia hidrográfica do rio Mucajaí possui uma área de drenagem de aproximadamente 19.840,82 km<sup>2</sup>, equivalente a 8,79% do Estado de Roraima (RORAIMA, 2022), compreendendo partes dos municípios de Boa Vista, Mucajaí e Alto Alegre, sendo o rio Mucajaí o maior afluente da margem direita do rio Branco, principal rio do Estado (VIANA; MARMOS; ANDRETTA, 2011).

A sub-bacia de contribuição direta para o reservatório, com exutório definido no eixo do barramento, possui uma área de 10,65 km<sup>2</sup>, equivalente a 0,05% da área da bacia do rio

Mucajaí. Na região da sub-bacia não há estação hidrometeorológicas (que medem dados de vazão e precipitação), a mais próxima é a Estação Fé e Esperança, localizada a aproximadamente 18,00 km da barragem (Figura 7).

Figura 7 - Estações hidrometeorológicas na bacia hidrográfica do rio Mucajaí

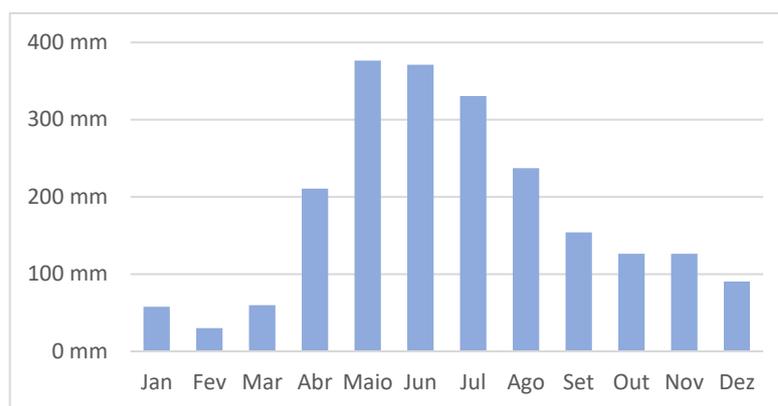


Fonte: Autoria própria (2024).

Conforme a Figura 7, há apenas três estações hidrometeorológicas na bacia hidrográfica do rio Mucajaí. Todas estão fora do limite da zona urbana do município, portanto, para obter dados estimados para a região da sub-bacia serão utilizados os dados da série histórica da estação Fé e Esperança.

O regime pluviométrico da região, a partir de uma série de dados de 20 anos, é apresentado na Figura 8, onde observa-se o período chuvoso concentrado entre os meses de abril a setembro e o período de seca entre outubro e março. O clima predominante na região é o tropical quente semiúmido, com a média da temperatura anual de 27,5°C (ALTO ALEGRE, 2024).

Figura 8 - Precipitações médias registradas na estação Fé e Esperança (2002-2021)



Fonte: ANA (2024).

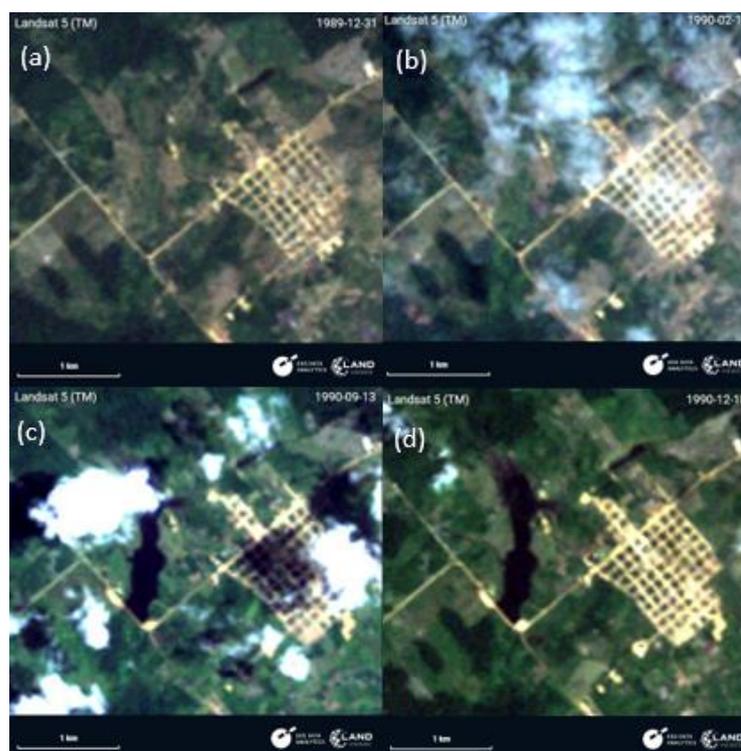
O lavrado, termo regional para se referir à savana, portanto, área de vegetação aberta, abrange a região da bacia hidrográfica do rio Mucajaí e se estende por Roraima, com enclaves na Guiana (Rupununi) e Venezuela (Gran Sabana), por cerca de 70.000 km<sup>2</sup> (ASSIS, 2022). A morfologia do relevo apresenta superfícies aplainadas retocadas ou degradadas na sede do município, que se caracteriza por superfícies suavemente onduladas, com arrasamento geral dos terrenos e posterior retomada erosiva (LADEIRA; DANTAS, 2014).

As informações sobre a construção do açude, segundo relatos de moradores da região, é de que foi realizada pelo Governo do Estado entre os anos de 1988 e 1991, visando o abastecimento da cidade.

Alguns sites oferecem de maneira gratuita imagens de satélite atuais e históricas, um deles é o LandViewer, que apesar de fornecer a visualização e download de diferentes combinações de bandas, limita o acesso diário aos produtos. Ao pesquisar por imagens de satélite para a região de Alto Alegre, foi possível obter as capturas realizadas pelo satélite Landsat 5, do Programa Landsat da NASA, lançado em 1º de março de 1984.

Ao comparar as imagens de satélite para a região selecionada, observa-se o surgimento do reservatório entre a captura de 17 de fevereiro e 13 de setembro de 1990, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Imagens de satélite Landsat 5: (a) 31/12/1989; (b) 17/02/1990; (c) 13/09/1990; (d) 18/12/1990



Fonte: LandViewer (2024).

Silva (2018) informa que existe um igarapé que foi represado há mais de 30 anos, formando um açude para a captação e abastecimento de água do município e manteve-se com essa atividade principal por um período próximo a 22 anos. No entanto, em decorrência da instabilidade do fornecimento de energia elétrica, falta de manutenção e o aumento da poluição com as diversas moradias consolidadas em seu entorno, comprometendo a qualidade da água represada, atualmente a captação ocorre diretamente pelo rio Mucajaí, a 19 km da região urbana (TCU, 2015).

No cadastro da barragem no site do SNISB, é apresentada a Figura 10 com a apresentação de danos na estrutura do vertedouro e em sua fundação. A data da última atualização cadastral no sistema ocorreu em 12 de setembro de 2019.

Figura 10 - Barragem CAER SNISB 5291: estado do vertedouro antes da reforma



Fonte: SNISB (2024).

No site também é disponibilizado para *download* o Formulário para Cadastro de Barragens da FEMARH. O Formulário não apresenta registro da data em que foi elaborado, mas consta as informações da área do reservatório de aproximadamente 290.202,00 m<sup>2</sup>, volume de 175.212,00 m<sup>3</sup> e altura da barragem de 9 metros.

Em visita realizada no período de cheia, em abril de 2023, identificamos a reforma das paredes do vertedouro e o aumento da sua vazão com a ampliação da galeria, presente na Figura 11 a seguir:

Figura 11 - Vertedouro reformado



Fonte: Autoria própria (2024).

A CAER opera um sistema de captação de água do reservatório, juntamente com uma Estação de Tratamento de Água (ETA), construída em junho de 1993 às margens da lagoa. Entretanto, não há equipamentos instalados para o monitoramento dos principais dados hidrológicos, como nível da água, precipitação e vazão. Segundo relatos de moradores, nunca houve transbordamento pela crista da barragem.

Dessa forma, a barragem atua em função de sua atividade complementar de regularização de vazão, além de ter sua crista utilizada como via para a rodovia estadual RR-205, essencial para a exportação de grãos e o acesso às comunidades. Contudo, com a alteração de sua finalidade, houve a perda de responsabilidade sobre a manutenção e operação do maciço de terra.

A inspeção da barragem teve como referência o Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem do SNISB, que é destinado a barragens de acumulação de água para quaisquer usos, a fim de auxiliar os empreendedores na avaliação das condições físicas das partes integrantes da barragem.

Entre as patologias a serem vistas, destaca-se a identificação de trincas, fissuras, infiltração, deslizamento, falta de proteção do talude, existência de árvores e arbustos ao longo do talude, toca de animais, assoreamento, obstrução do vertedouro, erosões e a presença de vegetação aquática extensiva no reservatório.

## 3.2 MODELAGEM DA FORMAÇÃO DA BRECHA DE RUPTURA

Os fatores que caracterizam a formação da brecha são a sua configuração geométrica e o tempo de ruptura, que em conjunto influenciam na vazão, no nível e nos tempos de chegada da onda de inundação e determinam os intervalos de tempo disponíveis para a implementação do plano de emergência (ANA, 2016a).

### 3.2.1 Modo de ruptura e formação da brecha

Para determinar o modo de ruptura, partimos das informações disponíveis no documento de inspeção regular realizada pela Fundação Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – FEMARH, disponível no site do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) e no Relatório de Segurança de Barragens de 2021, quanto a preocupação sobre o risco de colapso da barragem devido ao estado da estrutura do vertedouro.

Apesar de ter sido realizada a reforma do vertedouro da barragem (Figura 11), foram observadas na visita de campo a presença de árvores e arbustos nos taludes do maciço, que facilitam o processo de erosão interna e permitem, de maneira aproximada, considerar o mecanismo de falha por *piping* iniciada no contato entre o maciço de terra e a galeria de concreto.

A brecha de ruptura por *piping* pode começar a qualquer elevação, aumentando suas dimensões progressivamente e levando, eventualmente, a base do maciço. No cenário escolhido, assume-se o início do *piping* com o nível d'água 70 cm acima da soleira do vertedouro e com volume armazenado de 175.000,00 m<sup>3</sup>.

Devido à ausência de dados sobre os níveis do reservatório, não será possível analisar se a elevação do nível da água chegou a ultrapassar a crista da barragem desde a sua construção. Desta forma, considerou-se que o vertedouro tem capacidade adequada, reduzindo as possibilidades de rompimento por galgamento.

Dentre as equações empíricas para determinar os parâmetros de formação da brecha, serão adotados os resultados das dimensões e do tempo de formação da brecha para aquele que apresentar o menor tempo de ruptura.

### 3.3 MODELAGEM NUMÉRICA DA PROPAGAÇÃO DA ONDA DE CHEIA

Para realizar a simulação do modelo unidimensional de fluxo não permanente, é necessária a preparação dos dados de entrada com uso de outros programas de geoprocessamento. Uma das primeiras informações a ser coletada para o uso no HEC-RAS é a da geometria do terreno, seguida da definição do coeficiente de rugosidade para caracterizar a resistência exercida pelo canal sobre o escoamento, que varia em relação ao tipo de uso do solo e o material que compõe o leito e suas margens.

#### 3.3.1 Preparação do relevo

A partir do processamento de dados do Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido pelo sensor PALSAR do satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), conhecido como ALOS PALSAR, lançado em 2006, que apresenta uma resolução alta de 12,5 m e encontra-se disponível gratuitamente através do site ASF Data Search.

Antes de inserir o MDE no HEC-RAS, foi realizada a delimitação para a região que compreende os limites da sub-bacia de contribuição direta para o reservatório, com exutório

definido no eixo do barramento. Para isto, foi utilizado o *software* QGIS versão 3.28.2, um programa livre com código-fonte aberto, disponível gratuitamente no site oficial.

### 3.3.2 Geometria do modelo

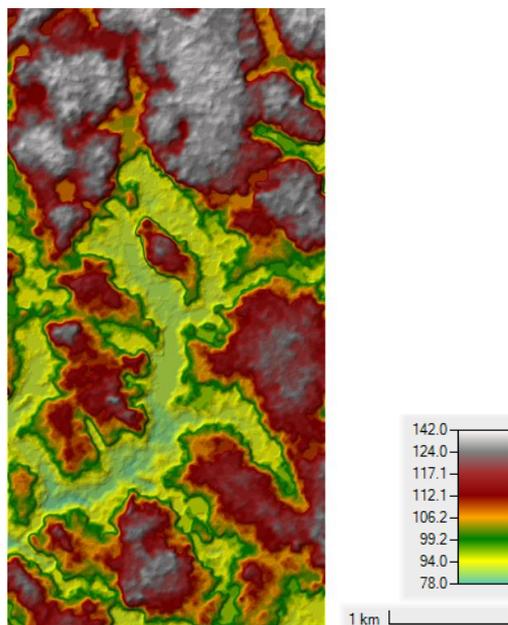
Os dados geométricos consistem na representação das planícies de inundação, na definição das características dos elementos da barragem e na identificação de elementos estruturais presentes ao longo da zona de atingimento, que influenciam nas características da onda de cheia em caso de ruptura da barragem.

Para uma simulação com resultados mais próximos da realidade, seriam necessárias seções topobatimétricas do reservatório e do curso d'água à jusante, a serem associados ao modelo digital de elevação de alta resolução. No entanto, tal levantamento requer o uso de ecobatímetros, que não se encontram disponíveis para levantamentos na região de estudo.

Antes de inserir o MDE no HEC-RAS versão 6.5, foi realizado o tratamento do modelo com o *software* QGIS versão 3.28.2, a fim de preencher as áreas sem dados planialtimétricos por meio de interpolação.

Por fim, a geometria do modelo foi constituída através do MDE utilizando o RAS Mapper (Figura 12), uma ferramenta integrada ao HEC-RAS que permite a criação e refinamento da geometria de um modelo hidráulico, assim como a visualização e análise da mancha de inundação produzida.

Figura 12 – RAS Mapper: digitalização do MDE da região da sub-bacia (elevação em metros)



Fonte: Autoria própria (2024).

Para importação dos dados e demais etapas, foram seguidos tutoriais disponíveis online, como os de Dieguez & Smith (2016), Dey & Merwade (2020), bem como o Manual Básico HEC-RAS 5.0.3 da ANA (2018).

### 3.3.2.1 Traçado do curso d'água e das seções transversais

O traçado do curso d'água principal foi realizado seguindo o centro das regiões com menores elevações e uma imagem de satélite como plano de fundo para servir de guia. O trecho do rio teve seu início exatamente a montante do barramento, por meio da inserção do elemento *Rivers* no RAS Mapper.

De forma semelhante, foram demarcadas as margens esquerda e direita (*bank lines*), necessárias para delimitar as áreas a serem potencialmente atingidas. A vetorização das margens possibilita a atribuição dos coeficientes de rugosidade para o canal e planície de inundação.

O próximo passo foi a digitalização das seções transversais (*Cross Sections*), traçadas manualmente perpendicularmente ao eixo do rio, da esquerda para a direita (na direção do fluxo) e estendidas por toda a planície de inundação (Figura 13).

Figura 13 - Seções transversais (verde), barragem (rosa), margens (vermelho), canal principal (azul)



Fonte: Autoria própria (2024).

Para refinar a distância entre as seções, foi utilizada uma ferramenta do HEC-RAS para interpolação das seções traçadas no editor de geometria. O Manual do Usuário do HEC-RAS (2010) recomenda a distância máxima entre seções entre 15 e 30 metros.

### 3.3.2.2 Estrutura da barragem

Por meio da ferramenta *Inline Structure* foram inseridas as informações da barragem. Para a caracterização das dimensões da estrutura, foram feitos levantamentos em campo a fim de obter medidas aproximadas da barragem e de seu vertedouro (Tabela 4). Para a altura, foi adotada a informação disponível no relatório da FEMARH.

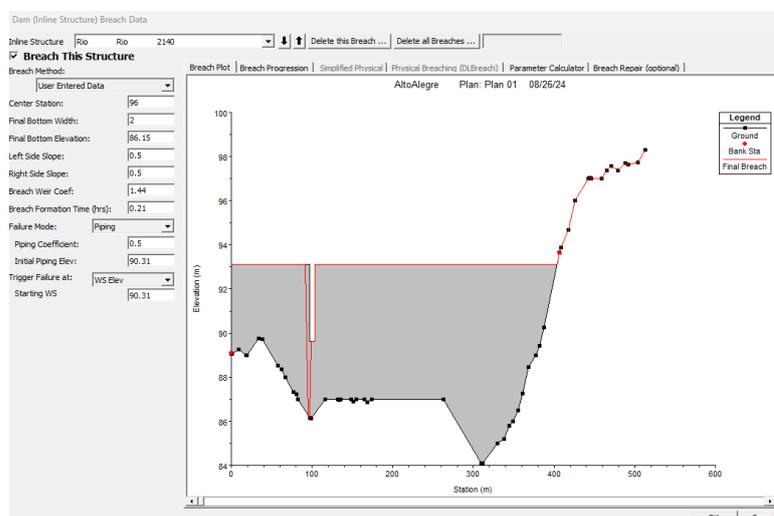
Tabela 4 - Caracterização da estrutura

Descrição	Valores
Altura da barragem	9 m
Largura da crista	10 m
Comprimento da barragem	380 m
Largura do vertedouro	6,70 m
Altura do vertedouro	3,50 m
Lâmina d'água (período de cheia)	0,70 m

Fonte: Autoria própria (2024).

Os dados para a modelagem da brecha de ruptura são inseridos na guia *Breach Data*, onde os parâmetros de ruptura são calculados pelo programa conforme as equações definidas no item 3.2.2 desta pesquisa. O mecanismo de gatilho da ruptura foi o *piping* com progressão senoidal para formação da brecha (Figura 14).

Figura 14 - Parâmetros da barragem e da brecha de ruptura

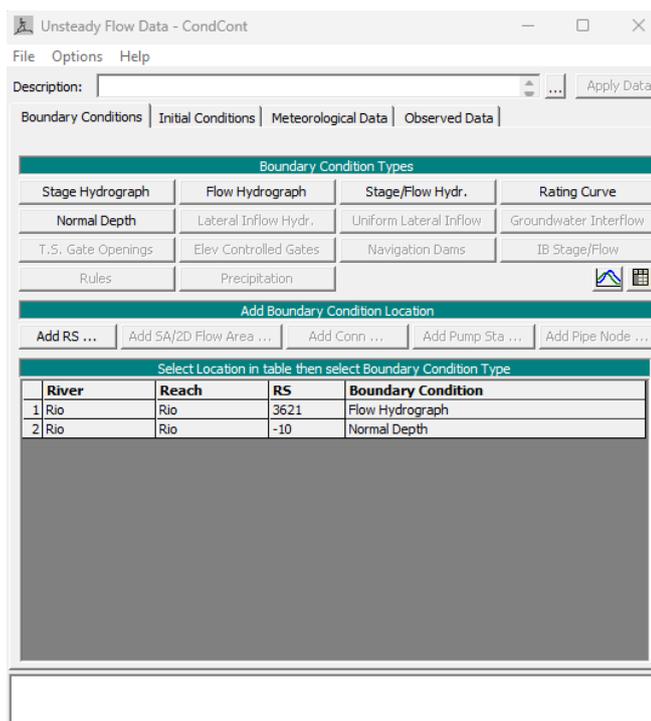


Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.3.3 Simulação no regime não permanente

A simulação de ruptura no regime não permanente exige a definição das condições de contorno a montante e a jusante, a serem inseridas na guia *Unsteady Flow Data* (Figura 15).

Figura 15 - *Unsteady Flow Data*: condições de contorno



Fonte: Autoria própria (2024).

A resistência que a rugosidade do leito do rio e da planície de inundação impõe ao fluxo foi caracterizada pelo coeficiente de Manning.

#### 3.3.3.1 Coeficientes de rugosidade

O coeficiente de Manning é determinado conforme a observação realizada em visita de campo e os valores correspondentes na literatura. Devido à uniformidade do trecho à jusante, adotou-se um coeficiente de Manning igual a 0,03 para o leito do canal principal e 0,08 para as margens esquerda (mata ciliar) e direita (cerrado), visando o equilíbrio dos valores de rugosidade que representam as duas coberturas vegetais, visto que se deve adotar no programa apenas um valor para as margens.

### 3.3.3.2 Condições de contorno iniciais

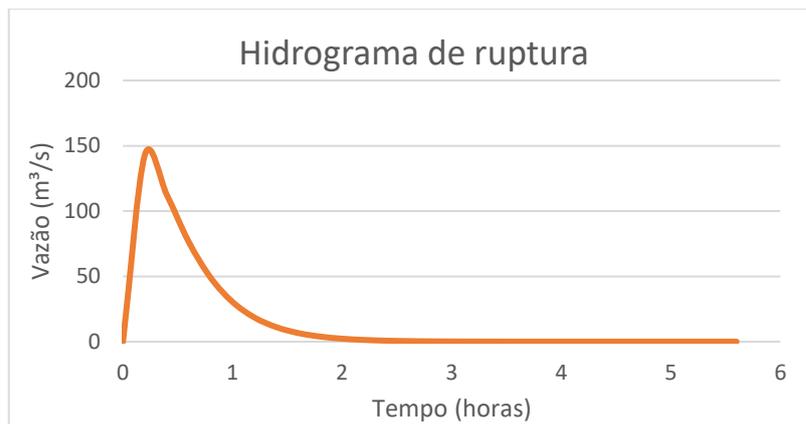
Para o levantamento dos dados de entrada a serem utilizados no HEC-RAS, é necessário a definição das condições de contorno para a simulação e a definição da vazão no momento do rompimento.

Devido à ausência de estudos de cheias e das séries de afluições ao reservatório, foi realizado um hidrograma sintético de entrada para representar a condição de contorno a montante, conforme descrito no item 3.2.3.

O tempo de base ( $T_b$ ) adotado foi de 24 horas, discretizado em intervalos ( $t$ ) de 15 minutos, escolhido com base em outras pesquisas semelhantes. Ao manter o tempo de pico  $T_p$ , e o fator de ponderação,  $k$ , fixos e definir a área do gráfico igual ao volume do reservatório, foi possível determinar o hidrograma de ruptura através da Equação 1.

O tempo de formação da ruptura obtido pelas equações de previsão no HEC-RAS foi considerado como o tempo de pico, pois a vazão máxima ocorre dentro desse intervalo. Com isso, o hidrograma de ruptura (Figura 16) foi calculado mantendo fixos o menor tempo de pico calculado e o fator de ponderação ( $k=0,5$ ), utilizando a vazão de pico igual a 144,12 m<sup>3</sup>/s, obtida pela equação de “McDonald & Langridge-Monopolis (1984)”, apresentada na Tabela 1.

Figura 16 - Hidrograma sintético afluente ao reservatório



Fonte: Autoria própria (2024).

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas e discutidas as características observadas em campo referente à estrutura da barragem e os resultados obtidos por meio das simulações de rompimento hipotético do maciço de terra através do *software* HEC-RAS.

### 4.1 INSPEÇÃO DA BARRAGEM

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens – SNISB (2024), das 111 barragens do estado de Roraima cadastradas pelo órgão fiscalizador estadual, a FEMARH, 7 estão situadas no município de Alto Alegre, interior de Roraima.

A cidade de Alto Alegre – RR possui uma população estimada de 15.249 pessoas (IBGE, 2021), com destaque econômico na pecuária de corte e plantio de soja, sendo 70% do território demarcado em área de proteção ambiental, estando a 80 km de Boa Vista, capital do Estado. Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico disponível no site do IBGE (2010), apesar de ser uma população pequena, o sistema de esgotamento sanitário não atende toda a população alto-alegrense, tendo apenas 16,10% assistida com um sistema sanitário adequado.

A barragem não apresenta documentos como projetos, licenciamentos, outorga, plano de manutenção, relatório de inspeção ou cadastro junto aos órgãos públicos. Foram feitas tentativas via ofício junto à Companhia de Água e Esgoto de Roraima (CAER) para obter informações da barragem do Alto Alegre, porém não houve resposta até a conclusão da pesquisa.

No SNISB consta o cadastro da barragem com código 5291 e as seguintes características apresentadas na Tabela 5:

Tabela 5 - Cadastro técnico do barramento no SNISB

<b>Descrição</b>	<b>Valores</b>
Código	5291
Nome	CAER
ID da barragem - Fiscalizador	FEMARH/RR
Altura (m) – Fundação	9,00
Área do reservatório (m <sup>2</sup> )	290.202,00
Capacidade total (m <sup>3</sup> )	175.212,00
Uso principal	Abastecimento humano
Latitude	2,994°
Longitude	-61,322°
Compleitude	Mínima

Categoria de risco	Alto
Dano Potencial Associado	Alto
Regulada	Sim
Empreendedor	Companhia de Água e Esgoto de Roraima
UF	RR
Município	Alto Alegre
Fiscalizador	FEMARH/RR
Autorização	-
Bacia	-
Região hidrográfica	Amazônica
Possui PAE	-
Possui Plano de Segurança	-
Data da última inspeção	-

Fonte: SNISB (2024).

A Figura 17 apresenta o talude de montante da barragem, registrada em visita realizada no dia 17 de julho de 2024. Conforme visto na figura a seguir, observamos que a falta de limpeza gerou o crescimento de vegetação desordenada com raízes profundas nos taludes da barragem, as quais, segundo o Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem (ANA, 2016b), comprometem a integridade do aterro ao proporcionarem caminhos de percolação da água, capazes de produzir erosão interna e facilitar a ocorrência do fenômeno de *piping*.

Figura 17 - Talude de montante da barragem



Fonte: Autoria própria (2024).

A falta de proteção superficial no talude, torna-o suscetível aos processos de escorregamento, erosões, afundamentos e buracos. Notamos ainda a presença de trincas e buracos no asfalto da RR-205 que passa pela crista da barragem, contribuindo para a percolação da água no maciço de terra.

Na Figura 18, observa-se a formação de ravinamento no talude de montante próximo à calha do vertedouro da barragem.

Figura 18 - Ravinamento no talude de montante



Fonte: Autoria própria (2024).

Durante a visita de campo realizada em julho de 2024, no período chuvoso, observamos um grande volume de água escoando pelo vertedouro, com uma lâmina d'água de 70 cm (Figura 19).

Figura 19 - Vertedouro em período de cheia



Fonte: Autoria própria (2024).

Identificamos uma residência localizada à jusante da barragem, próxima ao vertedouro, conforme destacado na Figura 20, a qual encontra-se em zona de risco em caso de rompimento das estruturas da barragem.

Figura 20 - Residência localizada próxima ao vertedouro



Fonte: Autoria própria (2024).

Uma das preocupações da FEMARH no Relatório de Barragens de 2021 (ANA, 2022) era sobre a estrutura do vertedouro da barragem. A reforma da estrutura ocorreu apenas a jusante do barramento, a face à montante permanece com uma estrutura instável, com ocorrência do processo erosivo na ombreira esquerda da calha.

Durante visita realizada no período de seca, em novembro de 2023, registramos o estado da estrutura do barramento e do reservatório (Figura 21).

Figura 21 - Crista da barragem.



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 21 apresenta a crista da barragem com a passagem da RR-205, a estrutura comprometida do talude de montante e a presença de macrófitas flutuantes no reservatório durante o período de seca, que dificultam a saída de água pelo vertedouro (Figura 22).

Figura 22 - Canal de saída para o vertedouro da barragem no período de seca



Fonte: Aatoria própria (2024).

A Figura 23 apresenta uma vista do reservatório no período de seca (novembro de 2023) e de cheia (julho de 2024).

Figura 23 - Reservatório no período de (a) seca e (b) cheia



Fonte: Aatoria própria (2024).

No perímetro do reservatório existem diversas propriedades particulares onde são observados animais com livre acesso à água, intensificando o processo erosivo das margens e contribuindo para o aumento de coliformes fecais na água represada. Assim, tais ocorrências impactam na qualidade da água, diminuem a quantidade de peixes e aumentam a proliferação de bactérias.

#### 4.2 MAPAS DE INUNDAÇÃO

As Figuras 24 e 25 ilustram as manchas de inundação máxima e mínima geradas imediatamente após o rompimento da barragem e 24 horas após a ruptura. A profundidade de inundação nas áreas ao redor do reservatório varia entre 0 e 15 metros, com uma profundidade média de 6,26 metros no momento da ruptura, reduzindo para 0,66 metros ao final da simulação.

Figura 24 - Profundidades atingidas no momento da ruptura, em metros (barragem em rosa)



Fonte: Autoria própria (2024).

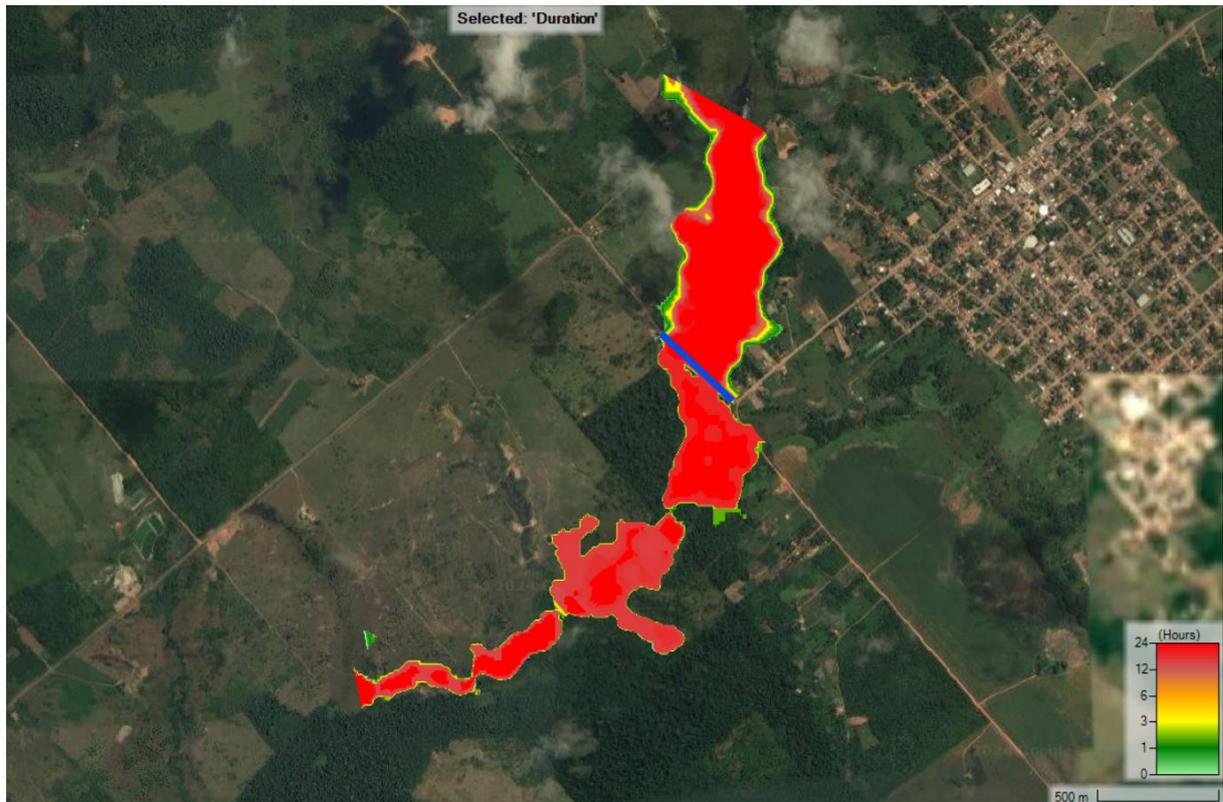
Figura 25 - Profundidades atingidas 24 horas após a ruptura, em metros (barragem em rosa)



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 26, apresenta que a elevação da lâmina d'água em 30 centímetros acima do nível normal, nas margens do reservatório e do canal principal, persiste por até 3 horas após a ruptura.

Figura 26 - Duração da cheia em que a lâmina d'água está acima de 30 cm do nível normal, em horas (barragem em azul)

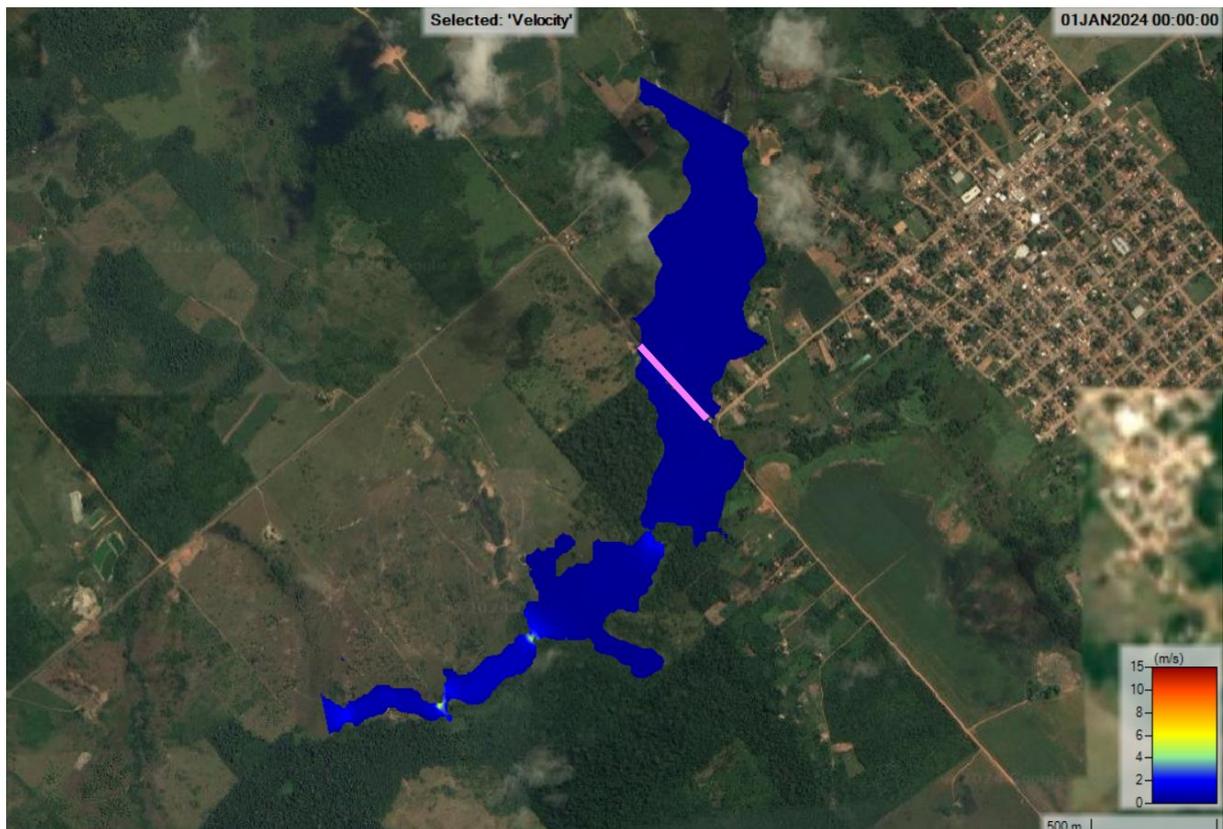


Fonte: Autoria própria (2024).

As figuras anteriores indicam que a mancha de inundação a jusante da barragem se distribui ao longo do canal principal, transbordando para a área delimitada pelas margens. Contudo, essas extensões podem ser maiores do que as apresentadas, devido às limitações do modelo digital de terreno utilizado.

Por se tratar de uma pequena barragem de terra, com volume represado de apenas 175.212,00 m<sup>3</sup> e uma sub-bacia de contribuição de apenas 10,65 km<sup>2</sup>, correspondendo a 0,05% da bacia do rio Mucajaí, o rompimento da barragem não gera grandes impactos nos canais à jusante da bacia. Além disso, com base na caracterização morfológica da sub-bacia, foi identificada uma declividade média inferior a 5%, indicando um relevo plano e suave, com escoamento superficial lento ou moderado. Isso explica o espriamento da água à jusante e a uniformidade da velocidade média ao longo do canal, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 - Velocidade do escoamento no momento da ruptura, em metros por segundo (barragem em rosa)



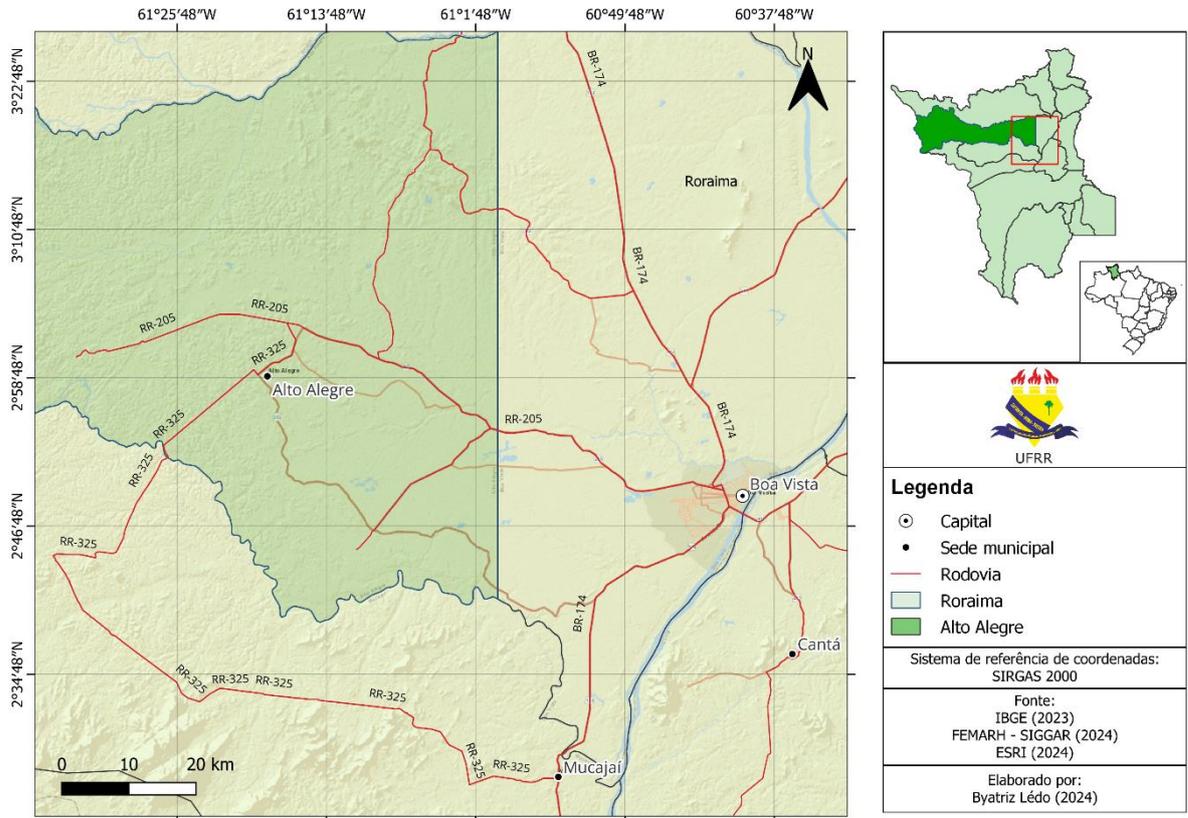
Fonte: Autoria própria (2024).

A inundação a jusante ocorre em uma área agrícola, sujeita a impactos na fauna e flora locais, o que pode comprometer a qualidade do solo e destruir habitats naturais, afetando a biodiversidade. A força da água e o volume extravasado arrastariam a camada superficial do solo, conhecida como serapilheira, composta por folhas, galhos, flores, frutos e outros materiais.

Além de tornar as terras menos produtivas, a ruptura da barragem representa um risco para a residência situada à jusante (Figura 22), próxima ao canal do vertedouro, tornando essencial a evacuação dos moradores da área.

Outro impacto seria a destruição de um trecho da RR-205, que, como mostrado na Figura 28, é o único acesso asfaltado entre os municípios de Alto Alegre e Mucajaí. Essa via é crucial para o escoamento da produção agrícola da região e serve como o único meio de acesso para as comunidades da zona rural.

Figura 28 - Mapa rodoviário do município de Alto Alegre



Fonte: Autoria própria (2024).

## 5 CONCLUSÕES

O trabalho teve como objetivo simular computacionalmente o rompimento hipotético da barragem da CAER no município de Alto Alegre, estado de Roraima, e através de resultados como o mapa de inundação, analisar o impacto causado nas imediações do canal à jusante da barragem.

O canal foi caracterizado com a criação de 132 seções transversais no RAS-Mapper com distância máxima de 30 metros entre as seções. Além do estudo do canal a jusante da barragem, foi estudada a bacia hidrográfica a montante da barragem.

Dentre as quatro equações empíricas que definem parâmetros formadores da brecha, foram adotados os parâmetros da equação de “MacDonald & Langridge-Monopolis (1984)”, que gerou um menor tempo de formação da brecha (0,21 horas).

A partir dos resultados da simulação baseada na equação de "MacDonald & Langridge-Monopolis (1984)", foi elaborado um mapa de inundação referente ao rompimento da barragem. O mapa mostrou que a área inundada alcançaria regiões agrícolas a jusante e destruiria uma edificação próxima ao canal do vertedouro da barragem, representando risco para vidas humanas.

Além disso, o rompimento causaria danos a um trecho da rodovia estadual RR-205, essencial para o transporte de pessoas e mercadorias na região, gerando impactos econômicos e sociais significativos devido à interrupção do tráfego. Caso o rompimento ocorra enquanto veículos estiverem passando pelo local, o risco de perdas humanas seria ainda maior.

É importante ressaltar que a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) estabelece normas, responsabilidades e instrumentos para a gestão de risco. O barramento em questão é classificado como de alto risco (CRI) e alto Dano Potencial Associado (DPA), conforme registrado no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens.

Contudo, devido à total ausência de manutenção e inspeção do barramento, recomenda-se que inspeções mensais sejam realizadas e os relatórios enviados ao órgão fiscalizador e ao empreendedor para as devidas providências.

Além disso, é fundamental a instalação de equipamentos para monitorar os dados hidrológicos da região, permitindo um controle eficaz do comportamento da água. Esses equipamentos proporcionarão informações essenciais sobre o nível da água, precipitação e vazão, contribuindo para uma gestão mais informada e proativa dos recursos hídricos.

Com o cumprimento de todos os objetivos propostos, conclui-se que o rompimento da barragem CAER SNISB 5291, nas condições analisadas, teria impactos diretos sobre vidas humanas e estruturas civis.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE**. Brasília: ANA, 2016 (a). 129 p. ISBN 978-85-8210-040-0.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem**. Brasília: ANA, 2016 (b). 218 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Guia Prático de Pequenas Barragens**. Brasília: ANA, 2016 (c). 120 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Hidroweb: sistemas de informações hidrológicas**. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>. Acesso em: 27 maio 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Manual Básico HEC-RAS 5.0.3 Ruptura de Barragem**. Brasília: ANA, 2018. n. 2, 116 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul, R 06 – Estudos de Ruptura de Barragens**. Brasília: ANA, 2012. 113 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Relatório de Segurança de Barragens 2021**. Brasília: ANA, 2022. 68 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Relatório de Segurança de Barragens 2022**. Brasília: ANA, 2023. 90 p.

ALTO ALEGRE. Prefeitura de Alto Alegre. Secretaria de Meio Ambiente e Turismo. **Turismo em Alto Alegre**. Disponível em: <<https://www.altoalegre.rr.gov.br/turismo>>. Acesso em: 01 jun. 2024.

ASSIS, J. N. C. Percepção quanto à qualidade da água consumida por moradores da área urbana do Município de Alto Alegre/RR. 2022. 63 f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais, Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, 2022.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição

final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. **Diário Oficial [da] União**, Brasília, DF. 20 set. 2010.

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

COSTA, W. D. Geologia de Barragens. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2012.

CRUZ, D. C. **Identificação de áreas potencialmente inundáveis associadas à ruptura hipotética da barragem Santa Maria em decorrência de piping**. 2019. 142 f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2019.

DEY, S.; MERWADE, V. **1D HEC-RAS Model Development using RAS-Mapper**. Lyles School of Civil Engineering, Purdue University, 2020.

DIEGUEZ, J.; SMITH, R. **Flood Breach Analysis Using ArcMap & HEC-RAS 5.0**. Nashville, 2016.

FARIA, L. F. F.; REIS, M. B. S.; AMORIM, J. C. C. Metodologia para obtenção do hidrograma para simulação de ruptura de barragens. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. 36, n. 3, p. 31-37, 2019.

GUIDICINI, G.; SANDRONI, S. S.; MELLO, F. M. de. **Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragens e obras anexas no Brasil**. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens, 2021. 208 p.

HENRIQUE, B. I. **Avaliação dos impactos a jusante da barragem Lomba do Sabão, em Porto Alegre, em caso de rompimento**. 2020. 110 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – ProfÁgua), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Brasileiro de 2021**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS – ICOLD. **Dam's safety is at the very origin of the foundation of ICOLD**. Disponível em: <[https://www.icold-cigb.org/GB/dams/dams\\_safety.asp](https://www.icold-cigb.org/GB/dams/dams_safety.asp)>. Acesso em: 21 jan. 2024.

LADEIRA, L. F. B.; DANTAS, M. E. Geodiversidade do estado de Roraima. In: Holanda, J. L. R.; Marmos, J. L.; Maia, M. A. M. (Org.). **Compartimentação Geomorfológica**. Manaus: CPRM, 2014. p. 31 – 46.

LANDVIEWER. EOS Data Analytics. Disponível em: <<https://eos.com/landviewer/?lat=-1.7824&lng=-62.2458&z=11>>. Acesso em: 25 jun. 2024.

LAURIANO, A. W. Estudo de Ruptura da Barragem de Funil: Comparação entre os Modelos FLDWAV e HEC-RAS. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Campo Grande, v. 01, 20 p. 2009.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL – ONU. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2022. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 26 out. 2022.

OKEKE, A. C. et al. Laboratory Experiments on Landslide Dam Failure Due to Piping: An Evaluation of 2011 Typhoon-Induced Landslide and Landslide Dam in Western Japan. **Progress of Geo-Disaster Mitigation Technology in Asia**. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 525-545, 2012. DOI: <[https://doi.org/10.1007/978-3-642-29107-4\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-642-29107-4_30)>.

RORAIMA. Governo de Roraima. Secretaria de Agricultura, Desenvolvimento e Inovação - SEADI. **Zoneamento Ecológico-Econômico: diagnóstico dos recursos naturais**. Boa Vista: PIATAM, 2022. 1.143 f.

SANTANA, L. M. **Mapas de Inundação em Área Urbana na Cidade de Araguaína/TO: estudo de caso de interferência da CGH Corujão**. 2022. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental), Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2022.

SANTOS, C. J; PICANÇO, J. L. Técnicas geofísicas para detecção de piping: uma revisão de literatura. **Revista de Geologia Aplicada a La Ingenieria y al Ambiente**, Buenos Aires, n. 48, p. 23-35, 2022.

SILVA, A. C. D. **Recuperação de uma Área de Preservação Permanente no Entorno de um Lago Urbano no Município de Alto Alegre-RR**. 2018. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Elaboração e Gerenciamento de Projetos para Gestão Municipal de Recursos Hídricos), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2018.

SILVA, J. P. N. et al. Simulação de Rompimento da Barragem São Bento do Una através do Software HEC-RAS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, p. 856-871, 2022.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS – SNISB. **Consultar barragens**. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/portal-snisb/consultar-barragem>>. Acesso em: 23 jul. 2024.

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO – TCU. **Relatório de fiscalização – sintético TC 029.178/2014-2 – Fiscalização 701/2014**. Brasília: TCU, 2015.

TSCHIEDEL, A. F. **Avaliação de fontes de incerteza em estudos de rompimentos de barragens**. 2017. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

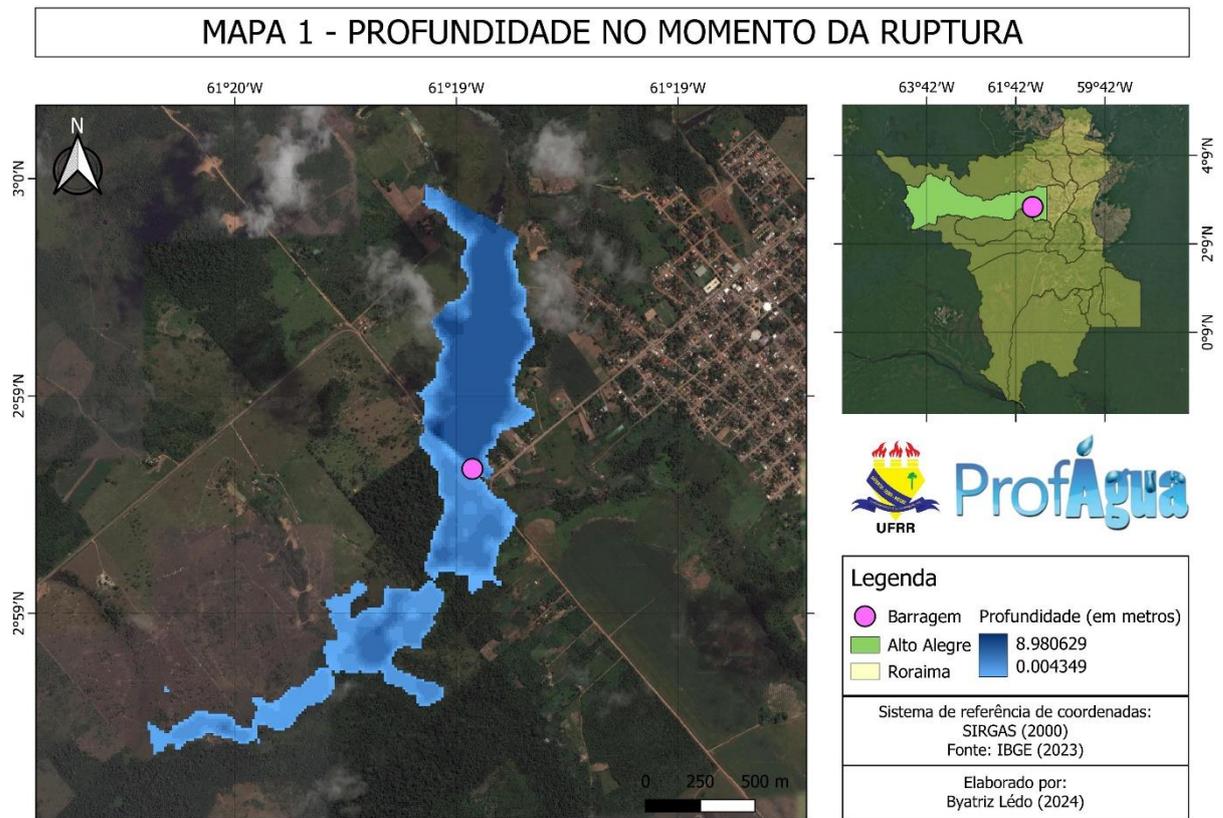
U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS – USACE. **HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual**. Davis: Hydrologic Engineering Center (HEC), 2016. 547 p.

VIANA, E. C. A.; MARMOS, J. L.; ANDRETTA, E. R. Levantamento geoquímico de baixa densidade nas águas superficiais do baixo rio Mucajaí (RR). **Anais XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica e III Simpósio de Geoquímica dos Países do Mercosul**. Gramado: Repositório Institucional de Geociências, 2011.

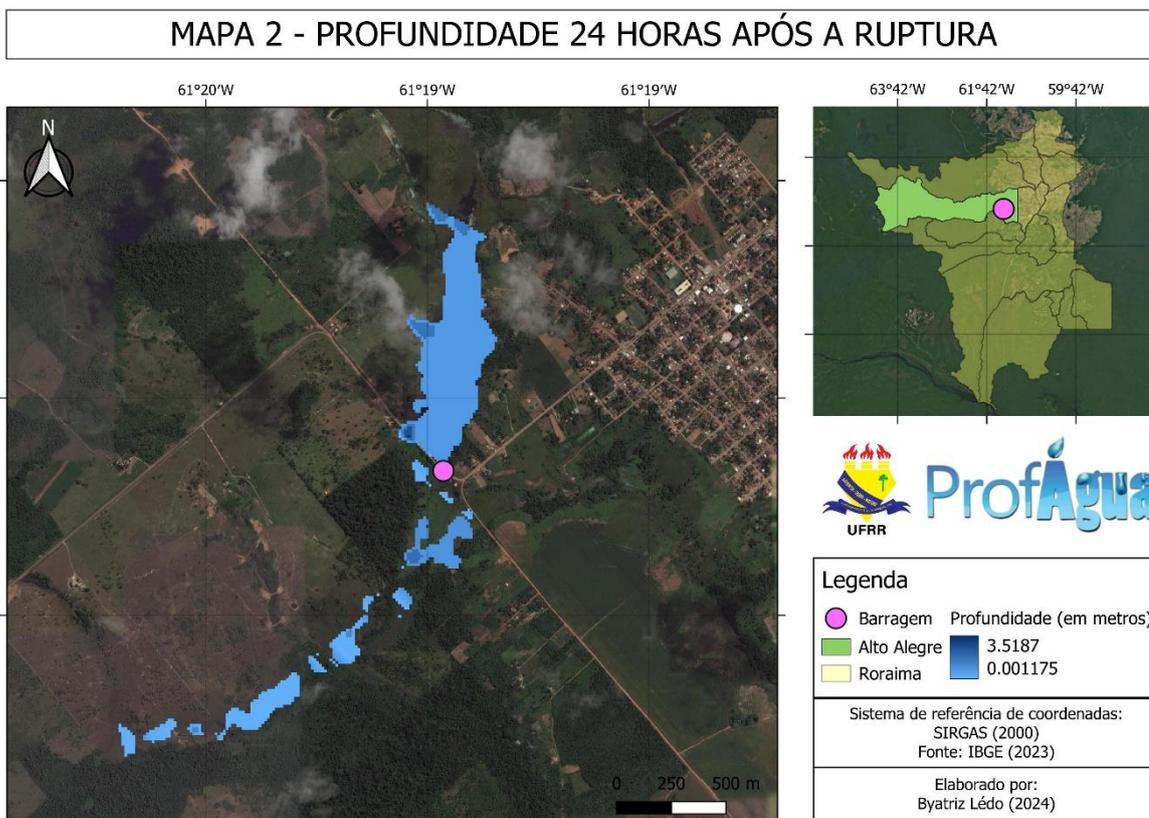
XU, Y.; ZHANG, L. M. Breaching Parameters for Earth and Rockfill Dams. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 135, n. 12, p. 1957-1970, 2009.

## **APÊNDICE A – MAPAS**

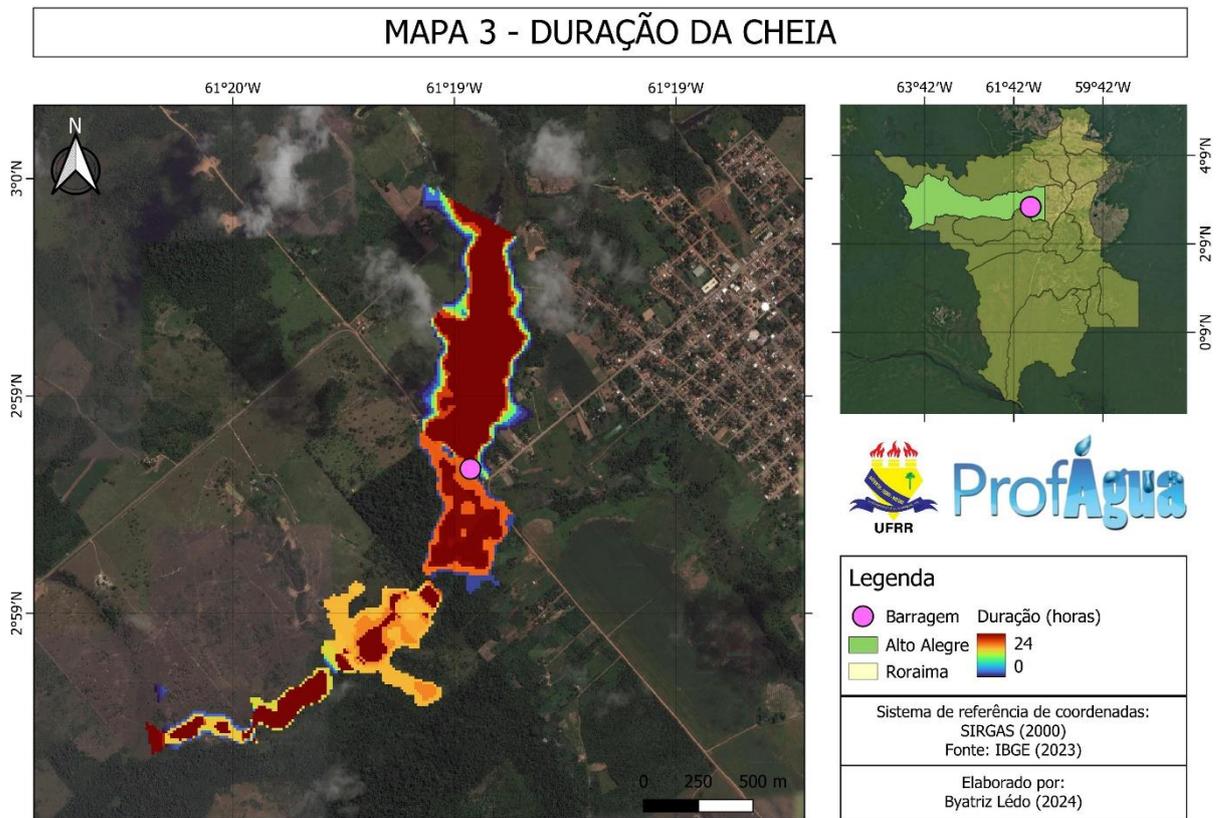
# MAPA 1 – PROFUNDIDADE NO MOMENTO DA RUPTURA



# MAPA 2 – PROFUNDIDADE APÓS 24 HORAS DA RUPTURA



# MAPA 3 – DURAÇÃO DA CHEIA



# MAPA 4 – VELOCIDADE NO MOMENTO DA RUPTURA

