



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

Iany Vanessa Costa Da Silva

Análise de Susceptibilidade à Inundação por DAM BREAK: Estudo Comparativo entre as
Ferramentas HAND e HEC-RAS

ANGICOS

2024

Iany Vanessa Costa Da Silva

Análise de Susceptibilidade à Inundação por DAM BREAK: Estudo Comparativo entre as Ferramentas HAND e HEC-RAS

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Luís Henrique Gonçalves Costa,
Prof. Dr.

ANGICOS

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

D586a DA SILVA, IANY VANESSA COSTA.
Análise de Susceptibilidade à Inundação por DAM
BREAK: Estudo Comparativo entre as Ferramentas
HAND e HEC-RAS / IANY VANESSA COSTA DA SILVA. -
2024.
55 f. : il.

Orientador: Luís Henrique Gonçalves Costa.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2024.

1. barragem. 2. inundações. 3. rompimento. 4.
geoprocessamento. I. Costa, Luís Henrique
Gonçalves, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte
CRB: 15/673

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Iany Vanessa Costa Da Silva

Análise de Susceptibilidade à Inundação por DAM BREAK: Estudo Comparativo entre as Ferramentas HAND e HEC-RAS

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 23 / 10 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

Luís Henrique Gonçalves Costa, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Kleber Cavalcanti Cabral, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Osvaldo Nogueira de Sousa Neto, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por me dar força e sabedoria ao longo de toda essa caminhada acadêmica.

Gostaria de expressar minha gratidão ao meu orientador, Professor Dr. Luís Henrique Gonçalves Costa, pela paciência, orientação e dedicação em cada etapa deste trabalho. Sua experiência e disponibilidade foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus familiares, especialmente aos meus avós, por todo o apoio, incentivo e confiança que sempre depositaram em mim. Sem o suporte de vocês, esta conquista não seria possível.

À minha mãe, que mesmo sem saber, me traz exemplo de força e coragem todos os dias.

Um agradecimento especial aos colegas e amigos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, seja com palavras de encorajamento ou com auxílio nos momentos de dificuldade.

Mudar o passado? Não há nada para consertar.

Deadpool e Wolverine (Filme)

RESUMO

Em 2010, foi aprovada no Brasil a Lei nº 12.334, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) com o objetivo de garantir a segurança e integridade estrutural dessas infraestruturas. Em 2020, a Lei nº 14.066 trouxe novas exigências, como a criação obrigatória de Planos de Ações de Emergência (PAE) para barragens classificadas com alto e médio potencial de dano, visando à mitigação de riscos. No entanto, a ausência de diretrizes específicas para estudos de rompimento compromete a padronização e eficácia desses planos. Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo entre os modelos HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) e HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*) para modelagem de suscetibilidade à inundação por rompimento da barragem Esguicho, situada em Ouro Branco, RN. A metodologia consistiu na aplicação dos modelos para simular as áreas de risco de inundação, utilizando dados topográficos e hidrológicos da região. Os resultados mostraram que o modelo HAND, apesar de sua simplicidade e baixo custo computacional, é eficaz para avaliações preliminares, enquanto o HEC-RAS, com uma análise hidrodinâmica mais detalhada, proporciona previsões precisas e detalhadas das áreas de inundação. A análise comparativa permitiu avaliar a adequação de cada modelo para a elaboração de PAEs mais padronizados e eficazes. Conclui-se que a combinação dos modelos HAND e HEC-RAS pode oferecer uma abordagem integrada e robusta para a gestão de riscos e o desenvolvimento de Planos de Ações de Emergência de qualidade em barragens.

Palavras-chave: barragem; inundações; rompimento; geoprocessamento.

ABSTRACT

In 2010, Brazil passed Law No. 12.334, which established the National Dam Safety Policy (PNSB) with the aim of guaranteeing the safety and structural integrity of these infrastructures. In 2020, Law No. 14.066 introduced new requirements, such as the mandatory creation of Emergency Action Plans (PAE) for dams classified with high and medium damage potential, with the aim of mitigating risks. However, the lack of specific guidelines for dam failure studies compromises the standardization and effectiveness of these plans. The aim of this work is to carry out a comparative study between the HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) and HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*) models for modeling susceptibility to flooding due to a breach of the Esguicho dam, located in Ouro Branco, RN. The methodology consisted of applying the models to simulate the areas at risk of flooding, using topographical and hydrological data from the region. The results showed that the HAND model, despite its simplicity and low computational cost, is effective for preliminary assessments, while HEC-RAS, with a more detailed hydrodynamic analysis, provides accurate and detailed forecasts of flood areas. The comparative analysis made it possible to assess the suitability of each model for drawing up more standardized and effective EAPs. It is concluded that the combination of the HAND and HEC-RAS models can offer an integrated and robust approach to flood management.

Keywords: dam; floods; breach; geoprocessing.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	–	Matriz de classificação, Anexo I da Resolução de N° 121 da ANA.....	39
Quadro 2	–	Classificação da Barragem Esguicho quanto ao Dano Potencial Associado.....	40
Quadro 3	–	Classificação da Barragem quanto à categoria de risco.....	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Processo de XYZ	16
Figura 2	–	Gestão deXYZ.....	21
Figura 3	–	Áreas definidas para XYZ	23
Figura 4	–	Gestão do XYZ	37
Figura 5	–	Sistema de XYZ	46

LISTA DE MAPAS

Mapa 1	–	Barragem Esguicho, histórico do volume do espelho d'água em 5 anos (2012 a 2017).....	16
Mapa 2	–	Mapa da Sub Bacia Esguicho da cidade de Ouro Branco/RN, situada na Bacia Piranhas Açu.....	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Características geométricas e de volume da barragem Esguicho/RN.....	30
----------	---	--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
BHO	Base Hidrográfica Ottocodificada
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CNEM	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DEM	Modelo Digital de Elevação (Digital Elevation Model)
GIS	Sistema de Informação Geográfica (Geographic Information System)
HAND	Altura Acima da Drenagem mais próxima (Height Above the Nearest Drainage)
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center - River Analysis System
ICOLD	Comissão Internacional de Grandes Barragens (International Commission on Large Dams)
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INPA	Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
LIDAR	Light Detection and Ranging
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital do Terreno
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PAE	Plano de Ação de Emergência
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
QGIS	Sistema de Informação Geográfica de Código Aberto
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	Objetivo geral.....	16
2.2	Objetivos específicos.....	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
3.1	Barragens	17
3.2	Enchentes e Inundações	20
3.3	Causas de rupturas de barragem.....	21
3.4	Órgãos fiscalizadores.....	23
3.5	Plano de Segurança de Barragens – PNSB.....	23
3.6	Modelos Hidrodinâmicos.....	24
3.6.1	Modelo Height Above the Nearest Drainage – HAND	24
3.6.2	HEC-RAS.....	27
4	METODOLOGIA.....	30
4.1	Área de Estudo	30
4.2	Coleta e tratamento de dados topográficos	32
4.3	Aplicação do modelo HAND.....	35
4.4	Aplicação do Modelo Parâmetro – HEC RAS.....	39
5	RESULTADOS	42
5.1	Resultados da aplicação do Modelo HAND	42
5.2	Resultados da aplicação do Modelo HEC-RAS.....	45
5.3	Comparação entre HAND e HEC-RAS.....	47
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

A segurança de barragens tornou-se um tema de crescente preocupação tanto no Brasil quanto no mundo, especialmente devido ao aumento dos incidentes envolvendo o rompimento dessas estruturas ao longo das últimas décadas.

A criação da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei nº 12.334/2010 e alterada pela Lei nº 14.066/2020, foi uma resposta do governo brasileiro para melhorar a segurança e a fiscalização de barragens, buscando prevenir incidentes por meio de normas técnicas e de fiscalização rigorosa.

No entanto, ainda há muito a ser feito, principalmente em termos de padronização de estudos de rompimento e aprimoramento das ferramentas de modelagem. Da Silva (2020), cita que o aproveitamento de dados altimétricos provenientes de modelos topográficos são fundamentais nas análises sobre estudos de desastres.

Atualmente o SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) tem sido o dado mais utilizado para representar o relevo de uma determinada região, a partir da obtenção do Modelo Digital do Terreno (MDT) (Pires & Borma, 2013).

A análise dos MDTs possibilitou o desenvolvimento de diversos descritores numéricos de paisagem, principalmente no que tange às questões hidrológicas, a qual é possível identificar áreas de captação, vazão, caminho da água, área de contribuição e redes de drenagem (NOBRE, 2011).

Nesse contexto, a simulação de eventos de ruptura de barragens tornou-se uma ferramenta crucial para a caracterização de áreas suscetíveis a inundações e a redução de ameaças potencialmente fatais. Os modelos HAND e HEC-RAS duas ferramentas muito utilizadas para essas análises.

O HAND mede a diferença altimétrica entre qualquer ponto da grade do MDT e o respectivo ponto de escoamento na drenagem mais próxima, considerando a trajetória superficial de fluxo (flowpath) que liga topologicamente os pontos da superfície com a rede de drenagem. O resultado é uma grade que representa a normalização do MDT com relação à drenagem (Pires e Borma, 2013).

De acordo com Goerl et al (2017), o modelo HAND foi proposto primeiramente por Rennó et al (2008) para mapear áreas suscetíveis a inundações no município de Igrejinha – RS, e avaliar a influência da resolução do MDT sobre o seu desempenho.

O HEC-RAS 2D disponibiliza cinco diferentes metodologias para aplicações com fluidos, das quais quatro são para fluidos não-Newtonianos, são eles: Método de Bingham,

Equação Quadrática de O'Brien, Método Clástico e Método de Herschel-Bulkley (De Menezes, 2023).

Heimhuber, Hannemann e Rieger (2015) utilizaram o HEC-RAS para simulação em Onaville, uma cidade do interior do Haiti que foi construída inicialmente por refugiados da capital Porto Príncipe. A simulação foi realizada para conhecer uma possível área de abrangência da inundação. O resultado desse trabalho foi utilizado por uma Organização Não Governamental (ONG) para a realização de treinamentos com a população e de planos de riscos para a cidade.

Diante desse cenário, este trabalho visa aprofundar a análise da suscetibilidade à inundação por rompimento de barragens, por meio de um estudo comparativo entre as ferramentas HAND e HEC-RAS, aplicado à barragem Esguicho, localizada no município de Ouro Branco, Rio Grande do Norte.

Ao comparar os resultados desses modelos, espera-se contribuir para uma melhor compreensão dos riscos associados ao rompimento de barragens, além de fornecer subsídios técnicos para a elaboração de Planos de Ação Emergenciais (PAEs) mais eficazes, capazes de proteger a vida humana e o meio ambiente.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral gerar manchas de inundação através de um modelo hidrodinâmico detalhado, o HEC-RAS, e em um modelo topográfico simplificado, o HAND, para analisar de forma comparativa a suscetibilidade à inundação decorrente do rompimento da Barragem Esguicho, localizada no município de Ouro Branco, RN.

2.2 Objetivos específicos

- Apresentar dados topográficos da área de estudo.
- Aplicar o modelo HAND para análise de suscetibilidade à inundação.
- Aplicar o modelo HEC-RAS para análise de suscetibilidade à inundação.
- Comparar os resultados obtidos pelos modelos HAND e HEC-RAS.
- Validar a precisão e eficácia dos modelos para previsão de áreas de risco.

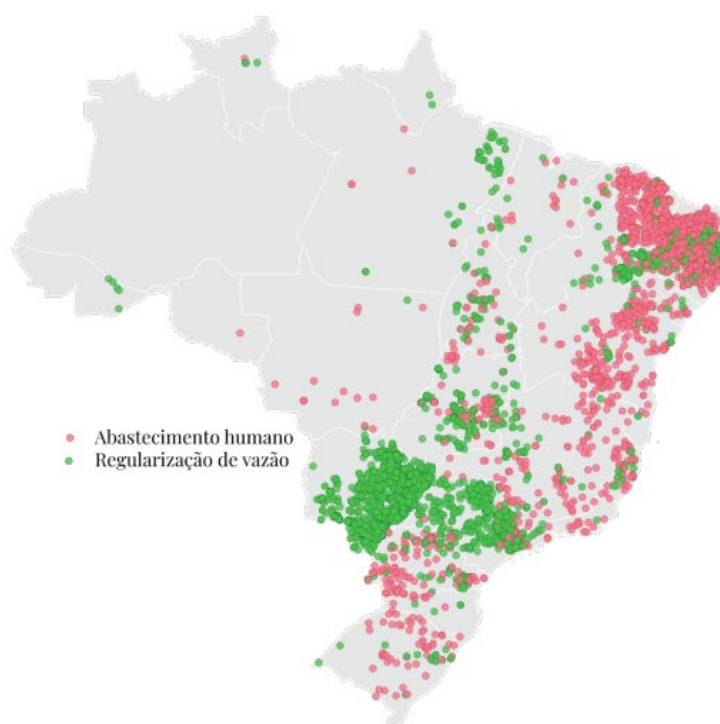
3 REFERENCIAL TEÓRICO

A construção do referencial teórico busca embasar os conceitos relacionados a barragens, especificamente, para reserva de água, processos de inundações e enchentes, causas de ruptura de barragens, órgãos de fiscalização, elaboração de plano de segurança de barragens e os modelos HAND e HEC-RAS.

3.1 Barragens

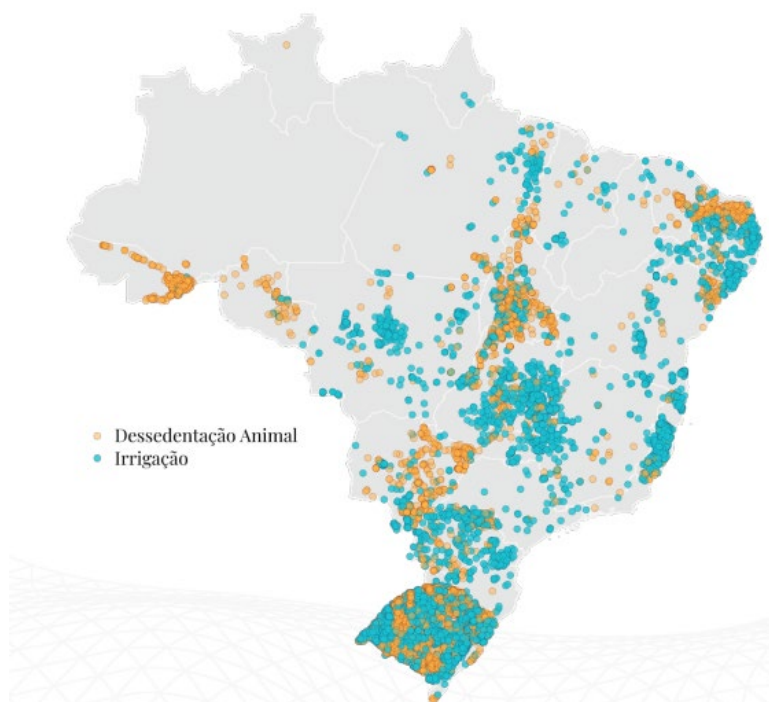
Segundo a ANA (2021), a maioria das barragens no Brasil são destinadas à acumulação de água, cujo objetivo principal é obter uma reserva hídrica para o consumo durante os períodos de estiagem. Entre os principais usos da água estão: irrigação, dessedentação animal, regularização de vazão e controle de cheias, abastecimento humano, aquicultura e geração de energia elétrica (Figuras 1 e 2).

Figura 1 – SNISB: Distribuição geográfica das barragens com uso principal para Abastecimento Humano e Regularização de Vazão.



Fonte: SNISB (2024).

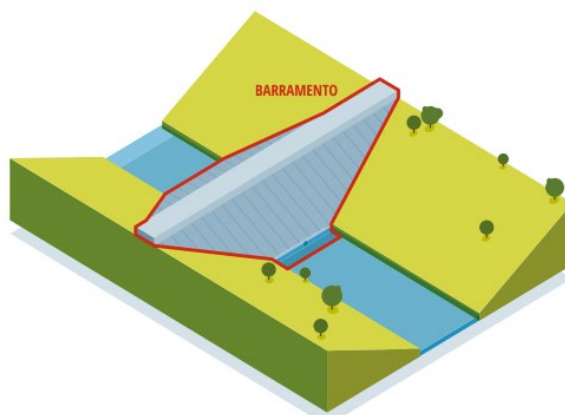
Figura 2 – SNISB: Distribuição geográfica das barragens com uso principal para Dessedentação Animal e Irrigação.



Fonte: SNISB (2024).

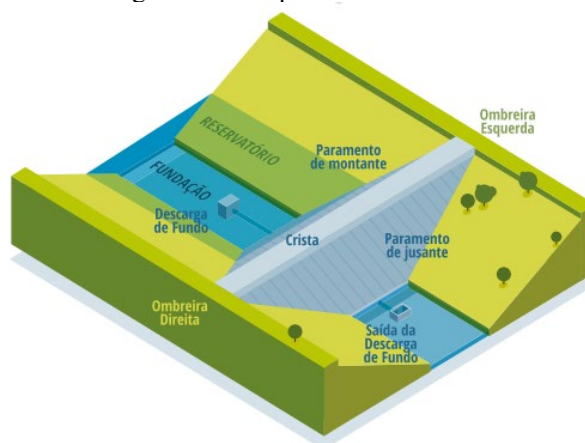
De acordo com Airolti (2020 *apud* Brasil, 2022), barragem é uma estrutura que pode ser construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos. Os componentes principais de uma barragem convencional, conforme definição dada por ANA (2020) são: a estrutura de retenção ou barramento, a sua fundação e as ombreiras, a zona vizinha a jusante, as estruturas extravasoras, as estruturas de adução e o reservatório. As estruturas podem ser localizadas nos esquemas da Figura 3, 4 e 5.

Figura 3 – Estrutura de Barramento.



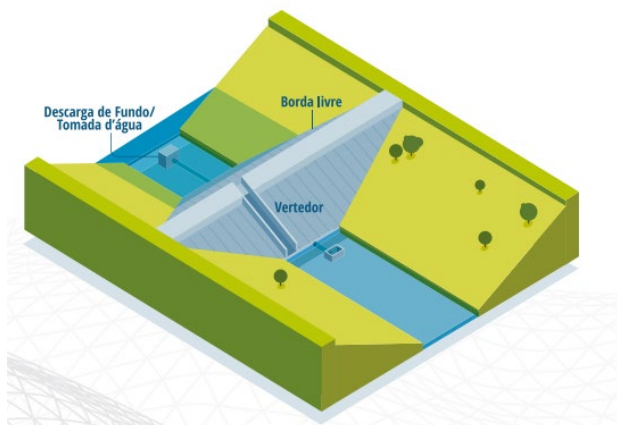
Fonte: Relatório de Segurança de Barragens (ANA, 2021).

Figura 4 – Componentes do barramento.



Fonte: Relatório de Segurança de Barragens (ANA, 2021).

Figura 5 – Estruturas extravasoras do barramento.



Fonte: Relatório de Segurança de Barragens, (ANA, 2021).

Ademais, a Lei Federal 12.334 de Setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, alterada pela Lei 14.066 de Setembro de 2020, abrange barragens como aquelas que apresentem pelo menos um dos seguintes critérios de classificação (Brasil, 2010):

- I - altura do maciço, medida do encontro do pé do talude de jusante com o nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 (quinze) metros;
- II - capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³ (três milhões de metros cúbicos);
- III - reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- IV - categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 7º desta lei;
- V - categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador, conforme definido no art. 7º desta lei.

O Comitê Brasileiro de Barragens – CBDB (2010) define barragem como uma estrutura construída transversalmente a um curso d'água, com a finalidade de represar e/ou elevar o nível da água, formando um reservatório artificial.

Para a ANA (2020), os componentes principais de uma barragem (Figuras 3, 4 e 5):

- a) Reservatório – local de acumulação de água, substância líquida ou mistura de líquidos e sólidos;
- b) Barramento – estrutura construída transversalmente ao curso de água que, com a fundação e as ombreiras, retém o conteúdo do reservatório. Em sua grande maioria possui forma de trapézio, essa estrutura pode ser executada com diferentes materiais, como aterro (terra, enrocamento, rejeitos), concreto (convencional, ciclópico, compactado com rolo), alvenaria, e outros;
- c) Fundação – parte do barramento em contato com o terreno natural;
- d) Talude (ou parâmetro) de montante – parte do barramento em contato com o reservatório;
- e) Talude (ou parâmetro) de jusante – paramento do lado oposto ao talude de montante, ligeiramente anterior ao curso d'água;
- f) Crista (ou coroamento) – topo do barramento, que liga transversalmente as duas margens;
- g) Ombreiras – são as zonas das margens em contato direto com o barramento. Vistas por um observador posicionado a montante, a estrutura do lado direito é denominada ombreira direita, da mesma forma que a ombreira esquerda, do lado esquerdo;
- h) Vertedouros de superfície – são estruturas extravasoras para a evacuação de cheias;
- i) Descargas de fundo – são estruturas para esvaziamento do reservatório, na sua grande maioria, um conduto inserido na fundação da barragem;
- j) Borda livre - diferença entre a cota do coroamento da barragem e o nível máximo maximorum (nível máximo que se prevê que a água atinja durante uma cheia)
- k) Tomada d'água – conduto que permite captar a água do reservatório.

3.2 Enchentes e Inundações

A enchente, que também é chamada de cheia, é o processo de elevação da vazão causado pelo aumento do escoamento superficial e que geralmente acontece em decorrência de precipitações com altas intensidades, enquanto a inundação ocorre quando um canal extravasa para suas áreas marginais de forma que o escoamento atinge o leito maior do mesmo (DOS SANTOS, 2021).

Enchente corresponde à elevação temporária do nível de água em um canal de drenagem desencadeado geralmente por precipitações intensas. As inundações são caracterizadas pelo extravasamento do canal de drenagem para áreas marginais, ocupando o leito maior. A impermeabilização de bacias hidrográficas no perímetro urbano aliado aos altos índices de pluviosidade do verão eleva o escoamento superficial das águas pluviais, aumentando o nível de rios e desencadeando processos hidrológicos extremos (TAOFIK et al., 2017).

Segundo Silva e Lima (2021), as cheias lentas ou aluviais geralmente correspondem a períodos cíclicos de precipitação, que podem ser identificados por sua sazonalidade e são

causados por chuvas duradouras e de intensidade moderada. Nesse caso, as águas sobem de forma previsível e gradual, e o nível do canal se mantém temporariamente elevado e depois escoam paulatinamente. As inundações causadas por esse tipo de cheia podem atingir grandes planícies de inundação e provocar grandes danos.

De acordo com o Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR) (2007), as inundações são causadas pelo fluxo de grandes quantidades de água que, ao transbordarem dos leitos dos rios, lagos, canais e áreas represadas, invadem os terrenos adjacentes, provocando danos. As inundações podem ser classificadas em função da magnitude e da evolução.

- Em função da magnitude, as inundações, através de dados comparativos de longo prazo, são classificadas em: inundações excepcionais, inundações de grande magnitude, inundações normais ou regulares e inundações de pequena magnitude.
- Em função da evolução, as inundações são classificadas em: enchentes ou inundações graduais, enxurradas ou inundações bruscas, alagamentos e inundações litorâneas provocadas pela brusca invasão do mar.

3.3 Causas de rupturas de barragem

Dorta (2023) cita que apesar das vantagens obtidas com o uso de barragens, elas também podem ser vistas como uma fonte de perigo potencial quando analisada a possibilidade de seu rompimento.

Nos casos de ruptura, há um acréscimo significativo da vazão em trânsito no trecho de jusante e, por consequência, uma área extensa estará sujeita a ocorrência de inundação e ao aumento da velocidade de escoamento (MELO, 2013; ROCHA, 2015).

Airoidi (2022) cita que após analisar publicações da *International Commission On Large Dams* (ICOLD) – Comissão Internacional de Grandes Barragens, concluiu que as causas mais frequentes de ruptura são:

- a) a insuficiente capacidade de vazão ou o mau funcionamento dos equipamentos de descarga de cheias (incluindo a deficiente avaliação da vazão de dimensionamento, a incorreta utilização dos critérios de dimensionamento hidráulico e o não funcionamento das comportas), representando cerca de 42% do número total de rupturas de barragens; b) as relacionadas com as fundações (percolação, erosão interna), com as erosões localizadas e com o deficiente comportamento estrutural, representando cerca de 23% das rupturas (RAMOS E MELO, 2006 *apud* COLLE 2008).

De acordo com Menezes (2023), é possível citar duas origens de causas que levam uma barragem a romper: ocorrência de um fenômeno natural, o qual foi responsável por gerar um abalamento na estrutura e sua consequente ruptura, ou um mal planejamento da barragem. A seguir apresentam-se os principais mecanismos que podem levar o barramento a ruptura.

O galgamento, é um fenômeno que acontece quando o nível d'água do reservatório de uma barragem ultrapassa a cota de sua crista. Geralmente, são ocasionados devido às chuvas muito intensas, que produzem as cheias dos cursos fluviais, e excedem a capacidade de extravasão do vertedouro da barragem (ENGECORPS, 2012).

O rompimento de uma barragem localizada a montante também pode ser uma das causas que levam ao galgamento, visto que a barragem à jusante se torna incapaz de laminar e verter todo volume advindo dessa barragem, elevando o nível de seu reservatório acima do coroamento, e assim provocando uma ruptura em cascata (ENGECORPS, 2012).

Geralmente, esse problema é potencialmente perigoso para barragens compostas de material inconsolidado, como as barragens de terra. Segundo Soares (2010), o galgamento pode ser causado por fortes chuvas, provocando uma cheia extraordinária que o vertedouro não seja capaz de extravasar toda a água.

A instabilidade do talude, por outro lado, é um mecanismo que engloba acidentes nos quais as cargas atuantes são superiores aos esforços resistentes do maciço. Em aterros essa instabilidade é exibida por meio dos deslizamentos, sejam através do aterro, ou ainda por meio do conjunto aterro/fundação (Guidicini; Sandroni; Mello, 2021a).

Para Lima (2016), o pipping é o processo de erosão interna que avança de jusante para montante na forma de um tubo, iniciando sob condições de gradiente hidráulico elevado (Figura 6). Filho (2013) cita que o processo de erosão interna acontece em decorrência do carreamento de partículas de solo do maciço de uma barragem ou de sua fundação, devido ao fluxo de percolação existente.

Figura 6: Processo de erosão interna, pipping.



Fonte: Lima (2016).

Segundo Dorta (2023), o mecanismo de percolação leva em consideração a identificação da trajetória que a água percorre através do barramento. Essa trajetória pode ocorrer no interior do aterro da barragem, em interfaces, sejam elas aterro/fundação ou aterro/concreto, ou ainda através das fundações.

3.4 Órgãos fiscalizadores

A fiscalização das barragens, conforme definido pela Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 e atualizada pela Lei 14.066, de 30 de setembro de 2020, compete aos órgãos fiscalizadores – que, segundo Brasil (2010), são as autoridades do poder público responsáveis pelas ações de fiscalização da segurança da barragem de sua competência.

De acordo com o relatório de segurança de barragens (ANA, 2021), as barragens no Brasil são fiscalizadas por diversos órgãos públicos, a depender do uso prioritário da barragem e do domínio do corpo d'água em que ela se encontra.

Conforme o uso da barragem:

- Gerar energia hidrelétrica: a ANEEL;
- Conter rejeitos de mineração: a ANM;
- Rejeitos nucleares: o CNEM;
- Conter resíduos industriais: o órgão ambiental que concedeu as licenças de instalação e operação dos empreendimentos.

Conforme o domínio do corpo d'água em que a barragem se encontra:

- Acumular água em rio de domínio da União: a ANA;
- Acumular água em rio estadual ou distrital: o órgão gestor de recursos hídricos respectivo.

Esses agentes enviam informações à ANA, que é responsável por compilar anualmente os dados nos Relatórios de Segurança de Barragens e disponibilizar as informações no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. Ambos os documentos estão acessíveis a qualquer membro da sociedade civil por meio do site da Agência.

3.5 Plano de Segurança de Barragens – PNSB

O Plano de Segurança de Barragens (PNSB), instituído pela Lei nº 12.334/2010, tem como um de seus principais objetivos reduzir o risco de acidentes em barragens por meio de inspeções, monitoramento e manutenção preventiva. Entre as obrigações impostas aos empreendedores responsáveis por barragens, destaca-se a necessidade de prever cenários de rompimento e suas consequências (Brasil, 2010).

O PAE (Plano de Ação de Emergência) é um documento formal, a ser elaborado pelo Empreendedor, no qual deverão ser estabelecidas as ações a serem executadas pelo mesmo em caso de emergência, bem como identificados os agentes a serem notificados dessa ocorrência (Art. 12 da Lei nº 12.334/2010).

O PAE deverá contemplar, pelo menos: i) identificação e análise das possíveis situações de emergência; ii) procedimentos para identificação e notificação de mau funcionamento ou de condições potenciais de ruptura da barragem; iii) procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados em situações de emergência, com indicação do responsável pela ação; e iv) estratégia e meio de divulgação e alerta para as comunidades potencialmente afetadas em situação de emergência (Art. 12 da Lei 12.334/2010).

De acordo com o Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens (ANA, 2016), volume IV, para avaliar os danos no vale a jusante é necessário determinar as zonas que vão ficar inundadas pela cheia provocada pela ruptura da barragem, afetando a população, instalações, infraestruturas e ambiente. Trata-se de um estudo que se baseia, essencialmente, na simulação da cheia induzida. Em geral são usados nesta avaliação modelos hidrodinâmicos.

3.6 Modelos Hidrodinâmicos

A modelagem Hidrodinâmica tem por objetivo o estudo do movimento dos fluidos. Os modelos são ferramentas utilizadas para representar processos e elaborar prognósticos (Dos Santos, 2015).

Nos modelos hidrodinâmicos, esta simulação obriga, na prática, à modelagem não só do processo de propagação da cheia ao longo do vale a jusante como ainda do processo de formação da cheia, compreendendo o desenvolvimento da brecha de ruptura e o hidrograma efluente da mesma (ANA, 2016).

3.6.1 Modelo Height Above the Nearest Drainage – HAND

Desenvolvido no INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, o descritor de terrenos HAND – *Height Above the Nearest Drainage* (Nobre et al., 2010; Rennó et al., 2008) insere na compreensão da paisagem uma abordagem que relaciona hidrologia e geomorfologia através da normalização de dados topográficos (Rodrigues et al., 2011).

O modelo HAND é utilizado para identificar áreas de risco de inundação com base na elevação do terreno em relação ao canal de drenagem mais próximo. De acordo com Dos Santos (2015), o HAND que em português significa Altura Acima da Drenagem mais próxima é um aplicativo criado sob a liderança do pesquisador Carlos Donato Nobre, por um grupo de pesquisadores do INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia) e do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

O HAND normaliza o MDT com base na diferença entre a altitude do terreno e a altitude do canal de drenagem mais próximo. O princípio de funcionamento do modelo HAND é a determinação da variação altimétrica entre o canal e as células adjacentes, levando também em conta a distância entre a célula e o canal. Logo, quanto menor a variação altimétrica entre uma célula e o canal e quanto mais próximo de um canal, maior a susceptibilidade à inundação. Assim, as áreas de menor amplitude altimétrica em relação ao rio principal serão classificadas como alta susceptibilidade à inundação (Goerl, Michel, Kobiyama, 2017).

Nobre et al. (2011), explica que o algoritmo utiliza a diferença entre cada elemento da altitude extraída do MDT e o ponto mais próximo associado a rede de drenagem de referência, para determinar alturas relativas que possuam relação com a profundidade do lençol freático e com a topografia do terreno.

HAND é um algoritmo descritor do terreno que tem sido testado em classificação de solos, revelando forte correlação entre fatores relativos às condições de água no solo, nível do lençol freático e topografia. Utiliza um modelo numérico de terreno do tipo MDE (SRTM, Aster ou outro) para mapear a superfície, baseando-se na distância vertical à drenagem mais próxima. Desse modo, indica áreas suscetíveis a inundações pela análise dos desníveis topográficos e da proximidade relativa dos rios (CPRM, 2014).

Os dados inseridos são imagens de satélites, radar, lasers aerotransportas ou de satélites, desses produtos serão gerados os MDT's das áreas de interesse. Segundo Dos Santos (2015), o HAND utiliza informações topográficas dos MDT's para extrair as informações hidrológicas das áreas. O sistema do software calcula propriedades de alagamento e de outros desastres naturais. Ele compreende que desníveis relativos de até 5 m são áreas de maior probabilidade de inundação.

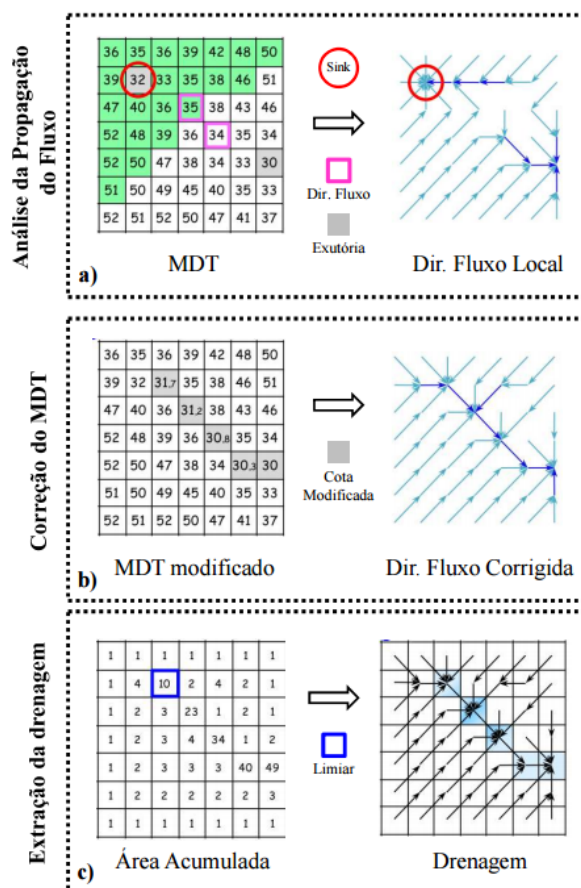
Nobre et al. (2011) e Rennó et al. (2008) explicam que a partir da rede de drenagem extraída do dado topográfico, a diferença entre cada elemento da grade MDE e o ponto mais próximo associado à rede de drenagem extraída dá origem ao modelo de superfície HAND, portanto o nível de referência deixa de ser fixo em relação ao mar e passa a ser relativo à rede de drenagem mais próxima.

Como qualquer outra característica hidrogeomorfológica obtida pela topografia, os resultados do HAND estão condicionados pela qualidade e resolução do MDT (Zhang & Montgomery 1994), visto que este é uma das principais variáveis de entrada do modelo.

Segundo Nobre et al., (2011), o primeiro estudo, que validou o algoritmo foi na Bacia do Igaparé, em uma área de estudo de 18.000 km², na parte inferior de captação do rio Negro, em Manaus. Os resultados obtidos desta validação demonstraram sua capacidade para mapear ambientes expansivos utilizando apenas dados topográficos adquiridos remotamente como entrada.

Dos Santos (2015) cita que o aplicativo HAND tem a proposta é ser um método barato e simples para a identificação de áreas de desastres como áreas de riscos de enchentes, onde não é necessária a ida dos pesquisadores a área de interesse para a extração das informações e o mapeamento.

Figura 7. Fluxograma dos passos necessários ao criar o raster HAND: (a) MDE corrigido; (b) Direção de fluxo; (c) Fluxo de acumulação; e (d) Raster com altura acima da drenagem mais próxima HAND.



Fonte: HidroAI (2024).

3.6.2 HEC-RAS

O software *Hydrologic Engineers Corps – River Analysis System* - HEC-RAS é um sistema que contém modelo unidimensional e bidimensional de fluxo hidráulico contínuo, desenvolvido pela *Hydrologic Engineering Center* (HEC). Este programa foi projetado para apoiar o Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (USACE) no gerenciamento dos recursos hídricos (HEC, 2024).

O HEC-RAS é um software gratuito, seu modelo unidimensional resolve as equações de Saint-Venant completas, por aplicação do método de diferenças finitas, permitindo simular o escoamento em superfície livre seja em regime permanente ou em não permanente (Dos Santos, 2015). O software HEC-RAS possui interface com a plataforma GIS, possibilitando a

elaboração dos mapas de inundação e permitindo obtenção de elevações do rejeito, volume e velocidade do fluxo e profundidade.

Heimhuber, Hannemann e Rieger (2015) utilizaram o HEC-RAS para simulação em Onaville, uma cidade do interior do Haiti que foi construída inicialmente por refugiados da capital Porto Príncipe. Segundo Dos Santos (2015), a simulação foi realizada para conhecer uma possível área de abrangência da inundação. O resultado desse trabalho foi utilizado por uma Organização Não Governamental (ONG) para a realização de treinamentos com a população e de planos de riscos para a cidade.

O HEC-RAS usa técnicas de roteamento de inundação propostas pelas equações de St. Venant para fluxo instável. As equações de fluxo instável de St. Venant 1-D de conservação de massa e conservação de momento são as seguintes:

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f - S_e \right) = 0 \quad (2)$$

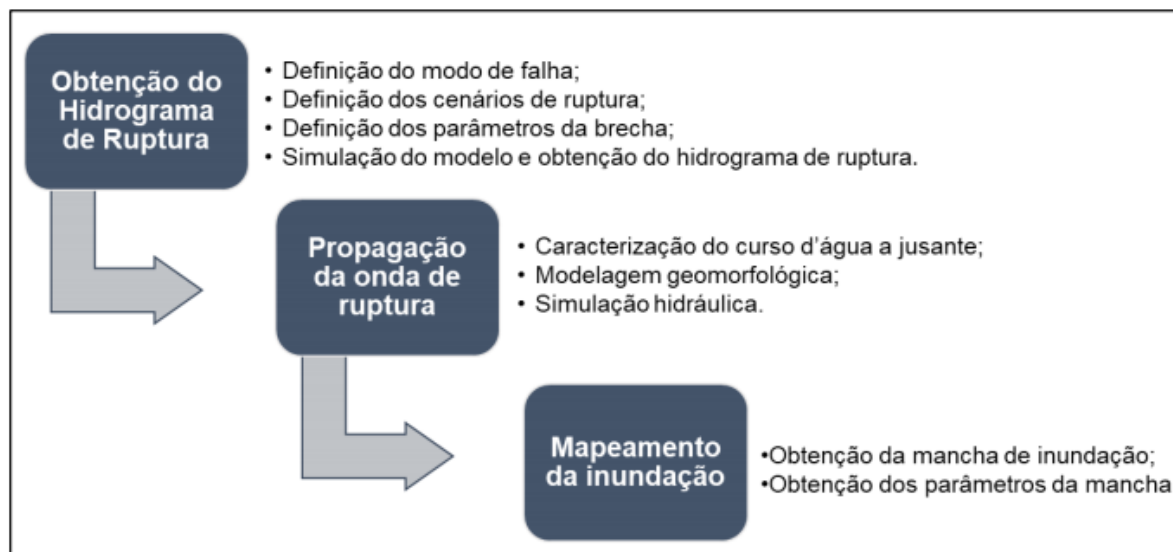
Onde Q é a vazão, A é a área total do fluxo, t é o tempo, z é a elevação da superfície da água acima da linha de referência, g é a aceleração devido à gravidade, S_f é a inclinação do atrito, S_e é a inclinação da expansão-contração. Eqs. (1), (2) (Bharath et al., 2021).

Para qualquer modelagem hidráulica, o requisito básico é a geometria do rio. Os dados da geometria do rio podem ser extraídos por pesquisa de campo ou por dados de sensoriamento remoto (Bharath, 2023).

Tanto Xiong (2011), quanto Ackerman e Brunner (2006) deixam claro a importância da avaliação da ruptura de barragens com o uso da ferramenta HECRAS.

Através do software é possível realizar simulações de rompimentos em barragens de rejeito e de água. Para isso é necessário conhecer as características geométricas do barramento e seu reservatório, as características da bacia de inundação e as características do curso d'água (Dos Santos & Da Silva, 2019). Na Figura 8, podemos visualizar as etapas para obtenção da mancha de inundação no HEC-RAS.

Figura 8: Etapas de um estudo de ruptura hipotética.



Fonte: Menezes (2023).

Dos Santos & Da Silva (2019), citam que um ponto importante para a simulação de rompimento é a definição da brecha, ou seja, o início do rompimento da estrutura. Os parâmetros geométricos da brecha são de suma importância no mapa de inundação, uma vez que exercem influência na vazão de pico e no tempo de formação dela.

Diante das capacidades e aplicações do HEC-RAS descritas por diversos autores, é possível afirmar que este software desempenha um papel fundamental no planejamento e gestão de riscos de rompimento de barragens, além de ser uma ferramenta indispensável para a simulação de inundações. Apesar de sua robustez técnica, a precisão dos resultados depende diretamente da qualidade dos dados geométricos e hidrológicos inseridos, destacando a importância da coleta detalhada de informações de campo.

4 METODOLOGIA

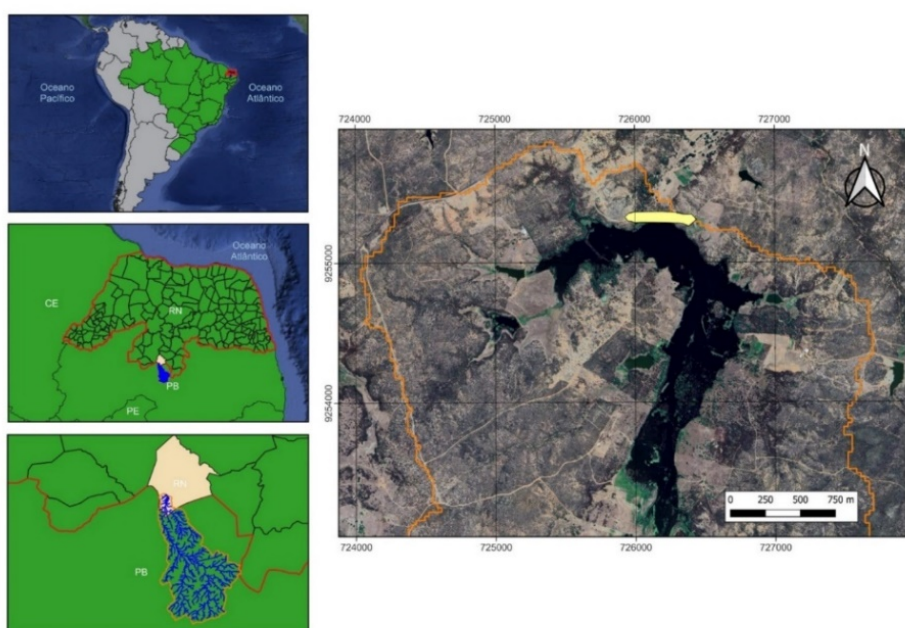
A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso aplicado à barragem Esguicho, localizada no município de Ouro Branco, Rio Grande do Norte. A metodologia empregada neste estudo foi baseada na coleta e análise de dados topográficos da área de estudo, aplicação dos modelos HAND e HEC-RAS, e comparação dos resultados obtidos por cada um dos modelos.

4.1 Área de Estudo

O reservatório Esguicho está localizado na bacia do Rio Piranhas – Açu, Estado do Rio Grande do Norte, Município de Ouro Branco. O barramento que forma a represa de água se encontra nas respectivas coordenadas geográficas Longitude: $36^{\circ}57'12,19''$ W e Latitude $6^{\circ}43'57,87''$ S, a aproximadamente 3 km a sudoeste do município e tem como empreendedor a prefeitura municipal de Ouro Branco-RN (IBGE, 2024).

A montante da barragem Esguicho existe a barragem Santa Luzia, na cidade de Santa Luzia na Paraíba, situada a aproximadamente 16 km e a jusante existe a barragem Itans, na cidade Caicó no Rio Grande do Norte, situada a aproximadamente 30 km. A localização da barragem pode ser vista na Figura 9.

Figura 9 – Localização do reservatório Esguicho, Ouro Branco/RN.



Fonte: Grupo Geotec – Campus Angicos (2024).

A Tabela 1 apresenta as características geométricas e de volume da barragem de Esguicho, de domínio público, em documentos da secretaria de recursos hídricos. Estes dados são os que balizam os planos de segurança das barragens.

Tabela 1 – Características geométricas e de volume da barragem Esguicho/RN.

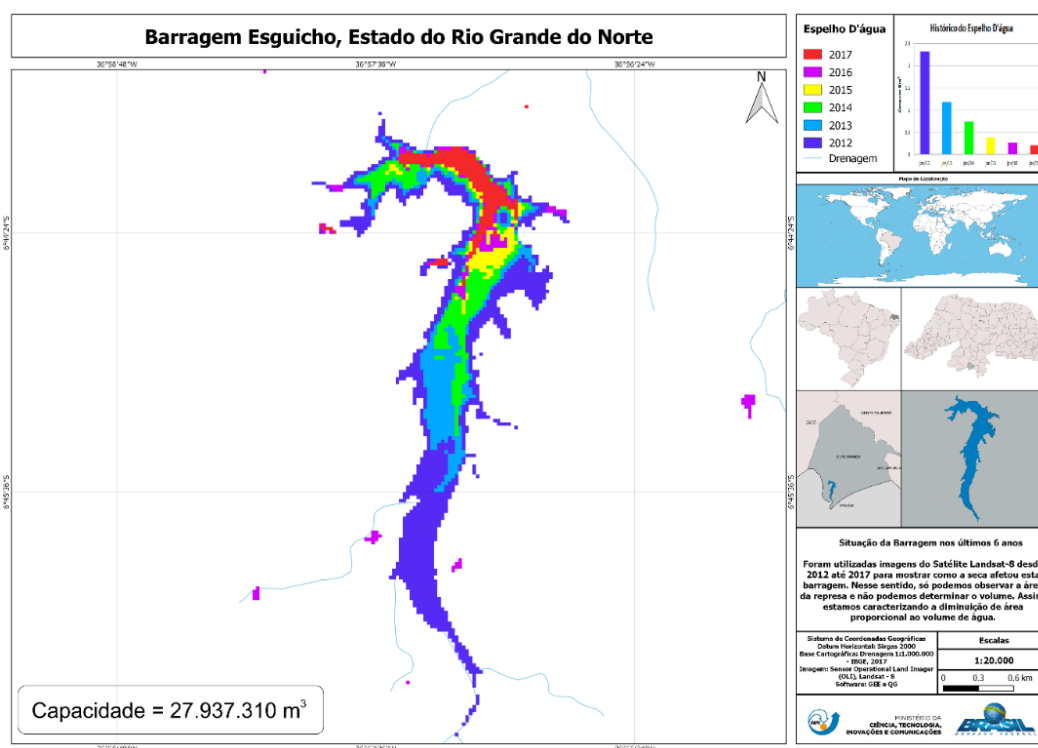
PARÂMETRO	VALOR
ÁREA DA BACIA DE CONTRIBUIÇÃO TOTAL	448,00 km ²
LARGURA MÁXIMA ESTABELECIDA PARA O SANGRADOURO	148,00 m
TIPO ESTABELECIDO DE SANGRADOURO	Canal
COTA DA SILEIRA DO VERTEDEURO	233,82 m
CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO	27.937.310,41 m ³

Fonte: ANA (2020).

O Mapa 1 ilustra o espelho d'água da barragem Esguicho ao longo de 5 anos (2012 a 2017), evidenciando as variações no nível de água. A análise desse mapa é essencial para compreender o comportamento hidrológico da barragem e identificar as áreas que historicamente apresentaram maior suscetibilidade à inundação.

Além disso, esses dados históricos servem como base para a calibração e validação dos modelos de simulação aplicados neste estudo.

Mapa 1: Barragem Esguicho, histórico do volume do espelho d'água em 5 anos (2012 a 2017).

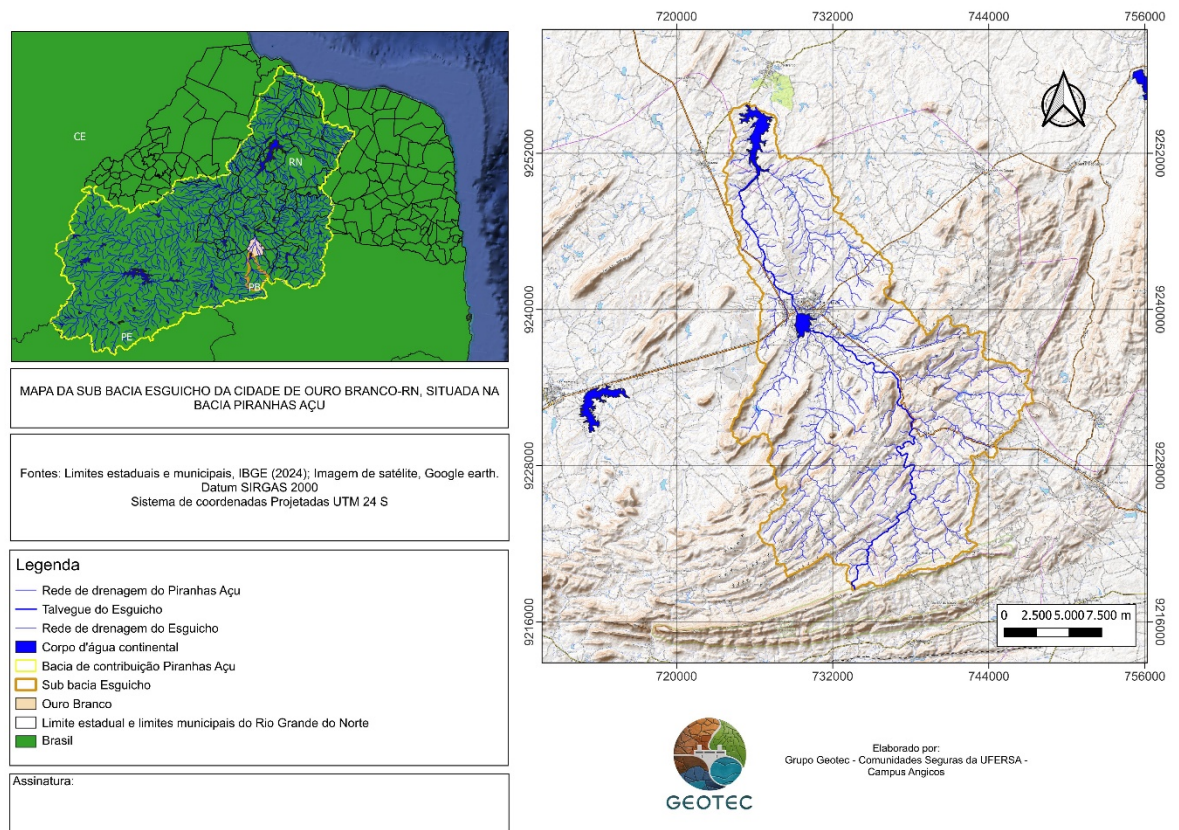


4.2 Coleta e tratamento de dados topográficos

Para a elaboração do mapa das áreas susceptíveis à inundação utilizou-se um MDE (Modelo Digital de Elevação) gerado a partir da área de estudo da sub bacia Esguicho (Figura 10).

Atualmente o SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) tem sido o dado mais utilizado para representar o relevo de uma determinada região, a partir da obtenção do Modelo Digital do Terreno (MDT). No Mapa 2, elaborado no levantamento aerofotogramétrico em Ouro Branco/RN, pode-se identificar a rede de drenagem da sub bacia esguicho.

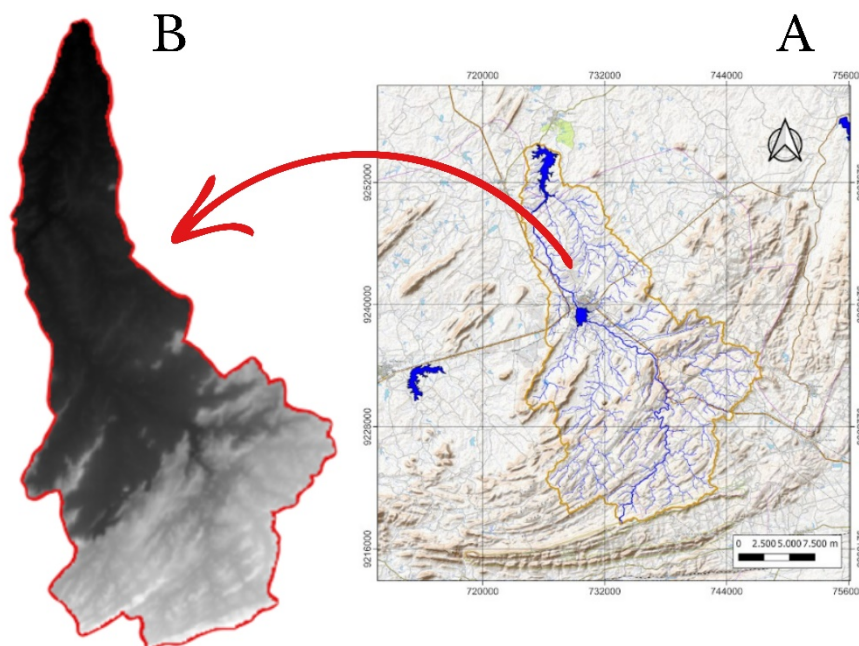
Mapa 2: Mapa da Sub Bacia Esguicho da cidade de Ouro Branco/RN, situada na Bacia Piranhas Açú.



Fonte: Grupo Geotec (2024).

O MDE SRTM 30m foi criado através do OpenTopography dentro da plataforma QGIS (Figura 10), a imagem raster foi georreferenciada no sistema de referência UTM, zona 24S.

Figura 10 – A – Área de estudo: Sub Bacia Esguicho e sua rede de drenagem; B – MDE gerado no QGIS da área de estudo.

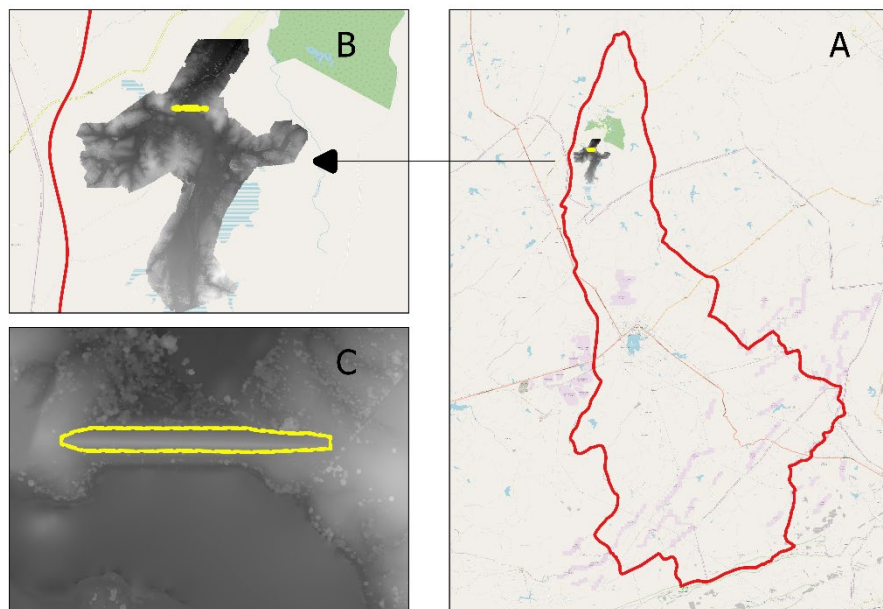


Fonte: Autoria Própria (2024), adaptado do Grupo Geotec (2024).

Além disso, foram criados MDE's complementares através do levantamento aerofotogramétrico *in loco* utilizando um veículo aéreo não tripulado (VANT) Dji Phantom 4 equipado com uma câmera de alta resolução. A coleta dessas imagens foi fundamental para a criação de um MDE mais acurado e adaptado às necessidades específicas do estudo.

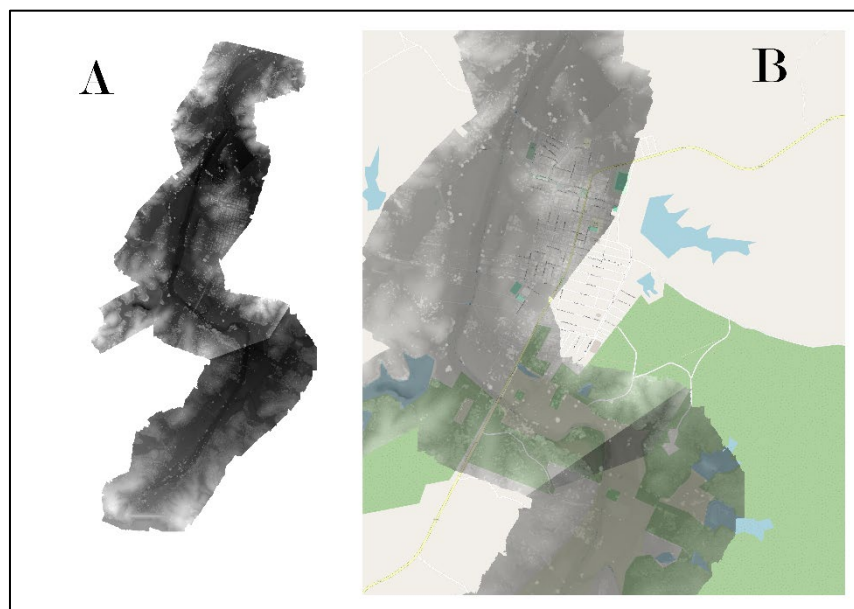
As imagens capturadas pelo VANT foram processadas no software Agisoft Metashape, que realiza o processamento fotogramétrico, gerando um DEM (Digital Elevation Model) de alta resolução a partir das fotos aéreas. Esse DEM (Figura 11 e 12) foi, então, utilizado no estudo para simular com maior precisão as áreas suscetíveis à inundação à jusante da barragem Esguicho.

Figura 11: A – Área de estudo da sub bacia Esguicho; B – MDE gerado a partir do levantamento aerofotogramétrico *in loco*; C – Localização da estrutura de barramento da Barragem Esguicho, Ouro Branco/RN.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 12: A - MDE gerado a partir do levantamento aerofotogramétrico *in loco*. B - Trecho do MDE e a cidade de Ouro Branco/RN.



Fonte: Autoria Própria (2024).

4.3 Aplicação do modelo HAND

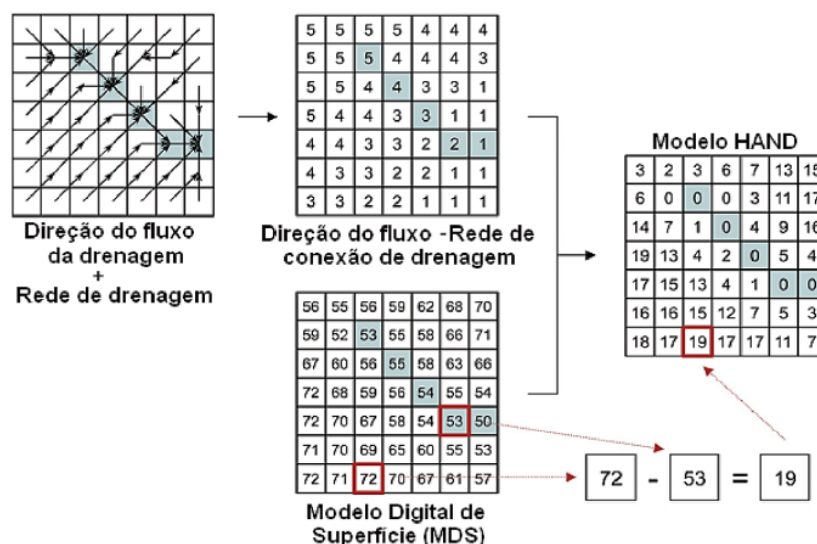
O algoritmo HAND parte do princípio de que a água faz o trajeto mais curto em relação aos terrenos mais baixos, computando as diferenças de desníveis entre o relevo e o talvegue das redes de drenagens superficiais (NOBRE et al., 2011a).

Como explica Silva (2020), para obter o modelo HAND, a primeira etapa é a correção hidrológica do MDT, a qual se elimina os “sinks” (depressões, áreas de drenagem interna e vazios ou erros do SRTM) para garantir a propagação do fluxo em todas as células.

Com isso, ao final da primeira etapa tem-se as direções de fluxo e o MDT modificado, um dos dados de saída do HAND. Em seguida, é gerado as áreas acumuladas de cada célula e a partir de um limiar mínimo estabelecido para iniciar o canal, a rede de drenagem é extraída do MDT (GOERL et al, 2017).

Na figura 13 é possível observar que o atributo de altitude de um determinado ponto é definido pela posição que este se encontra em relação ao curso d’água para o qual ele deságua, iniciando uma contagem a partir do zero e aumentando o valor na medida em que se distância da drenagem.

Figura 13: Cálculo do modelo HAND, os quadrados marcados representam à rede de drenagem.

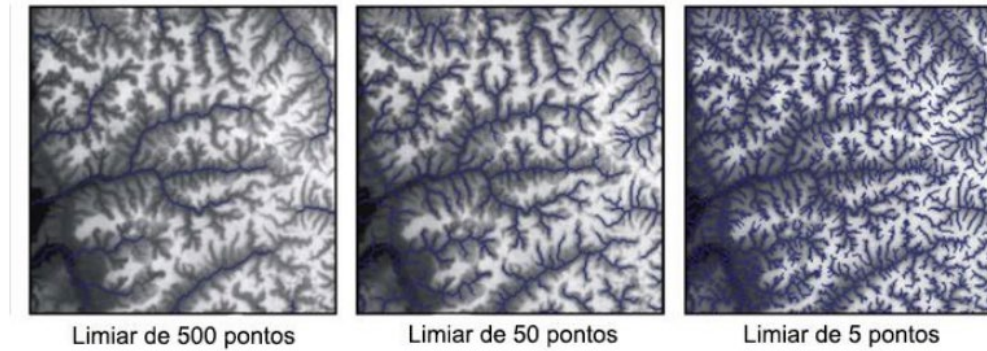


Fonte: MENG et al. (2016), adaptado de Rennó et al. (2008).

Algo importante no processo de extração é a sensibilidade da rede de drenagem. Segundo Rennó et al. (2008), a densidade da drenagem é um parâmetro importante no que diz respeito a precisão do HAND, por isso é necessário que esse parâmetro seja ajustado. Quanto

menor for o limiar de ajuste em pontos, maior será o detalhamento da densidade da drenagem e, quanto maior o limiar, menor o detalhamento da drenagem, conforme pode ser observado na Figura 14.

Figura 14: Diferentes drenagens extraídas de limites variados de contribuição em número de pontos.

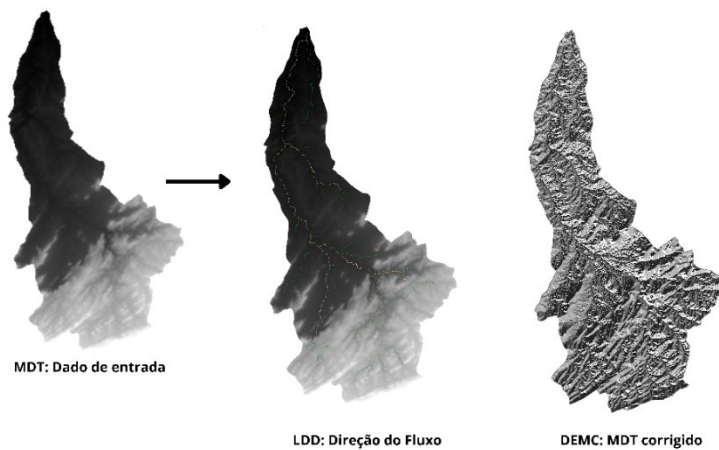


Fonte: Da Silva (2020), adaptado de Rennó et al., (2008).

O limiar representa áreas acumuladas da drenagem, sendo este um parâmetro definido pelo usuário. Os valores do limiar são uma contagem do número de pixels cujos fluxos da drenagem convergem para um pixel considerado. Seu valor modifica alguns parâmetros, como a densidade de drenagem da área de estudo (MENGUE et al., 2016).

Na primeira etapa, o HAND realiza correções de incoerências altimétricas no MDT adicionado e identifica as direções dos fluxos de drenagem, ou seja, a direção por onde a água possivelmente irá escoar no MDT (Figura 15).

Figura 15: Dados de entrada e saída na primeira etapa de análise no HAND.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Na segunda etapa, é calculada a área de acumulação de água. Ele calcula o quanto cada parte do terreno pode acumular água, um fator chave na previsão de inundação (Figura 16).

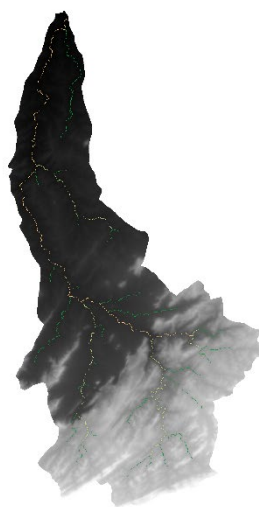
Figura 16: ACC: Fluxo de acumulação, dado de saída do HAND.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Na quarta etapa, é extraída a rede de drenagem a partir de um limiar de 5000 estabelecido. O limiar define o nível de detalhamento da rede de drenagem, ou seja, o acúmulo acima desse limiar é considerado drenagem (Figura 17).

Figura 17: DREN, rede de drenagem criada através do HAND.

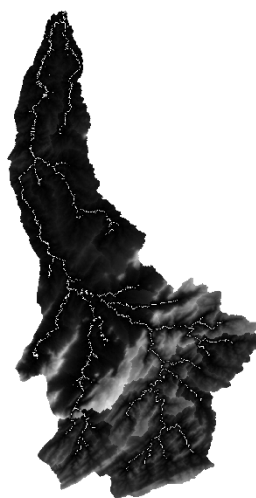


Fonte: Autoria Própria (2024).

O limiar definido foi baseado em testes realizados no software para diferentes limiares, onde observou-se que limiares abaixo do valor proposto apresentava um excessivo detalhamento de drenagem, o que dificultava a análise e classificação dos mapas gerados.

Por fim, calcula-se o HAND, que é a elevação de um ponto em relação à drenagem mais próxima, fornecendo uma representação visual das áreas em risco (Figura 18).

Figura 18: HAND, dado de saída final da análise.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Sobre a imagem HAND efetuou-se uma reclassificação visando revelar diferentes zonas que representam níveis potenciais de risco à inundação (NOBRE et al., 2016; LIU et al., 2016; ZHENG et al., 2017).

Para isso, utilizou-se o software QGIS, com a ferramenta “Reclassificar por Tabela”. A imagem HAND foi zoneada em 05 (cinco) classes, que representam áreas potenciais de risco à inundação, sendo elas: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta susceptibilidade à inundação, sendo estas:

- Susceptibilidade Muito Alta: 0 – 1 m;
- Susceptibilidade Alta: 1 – 5 m;
- Susceptibilidade Média: 5 – 10 m;
- Susceptibilidade Baixa: 10 – 25;
- Susceptibilidade Muito Baixa: 25 – 100 m.

4.4 Aplicação do Modelo Parâmetro – HEC RAS

A modelagem do método HEC-RAS e a consequente geração da mancha de inundação utilizada neste trabalho foram desenvolvidas previamente como parte do projeto de extensão Plano de Segurança do Açude Esguicho, situado na cidade de Ouro Branco/RN.

O projeto, realizado pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido, campus Angicos, teve como um dos objetivos desenvolver um estudo de *Dam Break*, caso a classificação da Barragem em análise se enquadre na categoria de risco e dano potencial associado que exija elaboração de Plano de ação de emergência.

Conforme matriz de classificação que consta no Anexo I da Resolução de N° 121 da ANA, de 09 de maio de 2022, Quadro 1, o grupo Geotec (2024) classificou a barragem Esguicho como classe A.

Quadro 1 – Matriz de classificação, Anexo I da Resolução de N°121 da ANA.

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

Fonte: Resolução 121 (ANA, 2022).

No Quadro 2 e Quadro 3 são apresentados o resumo da classificação da Barragem Esguicho quanto à categoria de risco e ao dano potencial associado, respectivamente.

Quadro 2 - Classificação da Barragem Esguicho quanto ao Dano Potencial Associado.

CLASSIFICAÇÃO DA BARRAGEM ESGUICHO, QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO	
ATO	Classificação da Barragem ESGUICHO, quanto ao Dano Potencial Associado e pelo volume.
OBJETO DO ATO	Barragem Esguicho, código SNISB 1451.
OUTORGA	315/2012
DANO POTENCIAL ASSOCIADO	Alto

CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO VOLUME	Média
EMPREENDEDOR	Prefeitura Municipal de Ouro Branco-RN
MUNICÍPIO	Ouro Branco
UF	RN
COORDENADAS GEOGRÁFICAS	Longitude 36°57'12,19" W e Latitude 6°43'57,87" S
ALTURA (m)	18,30
VOLUME (m³)	27.937.310,00

Fonte: Geotec (2024).

Quadro 3 - Classificação da Barragem quanto à categoria de risco.

CLASSIFICAÇÃO DA BARRAGEM ESGUICHO	
CLASSE DA BARRAGEM (DECORRENTE DA MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO NO ANEXO I DA RESOLUÇÃO Nº236/2017)	A
ATIVIDADES A SEREM EXECUTADAS PELO EMPREENDEDOR	PRAZO/PERIODICIDADE
INSPEÇÃO DE SEGURANÇA REGULAR- ISR	UMA VEZ POR ANO
ELABORAÇÃO DO PLANO DE SEGURANÇA DE BARRAGEM - PSB	DE IMEDIATO
ELABORAÇÃO DO PLANO DE AÇÃO DE EMERGÊNCIA- PAE	2024
ELABORAÇÃO DA PRIMEIRA REVISÃO PERIÓDICA DE SEGURANÇA DE BARRAGEM - RPSB	05 ANOS CONTADOS DA DATA DE EMISSÃO DO PSB
REALIZAÇÕES DE REVISÃO PERIÓDICA DE SEGURANÇA DE BARRAGEM -RPSB E REVISÃO DO PLANO DE AÇÃO DE EMERGÊNCIA- PAE	A CADA 05 ANOS.
INSPEÇÃO DE SEGURANÇA ESPECIAL -ISE	DEFINIDO NO PSB

Fonte: Geotec (2024).

Para este estudo, utilizou-se os resultados gerados no estudo do grupo Geotec, incorporando-os à presente pesquisa a fim de analisar a suscetibilidade à inundação da região com base no trabalho previamente desenvolvido.

Para a elaboração do modelo de simulação unidimensional de fluxo não permanente no HEC-RAS, é necessário criar uma geometria com caracterização das seções transversais da região de estudo no software QGIS, de volta ao HEC-RAS, é realizada a interpolação dessa geometria e a checagem das seções. Logo após, inserem-se as informações geométricas do vertedouro.

Alguns parâmetros são definidos no software, como coeficiente de Manning, parâmetros de brecha, declividade do canal, volume da barragem na hora do rompimento (que depende da precipitação e duração de chuva). O estudo de ruptura hipotética da Barragem Esguicho teve como objetivo o mapeamento das áreas potencialmente inundáveis da região à jusante do barramento.

Finalmente, a geometria de ruptura no perfil é selecionada e simula-se a zona de inundação, obtendo-se um arquivo raster com as alturas inundadas.

De acordo com o grupo Geotec (2024), a partir da análise pluviométrica do Rio Grande do Norte (EMPARN, 2011), foi possível observar que a maior precipitação acumulada para a região da cidade de Ouro Branco foi de 631,39 milímetros em uma quadra chuvosa, porém, os dados brutos apresentam precipitação de até 94 milímetros em um único dia.

Considerando que a barragem está recebendo água de uma barragem anterior que pode vir a romper e a mudança do comportamento climático, os parâmetros utilizados no presente trabalho foram de precipitação de 700 milímetros em 15 dias. O arquivo produto desse processamento e com estes parâmetros definidos será utilizado como parâmetro base para avaliação do modelo obtido pelo Hand.

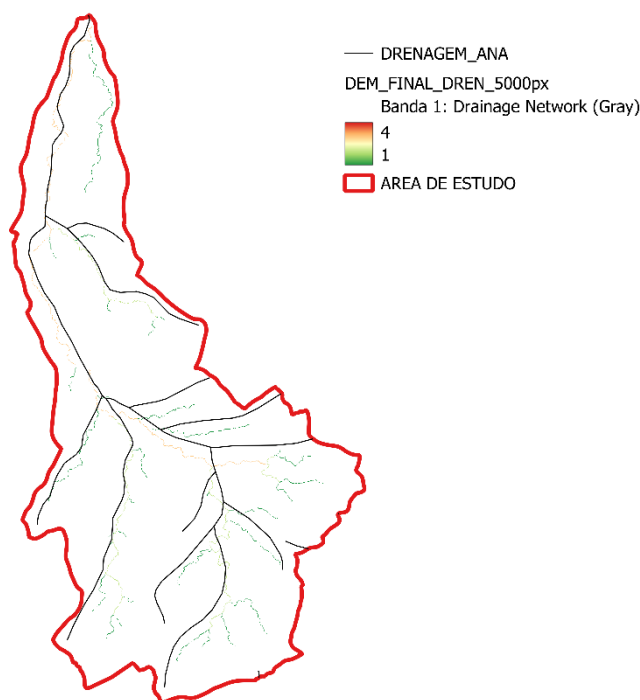
5 RESULTADOS

5.1 Resultados da aplicação do Modelo HAND

Dentre os resultados alcançados neste estudo ressalta-se que a metodologia aqui investigada se revelou uma ferramenta eficaz para o processo de aquisição cartográfica de planos de informação geoespacial associados às áreas de Hidrologia e Hidrogeologia.

Na Figura 19, pode-se identificar uma semelhança entre a rede de drenagem gerada através do HAND e a rede de drenagem disponibilizada pela Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO) utilizada pela ANA na gestão de recursos hídricos.

Figura 19: Análise entre a rede de drenagem da Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO) e a rede de drenagem gerada no HAND.



Fonte: Autoria Própria (2024).

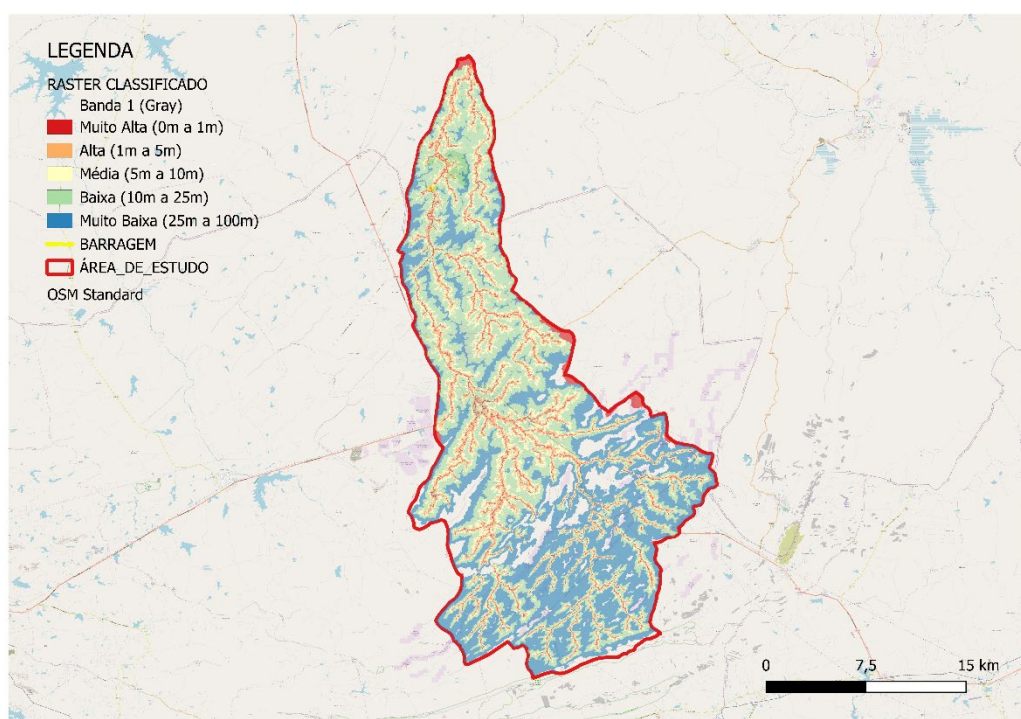
Os resultados obtidos pelos modelos HAND e HEC-RAS foram comparados com base na precisão da delimitação das áreas de risco e na sua aplicabilidade na elaboração de Planos de Ação Emergenciais (PAE). O HAND, sendo um modelo baseado exclusivamente em topografia, oferece uma abordagem simplificada para a previsão de inundações, enquanto o HEC-RAS fornece uma simulação mais detalhada, integrando parâmetros hidrodinâmicos.

A comparação foi realizada a partir dos mapas gerados por ambos os modelos, focando em dois aspectos principais:

1. Extensão da área inundada: Diferença nas áreas previstas como suscetíveis à inundação.
2. Aplicabilidade para PAEs: Análise da eficiência de cada modelo para uso na elaboração de Planos de Ação Emergenciais, conforme exigências da PNSB.

A Figura 20 apresenta a suscetibilidade à inundação de acordo com o HAND gerado. É possível observar as áreas de alta suscetibilidade baseado no ponto mais baixo, definido como a cota de zero metros (0 m).

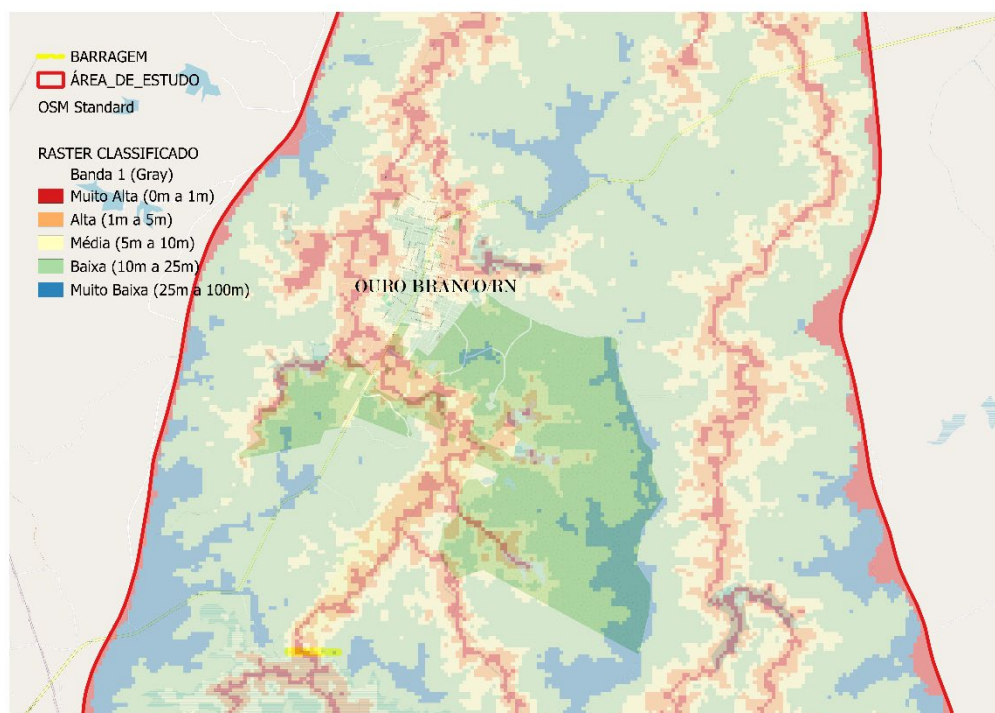
Figura 20: Suscetibilidade à inundação – modelagem do HAND e reclassificação no QGIS.



Fonte: Autoria própria (2024).

É possível observar que em algumas regiões de topo de morro apresentam uma suscetibilidade muito alta a inundação. Isso demonstra que o método de identificação das áreas suscetíveis a inundação, não se associa necessariamente as regiões com menores altitudes, mas sim, em lugares de baixos onde o acúmulo d'água pode acontecer de acordo com a topografia do local, conforme podemos observar na Figura 4.

Figura 21: Mancha de inundação obtida no HAND e seu percurso na cidade de Ouro Branco/RN.



Fonte: Autoria própria (2024).

O modelo HAND forneceu uma visão preliminar das áreas suscetíveis à inundação com base na topografia do terreno. O resultado foi um mapa que classifica as regiões próximas à barragem Esguicho de acordo com o risco de inundação, conforme a variação altimétrica em relação aos canais de drenagem.

As áreas identificadas como de alta suscetibilidade se concentraram nas zonas mais próximas ao canal principal do rio e em regiões planas, com pouca variação de elevação.

Esse modelo, apesar de sua simplicidade, apresentou uma boa delimitação das áreas de risco, sendo útil como uma primeira ferramenta de mapeamento. No entanto, ele carece de maior detalhamento hidrodinâmico, o que pode ser complementado pelo HEC-RAS.

Nobre et al., (2011) destaca em seus estudos correlações fortes e robustas entre as condições da água do solo e as classes segmentadas na topologia HAND. Essa correlação é explicada pelo princípio físico do potencial gravitacional local, ou distância vertical relativa à drenagem, que chamamos de potencial de drenagem local.

Embora o HAND forneça uma representação útil das áreas de risco, ele possui limitações importantes que precisam ser consideradas ao aplicar seus resultados:

- Simplificação hidrológica: O HAND baseia-se exclusivamente em dados topográficos e não leva em conta variáveis hidrodinâmicas, como o volume de água, a velocidade do

fluxo e a capacidade de escoamento dos canais. Isso pode resultar em subestimativas ou superestimativas das áreas de risco em situações em que essas variáveis são críticas para a modelagem da inundação.

- Desconsideração de eventos climáticos extremos: O modelo não incorpora diretamente dados de precipitação ou outras condições meteorológicas, o que limita sua precisão em cenários onde eventos de chuvas intensas podem alterar significativamente o comportamento da inundação.

Nobre et al., (2011) cita que desde que a densidade da rede de drenagem seja representada com precisão no modelo HAND, sua representação do potencial de drenagem do solo local é replicável para qualquer tipo de terreno para o qual haja dados digitais de elevação, independentemente da geologia, geomorfologia ou complexidades do solo.

5.2 Resultados da aplicação do Modelo HEC-RAS

Os resultados obtidos com o modelo HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) foram fundamentais para a compreensão do comportamento hidrodinâmico da onda de inundação em caso de rompimento da barragem Esguicho, situada em Ouro Branco/RN.

Na Figura 22, pode-se identificar o pico de onda gerado pelo HEC-RAS caso a barragem viesse a romper.

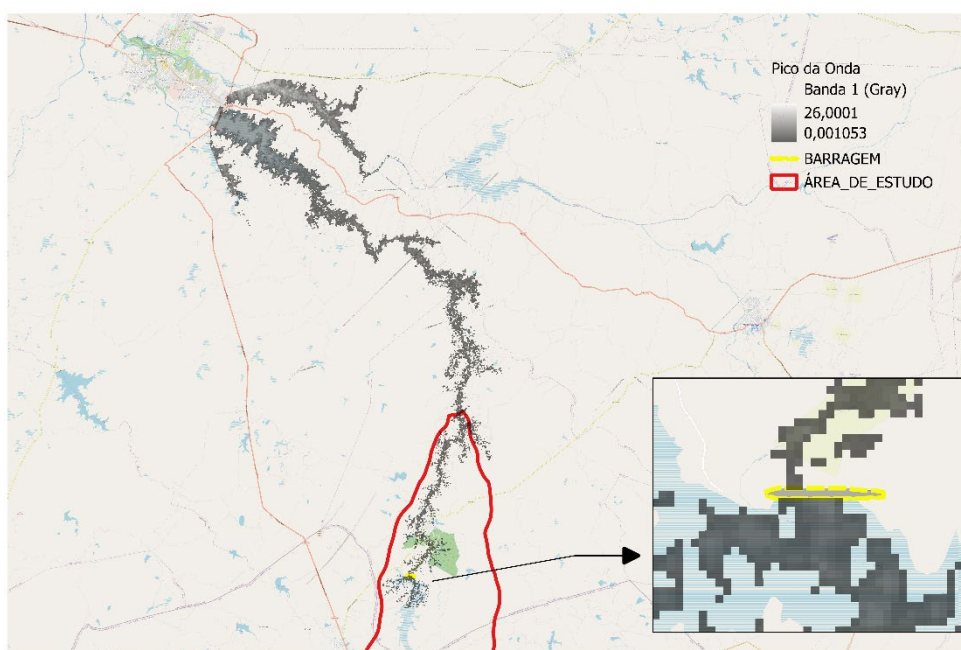
Figura 22: Pico de onda gerado através do HEC-RAS.



Fonte: Geotec, 2024.

Identificou-se ainda, o caminho que a mancha de inundação percorre partindo da barragem Esguicho, onde hipoteticamente aconteceu o rompimento (Figura 23).

Figura 23: Barragem Esguicho e mancha de inundação gerada pelo REC-HAS.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Embora o modelo HEC-RAS seja uma ferramenta poderosa para simulações hidrodinâmicas e análises de inundação, ele possui algumas limitações que devem ser consideradas ao interpretar os resultados.

O HEC-RAS requer uma grande quantidade de dados precisos sobre a topografia, características do solo, e parâmetros hidrológicos, como o Coeficiente de Manning e informações sobre a geometria da barragem e do canal. A obtenção desses dados pode ser trabalhosa e cara, além de exigir tempo para a coleta e processamento. Em áreas onde há escassez de dados detalhados, a precisão do modelo pode ser comprometida.

No caso da barragem Esguicho, houve uma limitação significativa em relação à disponibilidade dos dados necessários para a modelagem. Devido à ausência de informações concretas e detalhadas sobre a região, como a geometria precisa da barragem e os parâmetros hidrológicos locais, foi necessário utilizar simulações para preencher essas lacunas.

Como consequência, os dados brutos utilizados no HEC-RAS não estavam disponíveis para serem expostos neste estudo, o que limitou a capacidade de detalhar o processo de geração da mancha de inundação.

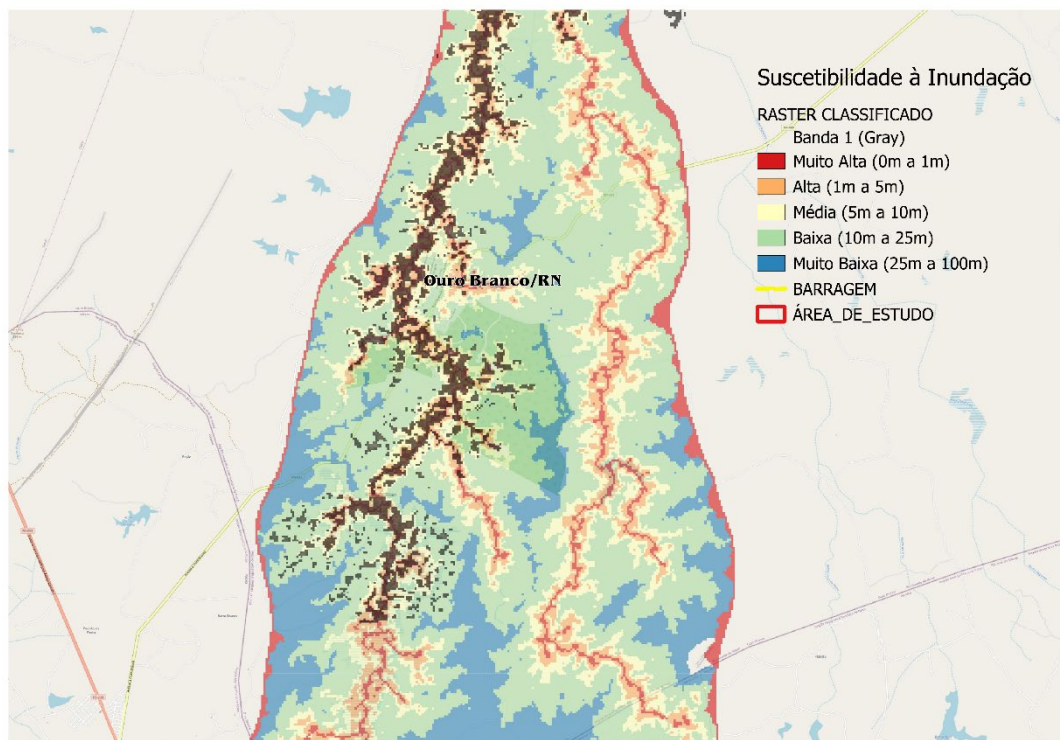
No entanto, o mapa final da mancha de inundação (Figura 22) gerado pela análise do HEC-RAS foi disponibilizado, permitindo a visualização das áreas potencialmente afetadas.

5.3 Comparação entre HAND e HEC-RAS

Os resultados obtidos pelos modelos HAND e HEC-RAS oferecem abordagens complementares para a análise de suscetibilidade à inundação.

Pode-se notar semelhanças entre as metodologias utilizadas na Figura 24. A mancha de inundação, resultado da metodologia do REC-HAS, está presente dentro de áreas susceptíveis à inundação obtida pela metodologia HAND.

Figura 24: Sobreposição da mancha de inundação (HEC-RAS) e da probabilidade de inundação (HAND).



Fonte: Autoria Própria (2024).

A classificação das áreas no QGIS auxiliou no sentido de que as áreas em comum são aquelas classificadas como “Muito Alta” e “Alta” probabilidade. Porém, as coincidências entre as áreas aqui apresentadas é um produto de análise visual. É necessário replicar a metodologia em outras barragens para que seja possível validá-la de fato.

Contudo, o resultado apresentado aqui demonstra ser satisfatório para a região mais próxima da barragem. Ao se afastar da barragem, a mancha começa a coincidir apenas com a região de muito alta suscetibilidade, e menos com a de alta, refletindo a perda de força da água, comportamento esperado considerando-se que o *dam break* é a repentina liberação de um volume de água represado.

Esses mapas mostraram as áreas que seriam submersas e as comunidades afetadas pelo rompimento, proporcionando uma visão clara das zonas de maior risco e a extensão dos impactos esperados.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do presente trabalho, foi possível utilizar com sucesso a metodologia apresentada para modelagem de suscetibilidade à inundação pelo HAND.

O Modelo HAND (Height Above the Nearest Drainage) apresenta uma abordagem simplificada para a delimitação de áreas de risco de inundação, baseada exclusivamente na topografia do terreno. Sua principal vantagem está na facilidade de aplicação e no baixo custo computacional, o que o torna ideal para avaliações preliminares ou para regiões onde há escassez de dados hidrológicos detalhados.

O HAND permite identificar áreas de maior suscetibilidade à inundação ao calcular a altura relativa do terreno em relação ao canal de drenagem mais próximo. No entanto, essa simplicidade também implica limitações em termos de precisão, pois o modelo não leva em conta variáveis hidrodinâmicas, como velocidade do fluxo, volume de água ou a capacidade de escoamento dos canais. Consequentemente, o HAND oferece uma visualização rápida e econômica, mas menos detalhada, das áreas de risco.

Por outro lado, o Modelo HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) proporciona uma análise mais detalhada e precisa da propagação da onda de inundação, incluindo variáveis fundamentais como profundidade, velocidade e extensão da inundação. Essas variáveis permitem que o HEC-RAS forneça previsões mais realistas sobre o impacto de uma possível inundação, o que é essencial para o planejamento de evacuação e a mitigação de danos. No entanto, devido à complexidade do modelo, o HEC-RAS requer mais tempo para a coleta de dados e uma capacidade computacional elevada para processar as simulações. Esse nível de detalhamento o torna uma ferramenta mais robusta, ideal para estudos avançados de gerenciamento de riscos em barragens e planejamento de respostas a desastres.

Observou-se que as áreas de coincidência entre os métodos, para os parâmetros utilizados, são as áreas com suscetibilidade alta e muito alta, permitindo o uso da modelagem no HAND para uma análise inicial do impacto no caso de rompimento de barragens. Também foi possível identificar zonas de risco de inundação na cidade de Ouro Branco-RN, que podem vir a sofrer danos em caso de inundação por precipitação ou rompimento da barragem Esguicho.

Ambos os modelos apresentam utilidades distintas para a elaboração de Planos de Ação Emergenciais (PAE). Em que, o HAND pode ser utilizado como uma ferramenta preliminar para a identificação de áreas críticas, especialmente em regiões onde os dados hidrológicos são escassos. O HEC-RAS, por sua vez, é essencial para um planejamento mais detalhado,

permitindo a simulação de diferentes cenários e o desenvolvimento de estratégias de mitigação e evacuação baseadas em dados precisos sobre a propagação da onda de inundação.

Dessa forma, o uso conjunto desses modelos pode maximizar a precisão dos planos de segurança, permitindo uma melhor resposta em caso de rompimento da barragem.

Este estudo abre caminho para futuras pesquisas que podem explorar outros cenários de rompimento de barragens utilizando modelos complementares. Sugere-se, ainda, a aplicação de novas tecnologias, como a modelagem tridimensional e a inclusão de dados climáticos em tempo real, para melhorar a precisão das previsões de risco de inundação.

REFERÊNCIAS

- AIROLDI, C. **Estudo de caso de barragens brasileiras: legislação e segurança**. 2020. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. Apud BRASIL. 2022.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). **Entenda o relatório de segurança de barragens: versão síntese**. Brasília: ANA, 2020.
- BHARATH, A. Anand V S, C G Hiremath, Ramesh Maddamsetty. **Dam break analysis using HEC-RAS and HEC-GeoRAS: A case study of Hidkal dam, Karnataka state, India**. Environmental Challenges, v. 5, p. 100401, 2021.
- BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. **Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2010.
- BRASIL. **Lei n. 12.334** - 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. 1. ed. Brasília: Brasil, v. único, 2010.
- CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens. **Diretrizes para segurança de barragens no Brasil**, 2010.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Aplicações do modelo HAND na gestão de riscos e recursos hídricos no Brasil**. 2014.
- DE MENEZES, A. B. A. **Estudo de ruptura hipotética (Dam Break) para barragem de rejeito**. 2023. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- DORTA, G. S. **Estudos de rompimento de barragens: uma abordagem prática**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2023.
- DOS SANTOS, C. **Análise da Mancha de Inundação da Barragem Sul da Mina de Brucutu em São Gonçalo do Rio Abaixo-MG**. 2015.
- DOS SANTOS, M. A. **Aplicações do modelo HAND para análise de suscetibilidade à inundação**. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), 2015.
- EMPARN. **Relatório de monitoramento hídrico no estado do Rio Grande do Norte**. 2011.
- ENGEORPS. **Relatório técnico de segurança de barragens**. São Paulo: Engecorps Engenharia S.A., 2012.
- GEOTEC. UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO. **Plano de Segurança do Açude Esguicho, situado na cidade de Ouro Branco/RN**. Angicos2024.
- GOERL, R. F.; MICHEL, G. P.; KOBIYAMA, M. **Mapeamento de áreas susceptíveis a inundação com o modelo HAND e análise do seu desempenho em diferentes resoluções espaciais**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 69, n. 1, p. 61-69, 2017.

GUIDICINI, G. SANDRONI, S. S.; MELLO, Flavio MD. **Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragem e obras anexas no Brasil [livro eletrônico]**. Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro, 2021.

GUIDICINI, G.; SANDRONI, L.; MELLO, J. C. **A instabilidade de taludes em barragens: causas e consequências**. Revista Brasileira de Geotecnia, v. 45, n. 2, p. 117-125, 2021a.
HEC, Hydrologic Engineering Center -. **HEC-RAS**. nd. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>. Acesso em: 18 out. 2024.

HEIMHUBER, V; HANNEMANN, J-C; RIEGER, W. **Flood risk management in remote and impoverished areas—a case study of Onaville, Haiti**. Water, v. 7, n. 7, p. 3832-3860, 2015.

ICOLD - International Commission on Large Dams. Standards for dam safety. 2022.

MELO, J. A. **Barragens e seus impactos ambientais: segurança e sustentabilidade**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2013.

MENGUE, V P. et al. **Utilização do Modelo HAND para mapeamento das áreas mais suscetíveis à inundação no Rio Uruguai**. Pesquisas em Geociências, v. 43, n. 1, p. 41-53, 2016.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (MIDR). **Classificação de áreas de risco de inundação**. Brasília, DF: MIDR, 2007.

MORGADO, R. G. P. **Estudo das causas de rupturas de barragens de rejeito de mineração no Brasil e proposta para avaliação da operação**. 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

NOBRE, A. D. et al . **Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model**. Journal of Hydrology, v. 404, n. 1, p. 13-29, 2011.

NOBRE, A. D.; CUARTAS, L.A.; HODNETT, M.; RENNO, C.D; RODRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WATERLOO, M.; SALESKA, S. (2011a). **Height Above the Nearest Drainage - a hydrologically relevant new terrain model**. Elsevier -Journal of Hydrology, v.404, 2011. p.13–29 2011. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.03.051.

NOBRE, C. A.; RENNO, C. D.; et al. **O modelo HAND e sua aplicação em estudos de inundações e gestão de recursos hídricos**. Revista Brasileira de Hidrologia, 2011.

PIRES, E. G.; BORMA, L. S. **Utilização do modelo HAND para o mapeamento de bacias hidrográficas em ambiente de Cerrado**. Proceedings of the Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, PR, Brazil, p. 13-18, 2013.

RENNO, C. D.; NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; SOARES, J. V.; HODNETTC, M. G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M. J. **HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-fi rme rainforest environments in Amazonia**. Elsevier -Remote Sensing of Environment, v.112, n.9, p. 3469-3481, 2008.

RODRIGUES, F. C.; NOBRE, C. A.; et al. **Geoprocessamento aplicado à hidrologia: o uso do modelo HAND**. Revista Brasileira de Cartografia, 2011.

SANTOS, Kamila Almeida dos. **Utilização de modelo hidrodinâmico para mapeamento de áreas inundáveis**. 2015.

SCHATZ, B. C. **Análise da suscetibilidade à inundação na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Enxofre por meio de ferramentas de geoprocessamento**. 2022.

SILVA, L. R.; LIMA, J. M. **Diretrizes para a segurança de barragens no Brasil**. Revista Brasileira de Segurança Hídrica, 2021.

TAMIRU, Habtamu; DINKA, Megersa O. **Application of ANN and HEC-RAS model for flood inundation mapping in lower Baro Akobo River Basin, Ethiopia**. Journal of Hydrology: Regional Studies, v. 36, p. 100855, 2021.

TAOFIK, et al. **Dam break analysis using HEC-RAS and HEC-GeoRAS: A case study of Hidkal dam Karnataka state India**. Environmental Challenges, v. 5, p. 100401, 2021.

XIONG, Y.; ACKERMAN, J.; BRUNNER, G. **User's Manual for HEC-RAS**. 2016.

ZHANG, W.; MONTGOMERY, D. R. **Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations**. Water Resources Research, v. 30, n. 4, 1994.

ZHENG, X., TARBOTON, D., MAIDMENT, D., LIU, Y., PASSALACQUA, P. **River channel geometry and rating curve estimation. Using height above the nearest drainage**. Submitted to the Journal of the American Water Resources Association, May, 2017. p. 34.