

ANÁLISE DO HIPOTÉTICO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DO RESERVATÓRIO DA PCH REPI (WENCESLAU BRAZ – MG)

Analysis of the hypothetical rupture of the PCH REPI reservoir dam (Wenceslau Braz – MG)

Alexandre Germano Marciano¹, Alessandro Luvizon Bérghamo², Paula Sayeko Souza Oda³,
Maisa Mello Ribeiro⁴, Alex Takeo⁵, André Luiz Vieira Barouch⁶, Amanda Rodrigues⁷

Palavras-chave:

Rompimento de Barragem;
HEC-RAS 2D;
Mapeamento de Risco;
Wenceslaus Braz.

Keywords:

Dam failure;
HEC-RAS 2D;
Risk Mapping;
Wenceslau Braz.

Resumo: Investigar e analisar a ruptura de uma barragem é crucial para prever com precisão níveis de inundação e tempo de chegada das ondas de inundação. Isto é essencial para mapear as inundações e preparar planos de emergência. Diversos estudos são realizados para evitar futuros desastres, destacando-se a determinação das áreas afetadas por um rompimento hipotético de barragem. Este estudo pretende fornecer uma análise do rompimento da barragem do reservatório da PCH REPI, localizada em Wenceslau Braz – MG, por meio do modelo bidimensional de fluxo não permanente do programa HEC-RAS. Os parâmetros de rompimento foram estimados para um cenário extremo de inundação, de acordo com as características físicas do reservatório. Foi abordado o risco de inundação nas cidades de Wenceslau Braz e Itajubá após o rompimento. A partir dos resultados, foram determinadas, área afetada, vazão, profundidade, velocidade de escoamento e perigo de inundação, com o intuito de contribuir nos estudos para planos de emergência e para a regulação do uso e da ocupação do solo das cidades mineiras analisadas. No caso de rompimento da barragem, a cidade de Wenceslau Braz teria grande parte de sua infraestrutura urbana danificada, inclusive com alto potencial de dano a vidas humanas. Em Itajubá, os níveis de perigo são menores, no entanto, a localidade não pode ser excluída da preparação para esse tipo de desastre. Os resultados dessa pesquisa podem colaborar para o desenvolvimento de Planos de Ação de Emergência mais precisos, embora seja recomendado que novos estudos contemplem outros cenários críticos.

Abstract: Investigating and analyzing dam failure is crucial for accurately predicting flood levels and the arrival time of flood waves. This is essential for flood mapping and the preparation of emergency plans. Various studies are conducted to prevent future disasters, with a particular focus on determining the areas affected by a hypothetical dam failure. This study aims to analyze the failure of the PCH REPI reservoir dam, located in Wenceslau Braz, MG, using the HEC-RAS software to model two-dimensional unsteady flow. The dam breach parameters were estimated for an extreme flood scenario based on the physical characteristics of the reservoir. The study assessed the flood risk in the cities of Wenceslau Braz and Itajubá following the dam failure. The results provided key information, including the affected area, discharge, flow depth, velocity, and flood hazard levels, to support emergency planning and land-use regulation in the analyzed cities. In the event of a dam failure, Wenceslau Braz would experience significant damage to its urban infrastructure, with a high potential risk to human lives. Although Itajubá would face lower hazard levels, the city should not be exempt from disaster preparedness efforts. The findings of this study can contribute to the development of more precise Emergency Action Plans. However, further research should consider additional critical scenarios to enhance disaster preparedness and mitigation strategies.

¹Técnico em Meteorologia da Universidade Federal de Itajubá – MG, Brasil. agermano@unifei.edu.br

²Docente da Universidade Federal de Itajubá – MG, Brasil. luvizon.bergamo@unifei.edu.br

³Doutorando do INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – SP, Brasil. paula.oda@inpe.br

⁴Mestranda da Universidade Federal de Itajubá – MG, Brasil. mamelloribeiro@gmail.com

⁵Docente da Universidade Federal de Minas Gerais – MG, Brasil. alex.takeo@uol.com.br

⁶Técnico em Agrimensura da Universidade Federal de Itajubá – MG, Brasil. avbarouch@unifei.edu.br

⁷Graduanda da Universidade Federal de Itajubá – MG, Brasil. amandarodrigueska@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas fundamentais da engenharia civil, construídas transversalmente em vales ou depressões com objetivo de reter e controlar o fluxo de água de corpos d'água. Originalmente destinadas ao abastecimento de água, ao longo do tempo as barragens receberam novas finalidades, como a geração de energia elétrica, irrigação, controle de inundações, navegação, controle de sedimentação e armazenamento de resíduos de mineração (Mattas *et al.*, 2023).

De acordo com o registro da Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB), a função mais comum das barragens é a irrigação, representando 48,6% do total de usos. Em seguida, destacam-se a geração de eletricidade (17,4%), abastecimento de água (12,7%), controle de inundações (10%), recreação, navegação e piscicultura (5,9%) e outros usos (5,4%) (ICOLD, 2022). Essas estruturas se tornaram cruciais em diversas atividades e apesar dos inúmeros benefícios para a sociedade, as barragens também apresentam desafios e oferecem riscos que precisam ser cuidadosamente geridos.

Os rompimentos podem ser causados por falhas estruturais, infiltração, erosão interna, sobrecarregamento hidráulico e movimentos de terra. Em razão do rompimento, a água retida na barragem escoará de forma descontrolada, causando severos danos ambientais e humanos (Al-Salahat *et al.*, 2024). As inundações resultantes de rompimento são mais destrutivas do que as inundações naturais, pois, sua característica súbita causa uma quantidade significativa de vítimas, perdas materiais, danos ambientais, transporte de sedimentos, alterações morfológicas, além de impactos psicológicos profundos nas pessoas afetadas (Sumira *et al.*, 2023).

O risco de inundações devido ao rompimento de barragens antigas vem aumentando em razão do desenvolvimento urbano a jusante, da deterioração estrutural ou da capacidade inadequada do vertedouro (Pilotti *et al.*, 2020). Muitas cidades e infraestruturas ao redor do mundo foram desenvolvidas ao longo dos rios, frequentemente localizadas a jusante de diferentes estruturas hidráulicas, como barragens e lagos (Haile *et al.*, 2024). Essa localização coloca muitas vidas e propriedades em risco de inundações.

Apesar dos significativos avanços nas metodologias de projeto de barragens, continuam a ocorrer falhas em barragens e estruturas de retenção de água. Na França, em 1959, o rompimento da barragem de concreto de Malpasset causou 433 vítimas e levou à criação de legislação de segurança de barragens (Farahmand *et al.*, 2023). As inúmeras falhas de barragens ocorridas na década de 1970 nos Estados Unidos, incluindo as barragens de Buffalo Creek, West Virginia, 1972; Teton, Idaho, 1976; Laurel e Sandy, Pensilvânia, 1977 e Kelly Barnes, Geórgia, 1977; levaram a revisões abrangentes dos programas de segurança de barragens no país (Gee *et al.*, 2024). Na Índia, em 1979, o rompimento de uma barragem provocou inundações que resultaram na morte de cerca de 2.000 pessoas (Darji *et al.*, 2024). Recentemente, duas barragens romperam-se na Líbia nos dias 10 e 11 de setembro de 2023, causando mais de 6.000 mortes e deslocando milhares de moradores na cidade de Derna (Annunziato *et al.*, 2024).

Os desastres com barragens de rejeitos de mineração têm atraído significativamente a atenção de pesquisadores no Brasil, especialmente no estado de Minas Gerais, que abriga grande parte dessas barragens (Ávila, 2016; Palu, 2019). O maior acidente ambiental com barragens de rejeitos no Brasil e um dos piores do mundo, foi o rompimento da barragem de Fundão, no município de Mariana (MG), em 2015, (Marta-Almeida *et al.*, 2016; Carmo *et al.*, 2017; Marciano, 2024). Em termos de perdas humanas, o rompimento da barragem de Brumadinho (MG) em 2019, resultou na morte de 272 pessoas, das quais seis ainda estão desaparecidas (BBC, 2019).

Para reduzir a perda de vidas e bens por eventos causados por inundações decorrentes do rompimento de barragens, é necessário combinar medidas estruturais e não estruturais para construir um sistema que contemple medidas de prevenção à ruptura e ações de emergência (Dal-Farra *et al.*,

2015; Decina & Brandão, 2016). Focar apenas em medidas estruturais, como construção de um sistema de controle de cheias não é suficiente para evitar desastres. Medidas não estruturais, como o estudo da evolução das inundações causadas pelo rompimento de barragens e a realização de avaliações de riscos, são igualmente importantes para uma eficiente gestão de riscos (Farooq *et al.*, 2019). Portanto, a simulação de inundações por rompimento de barragens e a avaliação de riscos tornaram-se questões científicas e cruciais nos estudos hidrológicos e hidráulicos (Mo *et al.*, 2023).

Neste contexto, o mapeamento de risco é uma ferramenta de análise essencial para áreas sujeitas ao risco de inundação, pois permite estabelecer medidas preventivas para possíveis situações de emergência, bem como, realizar o planejamento de ocupação das áreas suscetíveis à inundação (Brito, 2017).

Goerl *et al.*, (2012) propuseram um método para mapeamento do índice de risco de inundação através do perigo estimado e do índice de vulnerabilidade. Monte *et al.*, (2017) também utilizaram diferentes metodologias para calcular o índice de perigo de inundação após o rompimento da barragem Lomba do Sabão, em Porto Alegre, RS. Neto *et al.*, (2016) propuseram uma metodologia para o mapeamento de perigo utilizando indicadores como profundidade da água, velocidade do fluxo, carga de energia, força do escoamento e intensidade. Stephenson (2002) e Alves Junior *et al.*, (2023) utilizaram a profundidade e a velocidade da água como indicadores para o índice de perigo, sendo estes comumente usados para o seu mapeamento de perigo.

Em 2010, o Governo Federal do Brasil instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB, Lei Federal nº 12.334/2010) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos em resposta ao aumento de casos de rompimento de barragens e à ausência de uma legislação unificada. A Lei nº 12.334 criou também o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) (Pereira *et al.*, 2021). Esta regulamentação visou assegurar padrões de segurança para as barragens, com o objetivo de diminuir a probabilidade de acidentes, inundações e suas consequências.

A mancha de inundação classifica em categoria o dano potencial, considerando a quantidade de vidas humanas perdidas e os impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem (Brasil, 2010). Comparada às legislações internacionais, a PNSB possui aspectos alinhados com as normas de outros países. No entanto, ainda são necessárias melhorias significativas, especialmente no que tange à fiscalização das estruturas e à elaboração de regulamentações específicas para pequenas barragens (Marciano, 2024).

Outro componente da PNSB é o Plano de Segurança de Barragens (PSB), que exige a elaboração de um Plano de Ação de Emergência (PAE), conforme solicitado pelos órgãos fiscalizadores (Brasil, 2010). Na elaboração do PAE, podem ser empregados modelos hidrológicos e hidrodinâmicos para estimar as áreas prováveis de serem inundadas, devido à onda de cheia em caso de ruptura da barragem, que afetará a população, instalações, infraestruturas e o ambiente do vale a jusante (ANA, 2016; Nascimento *et al.*, 2022).

A modelagem do rompimento de barragens pode ser realizada por meio de modelos físico-hidráulicos em escala ou por modelos matemáticos uni ou bidimensionais. Na análise unidimensional, são obtidos resultados sobre a magnitude da enchente (vazão e níveis de água) ao longo do tempo. Além desses resultados, a análise bidimensional, pode prever informações adicionais, como a área inundada e as velocidades em duas dimensões. Esses modelos são pautados pelas equações diferenciais de conservação de massa (continuidade) e de momento, derivadas das equações de Barre De Saint Venant em 1871 (Burele & Burele, 2023).

Modelos de rompimento de barragem e manchas de inundação são de extrema importância para os tomadores de decisão e para as autoridades na construção do PAE. Diferentes metodologias têm sido propostas para mapeamento das áreas com risco de inundação, por exemplo, nos países da Europa (*European Directive 2007/60/EC*) usam a relação de danos infraestruturas e de segurança da

população. Esses mapas avaliam os perigos e riscos em todos os países da União Europeia. Um dos produtos dessa metodologia é o mapa da velocidade pela profundidade da água da inundação, que tem sido utilizado por muitos pesquisadores e instituições (Clausen, 1989; AEMI, 2014).

Segundo Neto *et al.*, (2016), o modelo de rompimento de barragem pode ser visto como um processo de três etapas. Primeiro, a formação da brecha no maciço é analisada para determinar o hidrograma de ruptura da barragem. Em seguida é realizada a propagação do hidrograma de ruptura. Por fim, o resultado da propagação da onda de cheia é sintetizado em mapas com a delimitação da inundação, indicando os tempos de chegada de onda. Também é possível elaborar mapas adicionais com informações do risco hidrodinâmico, das profundidades máximas atingidas, das velocidades máximas, da duração da cheia, dentre outros (USACE, 2024).

Existem diversos programas para simulação do rompimento de uma barragem, tais como o *Hydrologic Engineering Center - River Analysis System* (HEC-RAS), o FLDWAV, o BOSS DAMBRK, entre os quais, o HEC-RAS é o mais utilizado. O HEC-RAS foi desenvolvido por engenheiros do exército dos Estados Unidos, e permite a simulação numérica da propagação do fluxo unidimensional e bidimensional em canais fluviais, utilizando as equações propostas por Saint-Venant para situações de escoamento permanente e turbulento (USACE, 2024). O programa HEC-RAS calcula o rompimento da barragem, mapeamento de inundação e os parâmetros hidráulicos da onda de inundação, o que é vital para os estudos do PAE. Há estudos que utilizaram esse programa para simular a ruptura de barragens, por exemplo, nos trabalhos de Shahrim & Ros (2020); Nistoran *et al.*, (2023); Mattas *et al.*, (2023); Burele & Burele (2023); Sumira *et al.*, (2023); Mo *et al.*, (2023) Haile *et al.*, (2024); Al-Salahat *et al.*, (2024); dentre outros. No Brasil, o HEC-RAS foi utilizado por Ferla (2018), Nascimento *et al.*, (2022); Marciano *et al.*, (2024); dentre outros, sendo, portanto, uma ferramenta muito útil para avaliar a segurança e os riscos das barragens.

Neste contexto, este estudo investiga se o reservatório da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) R.E.P.I. (Rede Elétrica Piquete-Itajubá), pertencente ao Ministério da Defesa, situada no rio de Bicas (Wenceslau Braz, MG), um afluente do rio Sapucaí, afetaria o município de Itajubá, MG após um hipotético rompimento da barragem. Além disso, investiga os parâmetros do rompimento, hidrograma, velocidade do escoamento, profundidade da inundação e população/infraestruturas atingidas pelo desastre.

Este estudo objetiva a simulação do rompimento da barragem e avaliação das características evolutivas da inundação após o rompimento. Com essas informações presume-se ajudar as autoridades na tomada decisões para planejamento e desenvolvimento de planos de emergência, a fim de evitar a perda de vidas humanas.

2 MATÉRIAS E MÉTODOS

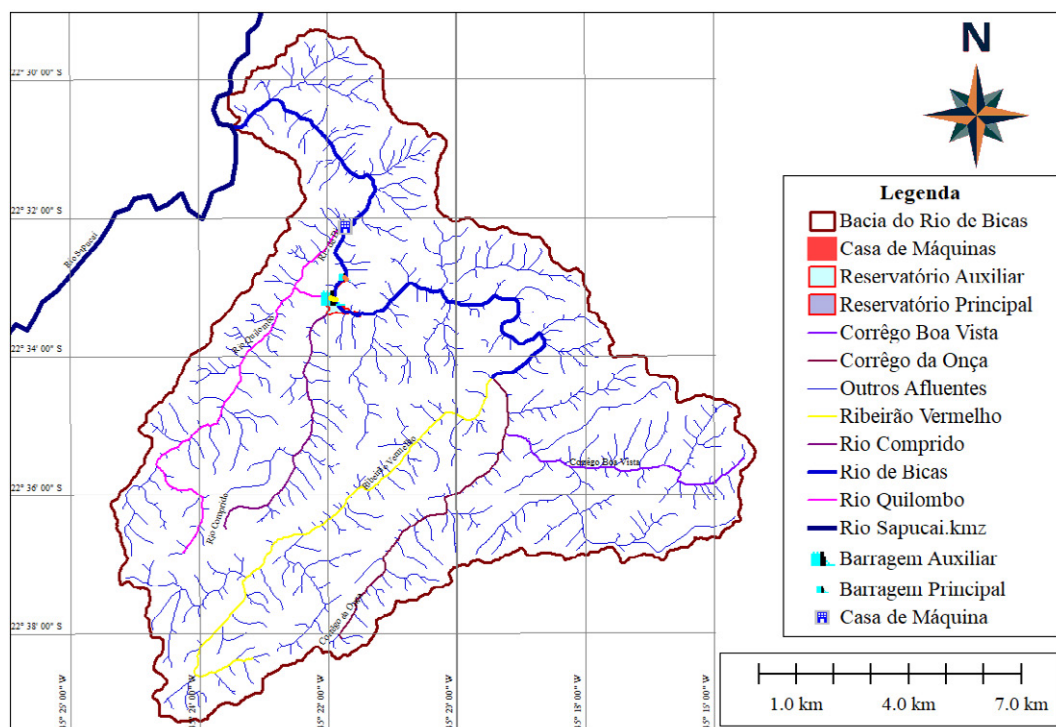
2.1 Área de estudo

O estudo abrange parte da bacia hidrográfica do rio de Bicas e parte do trajeto do rio Sapucaí até o final do perímetro urbano do município de Itajubá-MG (Figura 1). A bacia hidrográfica do rio de Bicas possui uma área de drenagem 68,8 km², com o seu principal curso d'água possuindo 33,5 km de extensão até desaguar no rio Sapucaí. Seus principais afluentes são o córrego do Quilombo, ribeirão Vermelho, córrego da Onça e o rio Comprido.

Na área de estudo se encontra dois municípios que estão a jusante das barragens, são eles: Wenceslau Braz e Itajubá. A cidade de Wenceslau Braz (MG) está 1,5 km a jusante da Barragem Principal, numa altitude de 1005 m, com uma população de 19.188 habitantes (IBGE, 2024), com Índice

de Desenvolvimento Humano (IDH) de 0,678 (IBGE, 2010). A cidade de Itajubá (MG) está a 20,5 km de distância da Barragem Principal, numa altitude de 856 m, possui uma população 93.073 habitantes (IBGE, 2024), com IDH de 0,787 (IBGE, 2010).

Figura 1 – Bacia de drenagem do rio de Bicas, com seus afluentes, e seu desague no rio Sapucaí.

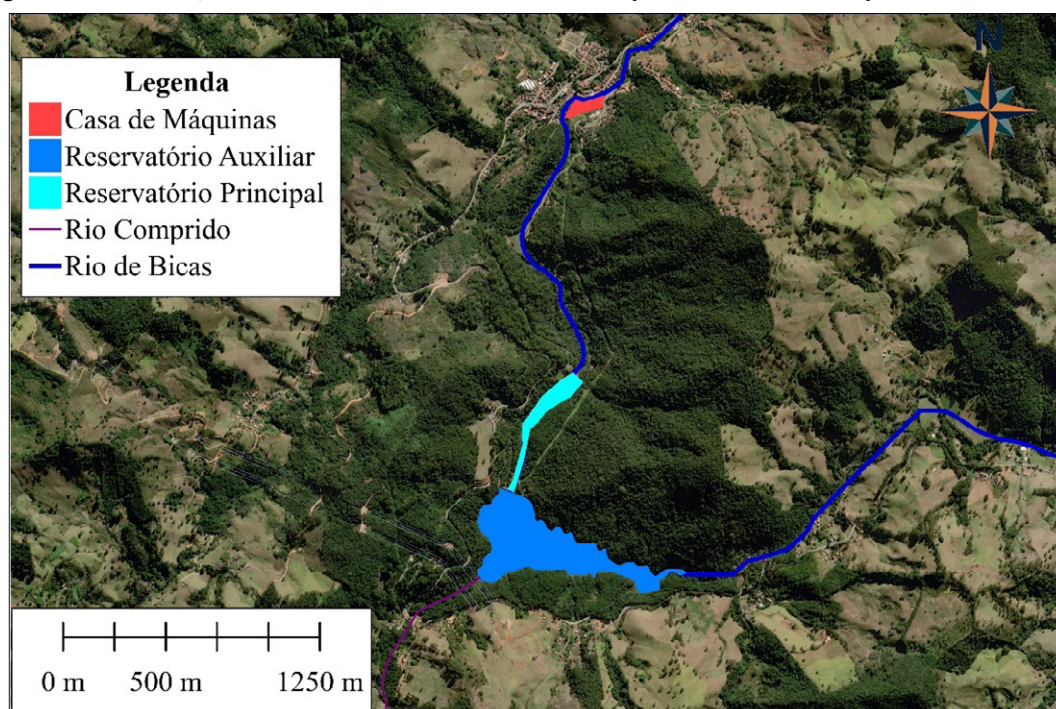


Fonte: Elaborado pelos autores.

A PCH REPI, tem uma capacidade instalada de 3,34 MW, está localizada no município de Wenceslau Braz (MG). Sua estrutura é composta por duas barragens, como é mostrado nas Figuras 2 e 3. A Barragem Principal, que é de concreto, tem 15 m de altura e 68 m de comprimento do coroamento, possui reservatório com área de 41.300 m² que armazena 269.738 m³ (PACUERA, 2019). E a Barragem Auxiliar, localizada 500 m à montante da Barragem Principal, também construída de concreto, com 29,50 m de altura e 112 m de comprimento, possui reservatório com uma área de 193.000 m², que armazena 1.347.287 m³ (PACUERA, 2019) Esse reservatório é formado pelas águas do rio de Bicas, rio Comprido e da transposição de parte da vazão do ribeirão Quilombo (Martinez *et al.*, 2021; Albuquerque, 2022). Esses reservatórios tem um grande valor ecológico, pois abriga uma grande diversidade de espécies da fauna e flora na Mata Atlântica (Vilas Boas, 2014).

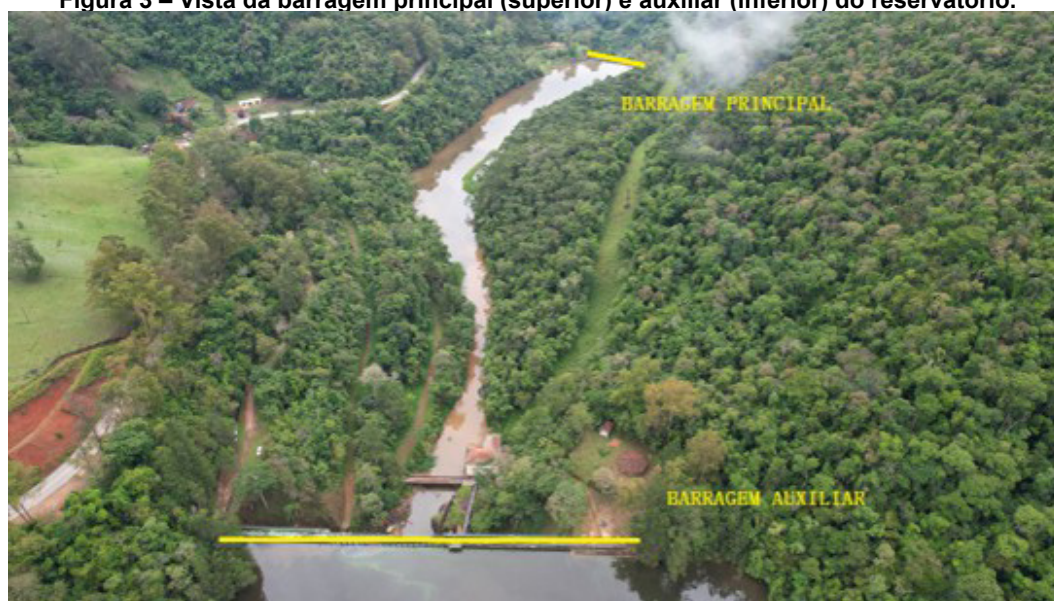
A categoria de risco da barragem PCH REPI é estabelecida conforme os critérios definidos na Resolução nº 168/2020 da ANA, que determina a classificação de risco das barragens com base em três fatores principais: características técnicas da estrutura, estado de conservação e dano potencial associado ao seu rompimento (ANA, 2020). Essa classificação é um processo dinâmico, sujeito a revisões periódicas, podendo ser categorizada como baixa, média ou alta, dependendo das condições estruturais e do contexto atual da barragem. A barragem da PCH REPI é classificada como uma barragem de Categoria A, conforme a Resolução ANA nº 236/2017. Essa classificação indica um alto risco, uma vez que o eventual rompimento da estrutura poderia resultar em impactos significativos, incluindo consideráveis perdas de vidas humanas e severas consequências socioeconômicas (ANA, 2017).

Figura 2 – Localização dos reservatórios Auxiliar e Principal e da casa de máquinas da PCH REPI.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 3 – Vista da barragem principal (superior) e auxiliar (inferior) do reservatório.



Fonte: Elaborado pelos autores.

2.2 Coletas de dados

As informações sobre a topografia são essenciais para o mapeamento de inundações (Shahrim & Ros, 2020). Os dados topográficos foram obtidos em campo, e pelo Modelo Digital de Elevação (MDE) do sensor de satélite ALOS PALSAR - 2. Também foram realizados levantamentos, das seções transversais e da vazão do rio de Bicas. Os equipamentos utilizados foram: receptores GNSS modelo Leica CS09 e Estação Total TS02, para coleta de pontos georreferenciados e, Qliner V3 e micromolinete fluviométrico, para levantamento das seções topobatimétricas e da vazão. A Figura 4 mostra a utilização do medidor de vazão Qliner V3.

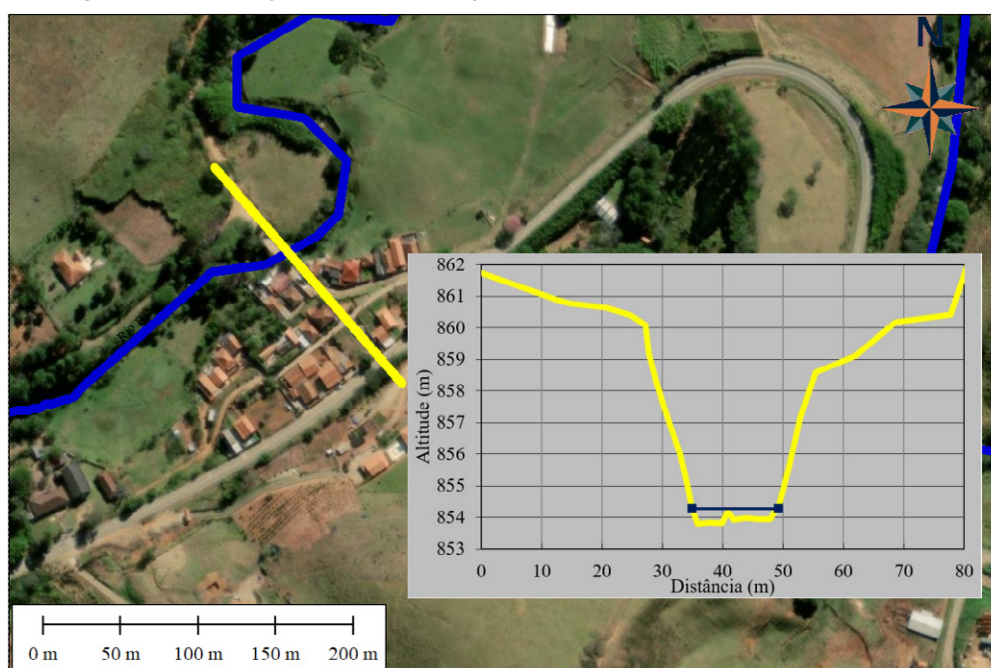
Figura 4 – Uso do medidor de vazão Qliner V3.



Fonte: Elaborado pelos autores.

As seções topobatimétricas foram realizadas conforme os critérios utilizados por Marciano (2019), com o objetivo de caracterizar detalhadamente a topografia e a batimetria do corpo hídrico e de suas margens. Os levantamentos foram conduzidos em trechos retilíneos, seguindo um alinhamento perpendicular à direção do escoamento, e refletem as condições existentes na data da medição. A Figura 5 mostra a localização de uma das seções topobatimétricas levantadas no rio Bicas. Nessa seção, o nível d'água registrado corresponde a uma altitude de 854,30 m. A extensão total da seção topobatimétrica é de 80 m, com uma distância de 14 m entre as margens do rio e uma profundidade média de 0,40 m. Observou-se um desnível de aproximadamente 6,50 m entre a calha principal e a calha secundária, evidenciando que, nesse trecho, o rio é encaixado na topografia.

Figura 5 – Localização de uma das seções topobatimétricas levantada do rio Bicas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O levantamento das seções transversais e da declividade média são tarefas exigidas para realizar a simulação de rompimento de barragem (Abdessamed & Abderrazak 2019). Quanto maior a quantidade de dados, mais tangível é o modelo, sendo assim, também foram utilizados dados coletados por Marciano (2019), que fez diversas simulações de inundação na mesma área.

Outra fonte de dados utilizada foi o satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), do radar PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar), que gera um produto de imagens altimétricas com resolução espacial de 12,5 m, no formato GEO TIFF (*Georeferenced Tagged Image File*), disponibilizado gratuitamente no site da *Alaska Satellite Facility* (ASF, 2024).

Com essas fontes de informações topográficas, foi criado o MDE para a área de estudo. Para a construção do MDE foi utilizado um programa de SIG (Sistema de Informação Geográfica), seguindo a metodologia proposta por Marciano *et al.*, (2024), que criou o MDE a partir interpolações de seções topobatimétricas.

2.3 Modelagem hidrodinâmica

Os modelos de simulação hidrodinâmica podem ser usados para prever hidrogramas e mapas de inundação após um rompimento de barragens (Al-Salahat *et al.*, 2024). O programa HEC-RAS oferece duas alternativas para calcular um hidrograma de inundação: modelo hidrodinâmico (1D) ou modelo hidrodinâmico (2D). O modelo hidrodinâmico (2D) resolve as equações de conservação de massa e momento utilizando um esquema de diferenças finitas implícitas desenvolvido por Holly Júnior e Preissmann (1977) e Chen e Falconer (1992). Essas equações foram obtidas a partir das equações unidimensionais, integrando a vertical entre o fundo e a superfície, considerando as direções cartesianas x e y (Andrade, 2020).

Para realizar uma simulação no HEC-RAS, foi necessário definir as condições iniciais do modelo, que são a geometria do modelo, as condições de contorno e os parâmetros hidráulicos

Os dados da geometria são os dados trabalhados anteriormente, que foram inseridos através da importação do MDE. No editor de dados geométricos foi gerada uma malha computacional com resolução de 2 m × 2 m na calha principal e 10 m × 10 m na calha secundária, com o objetivo de representar adequadamente as características do terreno e do escoamento. Para a definição da malha, realizou-se um teste empírico de refinamento, visando avaliar a precisão e a estabilidade dos resultados. Esse procedimento permitiu equilibrar a acurácia da modelagem e o custo computacional, garantindo a obtenção de resultados confiáveis e eficientes.

As condições de contorno são os dados vazões e declividade do rio Bicas e do rio Sapucaí. Essas vazões e declividade foram definidas pelas medições ocorrida na etapa de coleta de dados, sendo a vazão 1,5 m³/s para o rio Bicas, e 15 m³/s para o rio Sapucaí. E as declividades médias medidas do rio de Bicas foi 2,39 m/km e do rio Sapucaí de 1,35 m/km. Esses dados foram essenciais para a definição do regime de escoamento e para a calibração do modelo.

O parâmetro hidráulico mais importante é o usado para descrever a resistência exercida pelo canal sobre o escoamento, o coeficiente de rugosidade de Manning. Esses valores de rugosidade de Manning para as calhas, principal e secundária, foram calculados conforme a proposta de Chow (1959) onde é determinado pela caracterização física do canal e o grau de sinuosidade, conforme Equação 1.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_s \quad 1$$

Após essas definições das condições iniciais do programa HEC-RAS, foi realizada a simulação do modelo. Essas condições iniciais são essenciais para assegurar a precisão e a confiabilidade dos resultados. O período de simulação foi definido de 01 a 05 de janeiro, período que abrange início e término da simulação.

2.4 Calibração e avaliação da simulação

O procedimento adotado para calibração da simulação, foi feito empiricamente “por tentativa e erro”. A calibração do modelo hidrodinâmico foi elaborada para encontrar o melhor ajuste entre o hidrograma simulado e o hidrograma medido pela etapa de coleta de dados. A calibração foi feita no programa HEC-RAS, ajustando o coeficiente de Manning para todas as secções, de 0,030 a 0,070.

Para avaliar a variabilidade e a precisão do modelo, foi determinado o Coeficiente de Variação (CV) a partir da comparação entre os valores medidos e simulados. As Equações 2, 3 e 4 expressam essa análise, permitindo a avaliação da concordância entre os hidrogramas e a determinação do CV. A Equação 3 calcula a proporção da variação dos valores observados em relação à variável simulada, conforme descrito por Rangel (2021).

$$\begin{aligned} SQE &= \sum (y - \hat{y})^2 & 2 \\ STT &= \sum (y - \bar{y})^2 & 3 \\ CV &= 1 - \frac{SQE}{STT} & 4 \end{aligned}$$

Onde: \sum é a soma quadrática do erro; \sum é a soma total dos quadrados; y é o valor observado; \bar{y} é a média dos valores observados; \hat{y} é o valor calculado/simulado.

2.5 Ruptura da Barragem

A estimativa da largura, da duração e do tipo de falha de uma ruptura de barragem é essencial para prever a descarga de pico, o hidrograma de vazão e a inundação a jusante (Sumira *et al.*, 2022). Esses parâmetros da geometria da brecha estão entre as que apresentam maiores incertezas durante os estudos de ruptura (Brunner, 2014, Nascimento *et al.*, 2022). Segundo Perini (2009), a estimativa dos parâmetros de uma brecha geralmente é realizada por meio da avaliação de casos semelhantes, do uso de equações de desenvolvidas de casos de rupturas e da utilização de modelos hidráulicos e de transporte de sedimentos.

O programa HEC-RAS é capaz de simular a ruptura de uma barragem, através de métodos de estimativa de parâmetros e equações de regressão desenvolvidos em estudos de segurança de barragens por MacDonald e Langridge-Monopolis (1984), Froehlich (1995, 2008), é utilizado também para calcular a progressão temporal de uma ruptura em uma estrutura (barragem) (Xu e Zhang, 2009).

Esses parâmetros são determinados tanto para cenários de galgamento quanto para tubulações, sendo utilizadas diferentes equações de regressão para determiná-los. As equações são derivadas principalmente de conjuntos de dados de terra, terra zonada, enrocamento e terra com núcleo impermeável, com o objetivo de calcular o pico de fluxo, (Brunner, 2014).

As equações de Froehlich (2008) estão entre as mais conhecidas e usadas (74 casos registrados). As equações 5 e 6 foram usadas para determinar a brecha de ruptura e o tempo de formação.

$$B_{\text{méd}} = 0,27 \cdot k_0 \cdot V_w^{0,32} \cdot h_b^{0,04} \quad 5$$

$$t = 63,2 \cdot \sqrt{\frac{V_w}{g h_b^2}} \quad 6$$

Onde: $B_{\text{méd}}$ é a largura média da brecha (m), h_b é a altura da brecha (m), V_w é o volume do reservatório no momento da ruptura (m³), k_0 é a constante que varia com o tipo de rompimento, g é a gravidade da

gravidade (m/s^2) e t é o tempo de formação da brecha (s).

A barragem do presente estudo foi construída com concreto e, o tipo de ruptura usada na simulação foi o galgamento. Esse tipo de ruptura pode ocorrer quando um grande volume de água chega ao reservatório e o vertedouro não é capaz de extravasar, aumentando consideravelmente o nível da água, ocasionando a ruptura da barragem (USACE, 2024; Tschiedel, 2017, Nascimento *et al.*, 2022).

O modelo de ruptura adotado neste estudo considerou os seguintes parâmetros: o nível máximo do reservatório foi estabelecido em 1020 m, conforme indicado pelo MDE. O volume do reservatório, no momento iminente à ruptura, foi estimado em $2,5 \text{ hm}^3$, valor que está em conformidade com as informações apresentadas no PACUERA (2019) e por Albuquerque (2022). A declividade média foi determinada como $0,00239 \text{ m/m}$, enquanto as vazões constantes foram de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ para o rio Bicas e $15 \text{ m}^3/\text{s}$ para o rio Sapucaí, com base nos dados obtidos durante as campanhas de coleta.

2.6 Cartas de Inundação

Após a conclusão da simulação, foram visualizados os resultados em cartas de velocidade de escoamento, profundidade da água e tempo de chegada da inundação. Esses resultados foram acoplados a um SIG para definir as áreas inundadas e avaliar possíveis ameaças que o rompimento da barragem poderia representar para vidas e para as infraestruturas.

De acordo com a metodologia de Mattas *et al.*, (2023), foi feito o produto da profundidade pela velocidade, que considera uma variável crítica para danos causados nas infraestruturas (Brunner, 2015) e nas vidas humanas (Jonkman & Penning-Rowsel, 2008).

Essa metodologia consiste na álgebra das cartas, que permite combinar diferentes camadas de informação geográfica por meio de operações matemáticas. A integração entre a carta de velocidade e carta de profundidade é essencial para compreender a dinâmica da inundação e seus impactos.

As cartas de velocidade representam a distribuição espacial da velocidade da água em um evento de inundação, elas indicam a rapidez do escoamento em cada ponto da área inundada, e são fundamentais para análises de erosão, transporte de sedimentos e riscos de arraste de pessoas e veículos. As cartas de profundidade mostram a altura da lâmina d'água em cada ponto da área inundada, elas determinam a severidade da inundação e auxiliar no planejamento urbano.

A Equação 7 mostra a álgebra das cartas, onde é calculado o Índice de Periculosidade (IP), que resulta em informações sobre o comportamento do fluxo e seus impactos. Com a carta de IP é possível a identificação de áreas de maior risco (onde há combinação de grande profundidade e alta velocidade), e a definição de zonas seguras e rotas de evacuação em planos de defesa civil.

$$IP = \text{Carta de velocidade} \times \text{Carta de profundidade}$$

7

Essa metodologia de gerar carta de velocidade X carta de profundidade já foi utilizada pelos pesquisadores Pistrika & Jonkman (2010), Musolino *et al.*, (2020) e Zhu *et al.*, (2021), quando avaliaram o perigo de inundação.

A avaliação do IP foi realizada na classificação baseada no produto da velocidade máxima de escoamento pela profundidade da água. Essa classificação adota quatro categorias IP (Tabela 1), de acordo com os estudos HNFMSC (2006), e Mattas *et al.*, (2023).

Tabela 1 - Graus do Índice de Periculosidade.

Categoria de gravidade da inundação	Profundidade*Velocidade (m ² /s)
Baixo	<0,2
Médio	0,2–0,5
Alto	0,5–2,5
Extremo	>2,5

Fonte: Adaptado de Mattas *et al.*, (2023).

A Tabela 2 caracteriza os resultados, utilizando as considerações de PNUD (2001) e Alves Junior *et. al.* (2023). Os níveis de risco são definidos com base em parâmetros hidrodinâmicos e sociais, incluindo a profundidade da água (águas mais profundas representam maior perigo para pessoas, veículos e edificações), a velocidade do fluxo (escoamento rápidos aumentam o risco de arraste e erosão), e o uso e ocupação do solo (áreas urbanizadas sofrem impactos mais severos do que zonas rurais devido à presença de infraestrutura e população mais densa).

Tabela 2 - Níveis de Índice de Periculosidade.

Categoria de gravidade da inundação	Cor no Mapa	Descrição
Extremo	Roxo	Risco evidente de construções serem destruídas. Alta possibilidade de fatalidade.
Alto	Vermelho	As construções têm alta possibilidade de serem destruídas. Pessoas ficam em perigo, dentro ou fora de suas casas.
Médio	Laranja	As construções podem sofrer danos irreparáveis. Pessoas ficam em perigo fora de suas casas.
Baixo	Amarelo	As construções podem sofrer danos. Baixa ou inexistente possibilidade de fatalidade.

Fonte: Adaptado de Alves Junior *et al.*, (2023).

Outros parâmetros, como a duração da inundação e a vulnerabilidade da população, não foram considerados nesta metodologia. No entanto, a inclusão desses fatores poderia fornecer informações adicionais para um enfrentamento mais eficaz das inundações. Por outro lado, a incorporação desses elementos demandaria um conjunto de dados mais abrangente, tornando a análise mais complexa e exigindo maior disponibilidade de informações para a obtenção de resultados precisos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Calibração, ajustes e avaliação do modelo hidrodinâmico

Para avaliar o desempenho do modelo foi calculado o CV, entre a vazão de altitudes medidas e simuladas, utilizando diversos coeficientes de Manning, como mostrado na Tabela 3. O coeficiente de

Manning que apresentou o CV mais próximo de 1, foi de 0,045, com o CV de 0,96. Esse valor indica que o modelo tem boa precisão em relação aos dados medidos, com pouca variação.

Tabela 3 – Valores coeficientes de Manning usado nas simulações de calibração e seu coeficiente de determinação

Calha Principal	
Coeficientes de Manning	Coeficiente de Variação (CV)
0,065	0,86
0,055	0,92
0,045	0,96
0,035	0,87

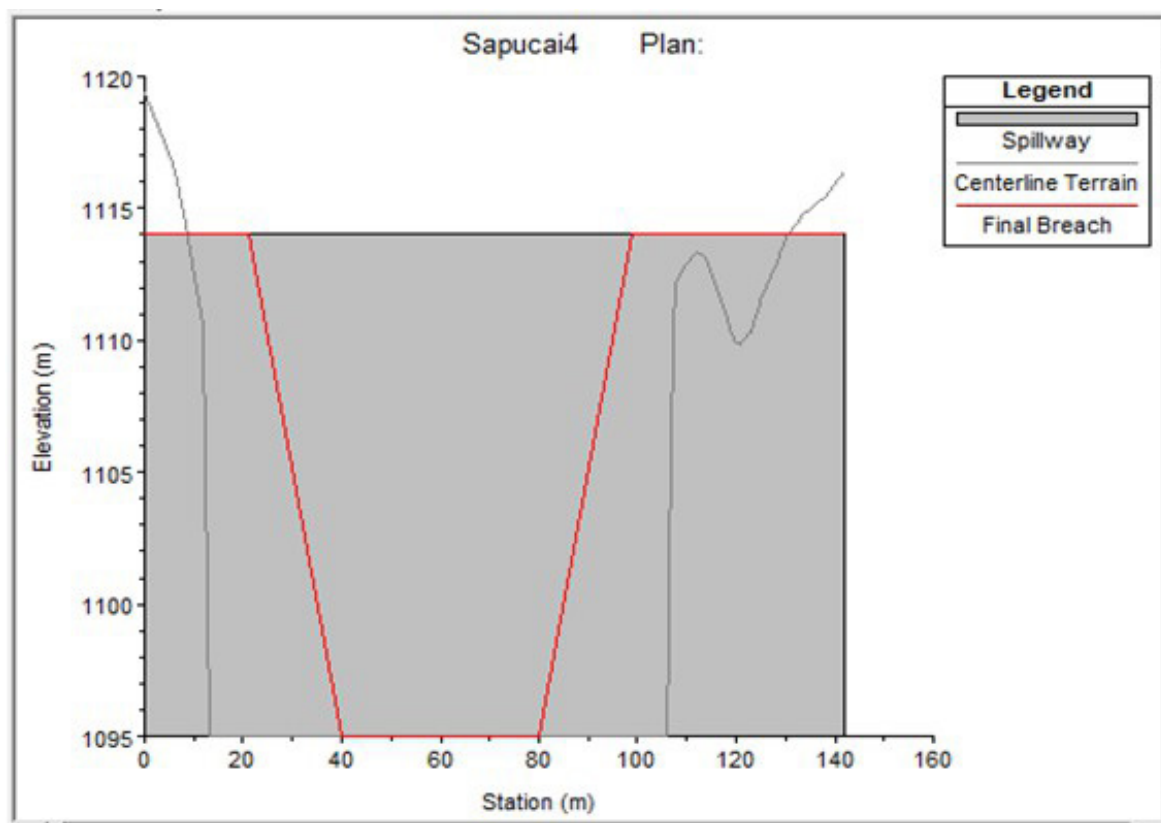
O coeficiente de rugosidade de Manning é uma variável que, geralmente, apresenta a maior incerteza e variabilidade entre os dados de entrada no programa HEC-RAS (Haile *et al.*, 2024). Para a área de estudo, os valores de rugosidade calibrados foram 0,045 para a calha principal e 0,12 para a calha secundária. O coeficiente atribuído à calha secundária foi determinado com base na tabela proposta por Chow (1959), sendo utilizado para representar a resistência ao escoamento da água em rios com vegetação densa, tanto no leito quanto nas margens, bem como em planícies de inundação, onde há resistência adicional devido à presença de vegetação ou estruturas urbanas.

3.2 Ruptura da barragem do reservatório da PCH REPI

O método de ruptura de uma barragem é complexo e não existe um método de pesquisa reconhecido e unificado para lidar com sua evolução (Al-Salahat *et al.*, 2024). Com base em alguns eventos de rompimento de barragens (Mo *et al.*, 2023; Paşa *et al.*, 2024), o formato da ruptura foi definido como um trapézio invertido.

De acordo com a simulação, a brecha da barragem do reservatório da PCH REPI se formaria no centro da barragem e próxima ao vertedor pela falha de galgamento (Figura 5). Quando o volume do reservatório ultrapassasse o volume de 2.480.000 m³ de água, 99% da capacidade máxima do reservatório, haveria a ruptura da barragem. A partir desse momento, haveria a ruptura, que se daria no tempo de 15 minutos, com uma largura na crista de 68 m e no fundo de 40 m, com é mostrado pela linha vermelha na Figura 6. (Froehlich, 2008).

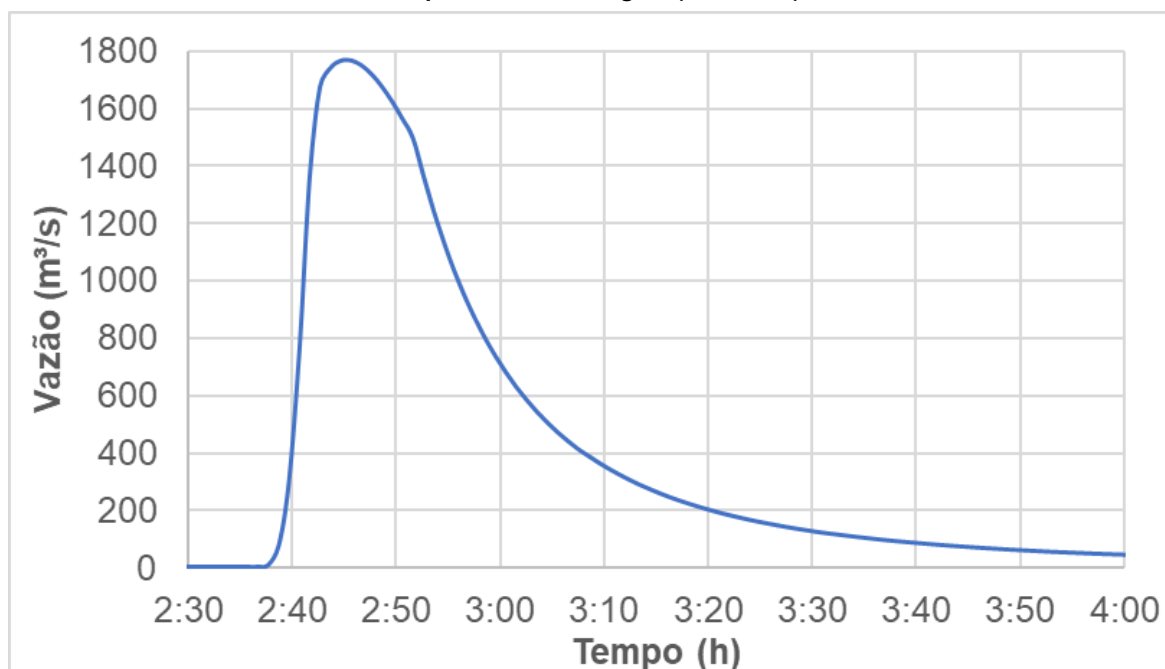
Figura 6 – Brecha da barragem do reservatório da PCH REPI, vertedouro (área cinza), topografia (linha cinza) e ruptura (linha vermelha).



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 7 mostra o hidrograma desse evento. A ruptura teria início às 2h38min, atingindo o pico da onda de escoamento em 10 minutos, com uma vazão máxima de 1.770 m³/s, altura de 14,80 m e velocidade de 3 m/s. A duração total do evento seria de aproximadamente 1h20min, com a vazão variando de 1,5 m³/s até 1.770 m³/s nos primeiros 10 minutos. Posteriormente, o escoamento diminuiria gradualmente, levando 1h10min para que a vazão do rio retornasse a valores inferiores a 20 m³/s. Estima-se que 95% do volume do reservatório seria drenado em 80 minutos, sendo que 85% desse volume escoaria nos primeiros 20 minutos. Esses resultados estão em conformidade com as conclusões apresentadas por Carvalho *et al.*, (2024), Silva & Silva (2021) e Raman & Liu (2019), que indicam que a ruptura abrupta de uma barragem acarreta impactos de grande magnitude, podendo resultar em inundações catastróficas a jusante.

Figura 7 – Hidrograma após a ruptura da barragem do reservatório da PCH REPI, fluxo de água após o rompimento da barragem (linha azul).



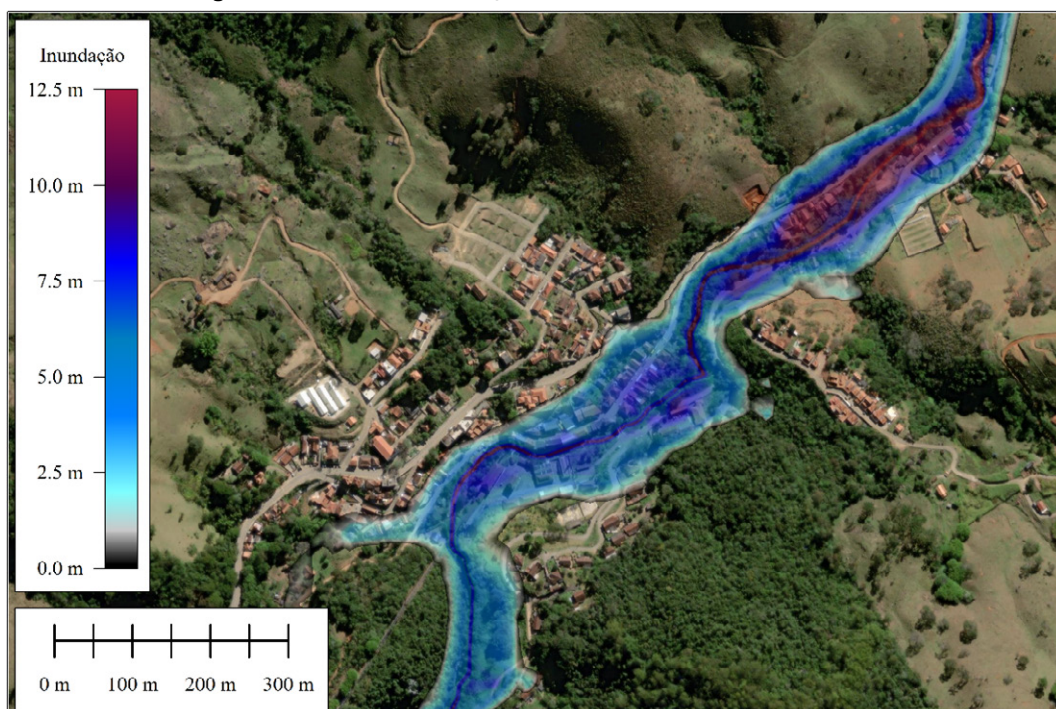
Fonte: Elaborado pelos autores.

3.3 Cartas de Inundação

As cartas de inundações fornecem representações visuais do impacto de um evento de rompimento de barragem em uma área urbana (Shahrim & Ros, 2020; Sumira *et al.*, 2023; Mo *et al.*, 2023). O mapeamento das áreas suscetíveis às inundações, é uma ferramenta que ajuda a avaliar e a compreender a extensão do potencial impacto de evento de inundações. Essas cartas servem como um recurso valioso para planejamentos urbanos, equipes de emergência e tomadores de decisões, ajudando no desenvolvimento de estratégias para mitigar os riscos de inundações e aumentar a resiliência da comunidade face a tais desastres naturais (Al-Salahat *et al.*, 2024).

O rompimento da barragem do reservatório PCH REPI, traria consequências devastadoras para a cidade de Wenceslau Braz – MG, onde 30% da zona urbana ficaria inundada com altura média de 7 m. A onda de inundação atingiria a cidade em 8 minutos e, expiraria em 15 minutos, um dos fatores que condiciona esse tempo de chegada é a topografia da cidade ser encaixada no vale, isso faz com que a inundação se torne mais impactante, pois não há planície para a onda de inundação se dissipar (Lazzarin *et al.*, 2023; Abdelkarim & Gaber, 2023). A Figura 8 mostra a carta de inundação após o evento de simulação do rompimento da barragem.

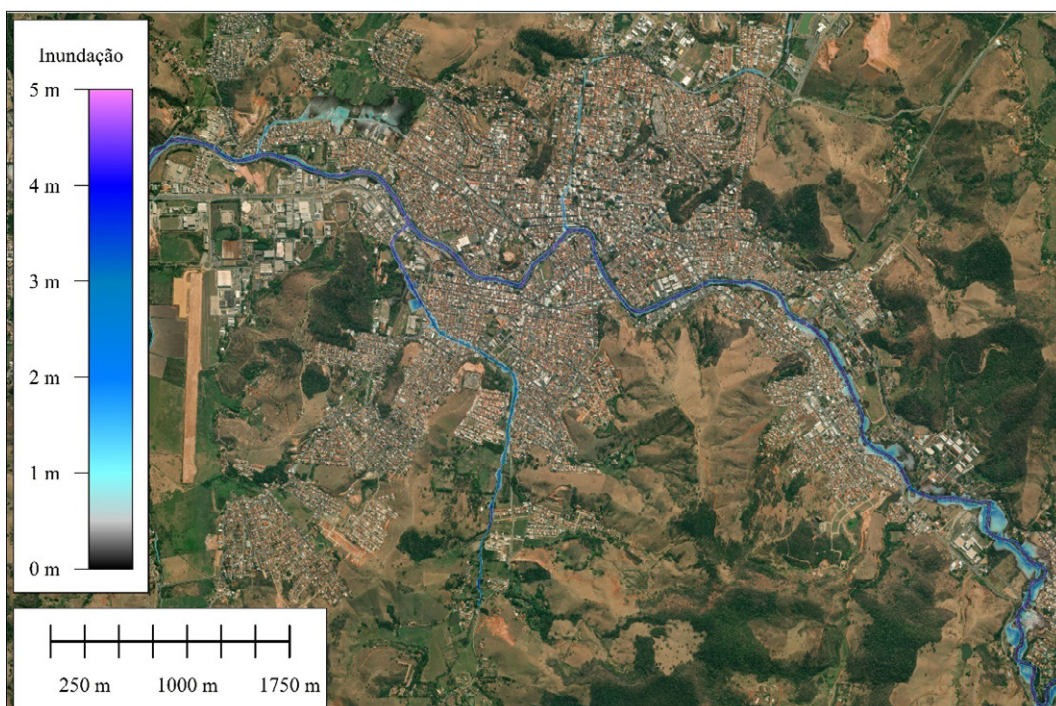
Figura 8 – Carta de inundação da cidade de Wenceslau Braz.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A onda de inundação chegaria em 4 horas na cidade de Itajubá – MG. A vazão do rio Sapucaí, aumentaria 500%, de 15 m³/s passaria para 90 m³/s, o nível do rio subiria em 2,70 metros em 3 horas. O evento duraria 18 horas até que o nível do rio Sapucaí voltasse ao normal. A Figura 9 mostra a zona urbana da cidade de Itajubá após o evento do rompimento da barragem, ficando visível que algumas áreas de várzeas ficariam inundadas.

Figura 9 – Carta de inundação da cidade de Itajubá.



Fonte: Elaborado pelos autores.

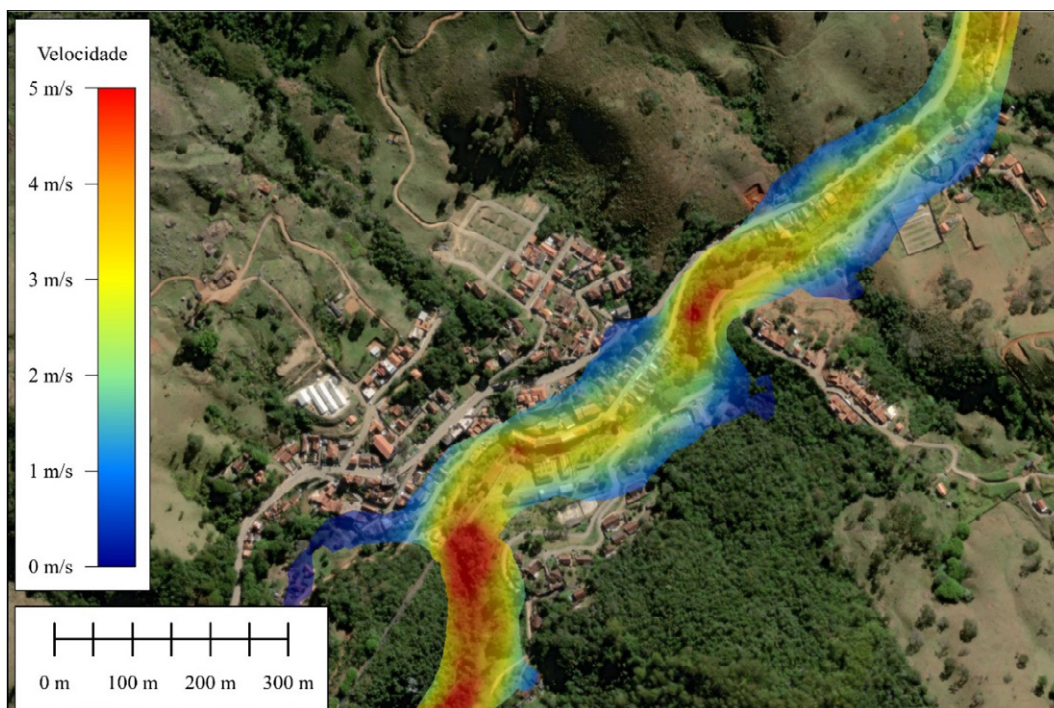
3.4 Cartas de velocidade de escoamento

As cartas de velocidade de escoamento da inundação são valiosas para os tomadores de decisões, em casos de emergência. Essas cartas auxiliam na alocação de recursos e no envio de pessoal durante o evento de inundação. As equipes de emergência podem utilizá-las para identificar áreas com inundações rápidas, permitindo-lhes priorizar as operações de resgate e identificar locais para a navegação segura (Barrionuevo *et al.*, 2024).

Como a cidade de Wenceslau Brás está próxima da barragem, e ainda possui uma topografia encaixada no curso do rio de Bicas, consequentemente a velocidade de escoamento é muito elevada. Nos primeiros minutos após a onda de inundação atingir a cidade, a velocidade de escoamento do curso do rio de Bicas passaria de 0,3 m/s para 3 m/s. As velocidades muito elevadas se concentrariam nos primeiros 8,5 km a jusante da barragem, com valores variando de 2,5 m/s a 6 m/s.

A Figura 10 mostra a velocidade máxima de escoamento que transpassaria a cidade de Wenceslau Brás. Essa alta velocidade ameaçaria à segurança da população e a infraestrutura da cidade.

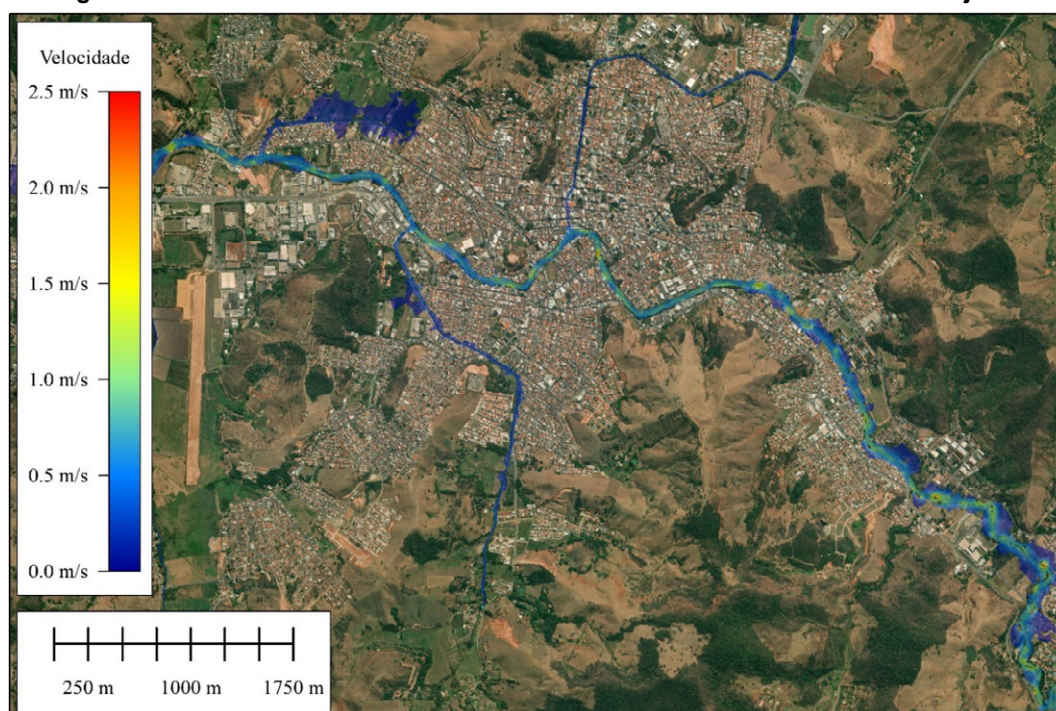
Figura 10 – Carta de velocidade de escoamento na zona urbana da cidade de Wenceslau Brás.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Como a topografia da região é, grande parte, encaixada nos cursos d'água, as águas do evento do rompimento chegariam com velocidade alta. O evento aumentaria a velocidade do rio Sapucaí em 100%, passando de 0,4 m/s para 0,8 m/s. A Figura 11 mostra que em grande parte da área urbana de Itajubá não haveria transbordamento (inundação), este ocorreria somente nas áreas de várzeas. A velocidade alta de escoamento se concentraria no centro da calha principal. Outra mudança no escoamento do rio Sapucaí aconteceria nas confluências de seus afluentes, que teriam a vazão consideravelmente aumentada devido ao somatório da vazão.

Figura 11 – Carta de velocidade de escoamento na zona urbana da cidade de Itajubá.



Fonte: Elaborado pelos autores.

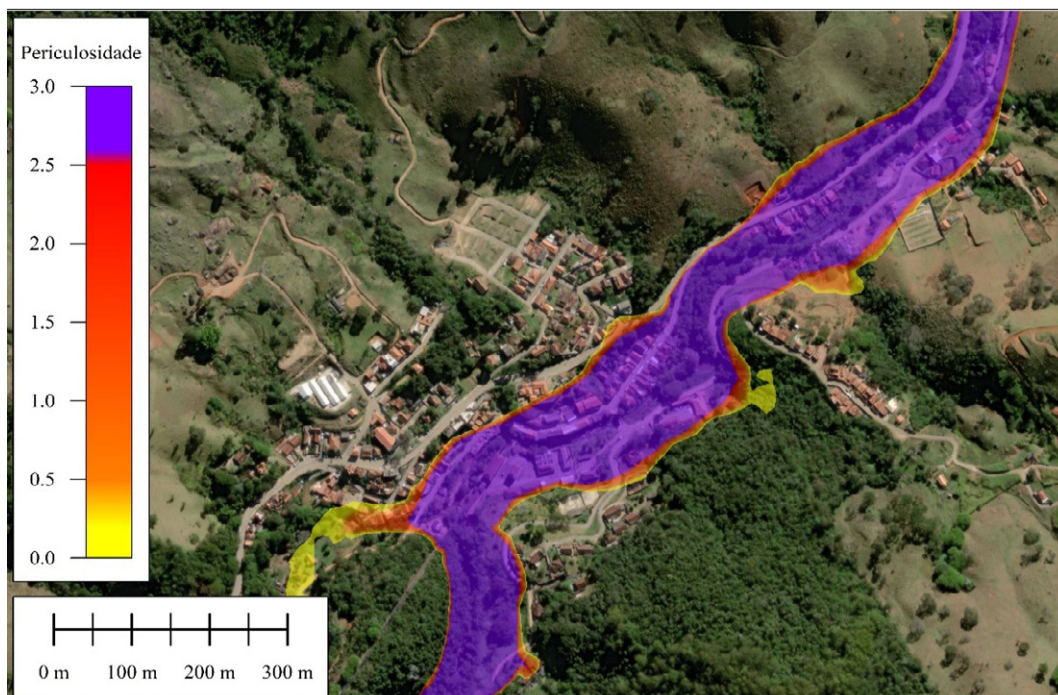
3.5 Cartas de Índice de Periculosidade (IP)

As cartas de IP dependem em grande parte da velocidade e da profundidade das águas da inundação, quanto maiores se tornam estes fatores, maior é o perigo para as pessoas e propriedades (Derdous *et al.*, 2015; Maranzoni *et al.*, 2023).

A cidade de Wenceslau Braz está muito próxima da barragem,) dessa maneira as águas do rompimento chegariam com grande velocidade e com grande volume, trazendo consequências devastadoras por onde passarem. De acordo com a categorização do IP de inundação, com base na profundidade da água e na velocidade de escoamento, a infraestrutura nas margens do rio de Bicas estaria na categoria de gravidade extrema. Havendo riscos evidentes às construções e às pessoas, como mostra a Figura 12.

A ruptura da barragem gera impactos sociais profundos e devastadores para a cidade, incluindo possíveis perdas de vidas humanas, deslocamento forçado da população, comprometimento da saúde pública, desestruturação econômica e social, intensificação das desigualdades sociais e aumento da desconfiança nas instituições públicas. As consequências podem ser de longo prazo, exigindo medidas emergenciais, planejamento estratégico e ações governamentais eficazes para mitigar os danos e promover a reconstrução social e econômica da cidade afetada.

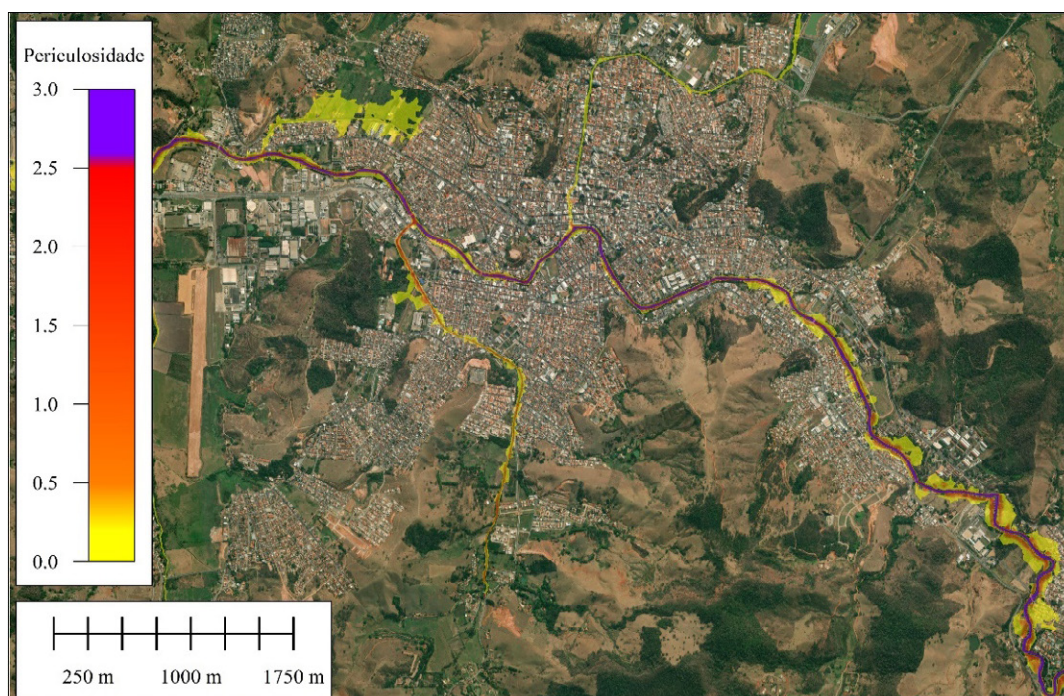
Figura 12 – Carta de periculosidade na zona urbana da cidade de Wenceslau Braz, níveis de risco da inundação, extremo (roxo), alto (vermelho), médio (laranja) e baixo (amarelo).



Fonte: Elaborado pelos autores.

O pico de onda de inundação próximo à barragem seria de 1.700 m³/s e quando chegasse na cidade de Itajubá, o pico da inundação passaria a 90 m³/s. A onda de inundação perderia energia, devido à distância e às planícies. A cidade de Itajubá está a mais de 20 km de distância da barragem, com isso o IP diminuiria. A Figura 13 mostra, que somente a calha principal do rio Sapucaí ofereceria risco alto, as demais estão classificadas como risco baixo, que não representam risco às construções e às pessoas.

Figura 13 – Carta de periculosidade na zona urbana da cidade de Itajubá, níveis de risco da inundação, extremo (roxo), alto (vermelho), médio (laranja) e baixo (amarelo).



Fonte: Elaborado pelos autores.

4 CONCLUSÕES

Apesar do rompimento de uma barragem ser um evento complexo e por vezes imprevisível, o monitoramento e a avaliação de riscos são medidas não estruturais de extrema importância, pois podem ser usados como informações primárias no desenvolvimento de medidas estruturais adequadas de prevenção e mitigação. Contudo, os mecanismos exatos que podem causar o rompimento da barragem e os procedimentos dos fenômenos de inundação são geralmente menos previsíveis, e o procedimento de simulação para tais fenômenos requer o conhecimento de dados e valores de parâmetros que nem sempre estão facilmente disponíveis. Apesar destas limitações, os resultados da simulação fornecem informações suficientes e com uma confiabilidade significativa para que os tomadores de decisão, gestores e autoridades criem planos para gerir uma situação de crise e minimizar os impactos em caso de rompimento de uma barragem.

Este estudo demonstrou uma abordagem eficaz para simular um hipotético rompimento da barragem do reservatório da PCH REPI, com intuito de avaliar os efeitos do rompimento para as cidades de Wenceslau Braz e de Itajubá. Com a utilização do programa HEC-RAS, este estudo foi capaz de fornecer uma visão geral do evento, desde a formação do rompimento até a propagação da onda de inundação ao longo das áreas a jusante.

É importante destacar que este estudo apresenta um cenário específico de ruptura da barragem da PCH REPI. No entanto, há uma ampla variedade de possíveis cenários de falha, uma vez que a ruptura de uma barragem pode ocorrer sob diferentes condições e dinâmicas. O cenário adotado nesta pesquisa foi deliberadamente escolhido para representar um evento de alta severidade, possibilitando a análise dos impactos mais críticos e adversos associados a esse tipo de desastre.

Os resultados desta pesquisa podem contribuir para o aprimoramento dos Planos de Ação de Emergência (PAE), favorecendo a implementação de respostas mais eficazes e a mitigação dos impactos em situações de emergência. No entanto, recomenda-se que estudos futuros considerem diferentes cenários críticos, de modo a subsidiar um planejamento mais abrangente, fortalecer o monitoramento contínuo e aprimorar o treinamento das comunidades e das autoridades responsáveis, garantindo maior eficácia na gestão de riscos associados a barragem da PCH REPI.

Durante a inundação, as cartas de velocidade e as cartas de Índice de Periculosidade (IP) podem ajudar na alocação de esforços, permitindo uma distribuição prioritária de recursos humanos e financeiros. Como simulação da ruptura da barragem foi feita de maneira extrema, o município de Wenceslau Braz teria poucos minutos para realizar uma evacuação, enquanto que o município de Itajubá teria mais tempo. Ter o conhecimento do tempo de evacuação é crucial em uma emergência, pois o intervalo de tempo entre a primeira chegada da água da inundação e a descarga máxima é muito curto. Emissões sonoras devem ser acionadas fazendo com que as pessoas deixem suas residências imediatamente. Para que isso ocorra de forma eficiente, a população deveria receber treinamentos e capacitações oferecidos pelos responsáveis pela barragem, com base no Plano de Ação de Emergência do empreendimento.

Os desastres com rompimento de barragens acontecem quase todos os anos no Brasil. Assim, metodologias de baixo custo, como o mapeamento de risco, pode ser adotadas como medida de prevenção e remediação. Os resultados desse modelo de ruptura da barragem poderiam ser usados na preparação de desenvolvimento de plano de emergência para prevenir impactos nas comunidades a jusante em caso de rompimento da barragem, contudo, o planejamento das ações de emergência deve considerar vários cenários, além do estado e da possível evolução dos graus de vulnerabilidade social nas áreas com potencial de serem atingidas. Estudos dessa natureza também podem ser utilizados como subsídio para a formulação de Planos Diretores Municipais, auxiliando no zoneamento urbano e na regulamentação do uso e ocupação do solo, promovendo um desenvolvimento mais seguro e resiliente.

5 REFERÊNCIAS

ABDELKARIM, A., & GABER, A. Flood risk mapping and mangement in urban areas: Integrating geomatics and hydrodynamic modeling—A case study of Al Bidi City, Saudi Arabia. *Inf. Sci. Lett.*, 12(9), 2411-2443, 2023. <https://digitalcommons.aaru.edu.jo/cgi/viewcontent.cgi?article=2302&context=isl>

ABDESSAMED D., ABDERRAZAK B. Coupling HEC-RAS and HECHMS in rainfall–runoff modeling and evaluating floodplain inundation maps in arid environments: case study of Ain Sefra city, Ksour Mountain SW of Algeria. *Algeria Environ Earth Sci* 2019(78):586, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8604-6>

AEMI – AUSTRALIAN EMERGENCY MANAGEMENT INSTITUTE. Technical Flood Risk Management Guideline: **Flood Hazard**; **AEMI**: Canberra, Australia, 2014. https://www.googleadservices.com/pagead/aclk?sa=L&ai=DChcSEWj-iLrZiHAXVjZUgAHYX0OYYYABAAGgJjZQ&ase=2&gclid=CjwKCAjwnK60BhA9Ei-wAmpHZw9QAK7seRqdyKR9zy9O098UCD8JeP9qBhOqJJBuBCvtGctAbqAveiBoCvZYQAvD_BwE&ohost=www.google.com&cid=CAESVuD2Cmjg4H3d9EWkN5C-7pdmhvjaLOUJc_06m7BiCZCM5eCy2FemJB0bTn0aX29Rb-1N6NcfdxrsEI6FIZFwuzqffHkPcSS-y4fCSYUZ8PrbUcCFJuB0&sig=AOD64_1iUxFU0ucmLbI42muKzE3TQC-cd2w&q&nis=4&adurl&ved=2ahUKEwiXnLPZiHAXW0LbkGHfvnCmUQ0Qx6BAgJEAE

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Resolução nº 168**, de 11 de agosto de 2020. Estabelece diretrizes para [...]. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 12 ago. 2020. <https://www.gov.br/ana/pt-br/legislacao/resolucoes/resolucoes-regulatorias/2023/168#:~:text=Disp%C3%B5e%20sobre%20as%20condi%C3%A7%C3%B5es%20gerais,Hidrogr%C3%A1ficas%20do%20Nordeste%20Setentrional%20%E2%80%93%20PISF>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Resolução nº 236**, de 29 de agosto de 2017. Estabelece diretrizes sobre [...]. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 30 ago. 2017. <https://www.gov.br/ana/pt-br/legislacao/resolucoes/resolucoes-regulatorias/2017/236>

ALBUQUERQUE, V. O. **Hibridização de fontes de energia renováveis-estudo de caso de usina hidrelétrica reversível com usina fotovoltaica flutuante**. Monografia submetida à Banca Examinadora da Especialização em Fontes Renováveis, da Escola de Engenharia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Minas Gerais, 2022. <http://hdl.handle.net/1843/50702>.

AL-SALAHAT, M., AL-WESHAH, R., & AL-OMARI, S. Dam break risk analysis and flood inundation mapping: a case study of Wadi Al-Arab Dam. *Sustainable Water Resources Management*, 10(2), 74, 2024. <https://doi.org/10.1007/s40899-024-01051-0>

ALVES JUNIOR, F. M., KOBIYAMA, M., & CORSEUIL, C. W. Mapeamento de índice de risco de inundação de área a jusante de uma barragem em caso de rompimento. *Mercator (Fortaleza)*, 22, e22004, 2023. <https://doi.org/10.4215/rm2023.e22004>

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Guia de orientação e formulários do plano de ação de emergência – PAE**, 2016. https://www.snish.gov.br/Entenda_Mais/volume-iv-guiade-orientacao-e-formularios-dos-planos-de-acao-de-emergencia-2013-pae.

ANDRADE, A. C. F. **Mapeamento e caracterização do sistema rio-planície da Amazônia central via sensoriamento remoto e modelagem hidráulica**. Tese de doutorado, Instituto de pesquisas Hidráulicas. Universidade

Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. <http://hdl.handle.net/10183/211269>

ANNUNZIATO, A., SANTINI, M., PROIETTI, C., DE GIROLAMO, L., LORINI, V., GERHARDINGER, A., & TUCCI, M. Modelling and Validation of the Derna Dam Break Event. **GeoHazards**, 5(2), 504-529, 2024. <https://doi.org/10.3390/geohazards5020026>

ASF – Alaska Satellite Facility. **ALOS PALSAR DEM** (Advanced Land Observing Satellite – Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar Digital Elevation Model). 2022. <https://search.asf.alaska.edu/>

ÁVILA, J. **Acidentes em barragens de rejeitos no Brasil**. Palestra ministrada. Governo do Estado de São Paulo, 2016. <http://www.energia.sp.gov.br/wpcontent/uploads/2016/07/ACIDENTES-EMBARRAGENS-JoaquimPimenta-Pimentade-%C3%81vila-Engenharia.pdf>

BARRIONUEVO, J. F. S., CASTRO NOBLEJAS, H., & MÉRIDA RODRÍGUEZ, M. F. Mapping Tools for Flood Risk Rescue and Assistance Management. **Land**, 13(1), 68, 2024. <https://doi.org/10.3390/land13010068>

BBC – BRITISH BROADCASTING CORPORATION. Brazil dam collapse mine chief steps down. **Retrieved March 6, 2019**. <https://www.bbc.com/news/business-47432134>

BRASIL. **Lei nº 12334**, de 20 de setembro de 2010. Brasília, DF, 2010. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm

BRITO, T. R. R. L. **Modelagem hidrológica e hidráulica a partir de dados TRMM aplicada a análise de risco em áreas inundáveis: estudo de caso do município de Atalaia**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017. <http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/riufal/1755>.

BRUNNER, G. Using HEC-RAS for Dam break studies. USACE HEC Technical Document TD-39. **US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center**, Davis, 2014. <https://www.hec.usace.army.mil/publications/TrainingDocuments/TD-39.pdf>

BRUNNER, G. W. 2D Modeling and Mapping with HEC-RAS v. 5 **Monticello Dam Breach**. **US Army Corps of Engineers**: Davis, CA, USA, 2015. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest/working-with-hec-ras>

BURELE, N. S., & BURELE, S. A. **Dam Break studies of Khadakwasla dam**, 2023. https://www.researchgate.net/profile/Sanjay-Burele/publication/376893967_Dam_Break_studies_of_Khadakwasla_dam/links/658e975e6f6e450f19b30543/Dam-Break-studies-of-Khadakwasla-dam.pdf.

CARMO, F. F., KAMINO, L. H. Y., JUNIOR, R. T., DE CAMPOS, I. C., DO CARMO, F. F., SILVINO, G., & PINTO, C. E. F. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. **Perspectives in ecology and conservation**, 15(3), 145-151, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>

CARVALHO, M. C. P., SILVA, L. G. V., CÂNDIDO, E. S., DE MOURA LEÃO, L., FIA, F. R. L., & RIBEIRO, A. G. C. Análise de ruptura hipotética para barragens em cascata. **Ciência ET Praxis**, 19(34), 64-82, 2024. <https://doi.org/10.36704/cipraxis.v19i34.8062>

CHEN, Y., & FALCONER, R. A. Advection-diffusion modelling using the modified QUICK scheme. **International Journal for Numerical Methods in Fluids**, 15(10), 1171-1196, 1992. <https://doi.org/10.1002/fld.1650151003>

CHOW, V. T. Open-Channel Hydraulics, **McGraw-Hill Book Company**. New York, 507-510, 1959. <https://heidarpour.iut.ac.ir/sites/heidarpour.iut.ac.ir/files/u32/open.pdf>

CLAUSEN, L.K. **Potential Dam Failure: Estimation of Consequences, and Implications for Planning**. Master's Thesis, School of Geography and Planning, Middlesex Polytechnic Collaborating with Binnie and Partners, Redhill, UK, 1989. <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:04fa9a92-6390-461f-a8b6-bd588291a805/datastream/OBJ/download>

DAL-FARRA, R.; OLIVEIRA, R.; DAL-FARRA, R. Gestão Ambiental: A Necessária Convergência Entre Medidas Estruturais E Não Estruturais Em Um Estudo De Caso. Científica, p. 53, 2015. http://www.cetfaesa.com.br/_cetfaesa/site/pdfs/revistascientifica/revistafaesa_07_site.pdf#page=54

DARJI KR, VYAS UH, PATEL D, DEWALS B. **A dam break analysis of damanganga dam using HEC-RAS 2D hydrodynamic modelling and geospatial techniques**, 2024. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3557-4_1/COVER

DECINA, T., BRANDÃO, J. Análise De Desempenho De Medidas Estruturais E Não Estruturais De Controle De Inundações Em Uma Bacia Urbana. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 21, 91 n. 1, p. 207-217, 2016. <https://doi.org/10.1590/S1413-41520201600100116134>

DERDOUS O, DJEMILI L, BOUCHEHED H, TACHI S. E. A GIS based approach for the prediction of the dam break flood hazard—a case study of Zardezas reservoir “Skikda, Algeria”. **J Water Land Dev** 27(1):15–20, 2015. <https://doi.org/10.1515/jwld-2015-0020>

FARAHMAND, H., XU, Y., MOSTAFAVI, A. A spatial-temporal graph deep learning model for urban flood nowcasting leveraging heterogeneous community features. **Sci Rep** 13, 6768, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32548-x>

FAROOQ, M., SHAFIQUE, M. & KHATTAK, M. S. Flood hazard assessment and mapping of River Swat using HEC-RAS 2D model and highresolution 12-m TanDEM-X DEM (WorldDEM). **Natural Hazards** 97, 477–492, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03638-9>

FERLA, R. **Metodologia simplificada para análise de aspectos hidráulicos em rompimento de barragens**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/180112>

FROEHLICH, D. C. Embankment dam breach parameters and their uncertainties. **Journal of Hydraulic Engineering**, 134(12), 1708-1721, 2008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:12\(1708\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1708))

FROEHLICH, D. C. Peak outflow from breached embankment dam. **Journal of water Resources Planning and management**, 121(1), 90-97, 1995. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1995\)121:1\(90\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1995)121:1(90))

GEE, M. M., HORNING, E., GUPTA, S., NEWTON, A. J. H., CHENG, Z. J., LYTTON, W. W., LENHOFF, A. M., SCHWABER, J. S., & VADIGEPALLI, R. Unpacking the multimodal, multi-scale data of the fast and slow lanes of

the cardiac vagus through computational modelling. **Experimental Physiology**, 109(12), 1994–2000, 2024. <https://doi.org/10.1113/EP090865>

GOERL, R. F., KOBIYAMA, M., & PELLERIN, J. R. G. M. Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundação: estudo de caso do município de Rio Negrinho–SC. **Boletim de Geografia**, 30(1), 81-100, 2012. https://www.academia.edu/download/43316464/Proposta_metodologica_para_mapeamento_de_20160303-22082-187am3y.pdf

HAILE, T., GOITOM, H., DEGU, A. M., GRUM, B., & ABEBE, B. A. Simulation of urban environment flood inundation from potential dam break: case of Midimar Embankment Dam, Tigray, Northern Ethiopia. **Sustainable Water Resources Management**, 10(2), 46, 2024. <https://doi.org/10.1007/s40899-023-01008-9>

HNFMSC – Hawkesbury-Nepean Floodplain Management Steering Committee. Designing Safer Subdivisions on Floodplains; **Hawkesbury Nepean Floodplain Management Steering Committee: Parramatta**, Australia, 2006. https://www.ses.nsw.gov.au/media/2249/subdivision_guidelines.pdf

HOLLY JR, F. M., & PREISSMANN, A. Accurate calculation of transport in two dimensions. **Journal of the Hydraulics division**, 103(11), 1259-1277, 1977. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0004870>

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2022**, 2024. Itajubá. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/itajuba/panorama>

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2022**, 2024. Wenceslau Braz. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/wenceslau-braz/panorama>

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). Itajubá, 2010. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/itajuba/panorama>

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). Wenceslau Braz, 2010. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/wenceslau-braz/panorama>

ICOLD – INTERNATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS. Bulletin 181: Tailings Dam Design: Technology Update. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2022. <https://www.icoldchile.cl/boletines/181.pdf>

JONKMAN, S. N., & PENNING-ROWSELL, E. (2008). Human instability in flood flows 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, 44(5), 1208-1218. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00217.x>

JONKMAN, S. N., & PENNING-ROWSELL, E. Human instability in flood flows 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, 44(5), 1208-1218, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00217.x>

JUNG, C. G.; KIM, S. J. Comparison of the Damaged Area Caused by an Agricultural Dam-Break Flood Wave Using HEC-RAS and UAV Surveying. **Agricultural Sciences**, v. 8, p.1089-1104, 2017. <https://doi.org/10.4236/as.2017.810079>

KUHLKAMP, J. D. F. **Análise do efeito em cascata da propagação da onda de cheia gerada pelo rompimento hipotético de uma das barragens existentes no rio Irani-SC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. <https://www.labhidro.ufsc.br/en/thesis>

LAZZARIN, T., DEFINA, A., & VIERO, D. P. Assessing 40 years of flood risk evolution at the micro-scale using an innovative modeling approach: the effects of urbanization and land planning. **Geosciences**, 13(4), 112, 2023. <https://doi.org/10.3390/geosciences13040112>

MACDONALD, T. C., & LANGRIDGE-MONOPOLIS, J. Breaching characteristics of dam failures. **Journal of Hydraulic Engineering**, 110(5), 567-586, 1984. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:5\(567\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:5(567))

MARANZONI, A., D'ORIA, M., & RIZZO, C. Quantitative flood hazard assessment methods: A review. **Journal of Flood Risk Management**, 16(1), e12855, 2023. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12855>

MARCIANO, A. G. **Caracterização da hidrodinâmica e do transporte de sedimentos dos três principais afluentes do rio Doce**. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Itajubá, 2024. <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/4047>

MARCIANO, A. G. **Modelagem Hidrodinâmica com a integração do mapeamento das inundações do rio Sapucaí do município de Itajubá/MG**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Hídrica da Universidade Federal de Itajubá, 2019. <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1968>

MARCIANO, A. G., ASSIREU, A. T., AZEVEDO, S. C. D., SILVA, B. C. D., ABREU, A. T. D., & NALINI, H. A. Dramatic changes in the confluence morphology driven by an extreme hydrologic pulse: impacts to River Doce restoration. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 29, e9, 2024. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420230139>

MARTA-ALMEIDA, M., MENDES, R., AMORIM, F. N., CIRANO, M., & DIAS, J. M. Fundação Dam collapse: Oceanic dispersion of River Doce after the greatest Brazilian environmental accident. **Marine Pollution Bulletin**, 112(1), 359–364, 2016. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X16306038>

MARTINEZ, C., B., RIBEIRO, D., S., SILVA, A., C., PASSARO, M., C. **Análise das Perdas de Geração Elétrica como consequência do incremento da rugosidade pelo fator temporal: Estudo de Caso da PCH REPI**. XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – Belo Horizonte, 2021. <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/179/I-FLUHIDROS0086-1-0-20220624-160726.pdf>

MATTAS, C., KARPOUZOS, D., GEORGIU, P., & TSAPANOS, T. Two-dimensional modelling for dam break analysis and flood hazard mapping: A case study of papadia dam, northern greece. **Water**, 15(5), 994, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15050994>

MO, C., CEN, W., LEI, X., BAN, H., RUAN, Y., LAI, S., ... & XING, Z. Simulation of dam-break flood and risk assessment: a case study of Chengbi River Dam in Baise, China. **Journal of Hydroinformatics**, 25(4), 1276-1294, 2023. <https://iwaponline.com/jh/article-pdf/doi/10.2166/hydro.2023.193/1264031/jh0251276.pdf>

MONTE, B. E. O., TSCHIEDEL, A. D. F., & GOLDENFUM, J. A. Índice de risco aplicado a potencial rompimento de barragem por simulações 1D e 2D. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (22.: Florianópolis, 2017). Anais Porto Alegre: ABRH, 2017. <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/173903/001060264.pdf?sequence=1>

MUSOLINO, G., AHMADIAN, R., & FALCONER, R. A. Comparison of flood hazard assessment criteria for pedestrians with a refined mechanics-based method. **Journal of Hydrology X**, 9, 100067, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2020.100067>

NASCIMENTO, J. P., SILVA, M. I. M. D. C., BELLO, V., DA SILVA, T. B., & SILVA, W. M. P. Simulação de Rompimento da Barragem São Bento do Una através do Software HEC-RAS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 15(02), 856-871, 2022. <https://pdfs.semanticscholar.org/d10d/63304e369025c2058ccfeb0f3b51bf3e5116.pdf>

NETO, A. R., BATISTA, L. F. D. R., & COUTINHO, R. Q. Metodologias para Geração de Mapa de Indicadores de Perigo e Áreas Inundáveis: Município de Ipojuca/PE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 21, 377-390, 2016. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n2.p377-390>.

NISTORAN, D. E. G., IONESCU, C. S., & SIMIONESCU, Ș. M. Influence of dam break scenarios on flood wave characteristics. Case study–Paltinu Dam, Romania. In **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science** (Vol. 1136, No. 1, p. 012031). IOP Publishing, 2023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1136/1/012031>.

PACUERA – PLANO AMBIENTAL DE CONSERVAÇÃO E USO DO ENTORNO DE RESERVATÓRIO ARTIFICIAL. **Estudo da IMBEL - Indústria de Material Bélico do Brasil – Itajubá, Piquete**, 2019. http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/Pacuera/Agosto_2019/PACUERA_PCH_REPI.pdf.

PALU, M. C. **Floodwave and sediment transport assessment along the Doce river after the Fundao tailings dam collapse (Brazil)**. Tese de Doutorado. Dept. of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University, 2019. <https://search.proquest.com/openview/5cc1e9d1181398464eaa52e56b3b8db4/1?pqorigsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>.

PAŞA, Y., PEKER, İ. B., HACI, A., & GÜLBAZ, S. Dam failure analysis and flood disaster simulation under various scenarios. **Water Science & Technology**, 87(5), 1214-1231, 2023. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.052>.

PEREIRA, F. G., FIRME, P. H. C., COTTA, J. P. V. Plano de Ação de Emergência de barragens de mineração: evolução, conceito e discussões. **Territorium: Revista Internacional de Riscos**. 28, 53-66, 2021. https://doi.org/10.14195/1647-7723_28-1_4

PERINI, D. S. **Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra**. Dissertação de Mestrado - Curso de Geotecnia, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2009. <http://repositorio2.unb.br/jspui/handle/10482/4363>.

PILOTTI, M., MILANESI, L., BACCHI, V., TOMIROTTI, M., & MARANZONI, A. Dam-break wave propagation in alpine valley with HEC-RAS 2D: experimental cancano test case. **Journal of Hydraulic Engineering**, 146(6), 05020003, 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.000177](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.000177)

PISTRIKA, A. K., & JONKMAN, S. N. Damage to residential buildings due to flooding of New Orleans after hurricane Katrina. **Natural Hazards**, 54, 413-434, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9476-y>.

PNUD – United Nations Development Programme. PREVEENE: Contribution to “Natural” Disaster Prevention in Venezuela. **Cooperation: Venezuela – Switzerland – PNUD**, 2001. <https://www.eird.org/eng/revista/no-14-2007/art41.html>.

RAMAN, A., & LIU, F. An investigation of the Brumadinho Dam Break with HEC RAS simulation. **arXiv preprint arXiv:1911.05219**, 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.05219>

RANGEL, B. D. Á. (2021). **Comportamento morfológico no delta do rio Magdalena (Colômbia) devido as**

variações da vazão em escala intra e interanual. Tese de doutorado. Programa de engenharia oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufrj-peno_upl/THESIS/10002785/doutorado_borisavila_20220304081600403.pdf.

SHAHIRIM, M. F., & ROS, F. C. (2020). Dam break analysis of temenggong dam using hec-ras. In IOP conference series: earth and environmental science. **IOP Publishing**, Vol. 479, No. 1, p. 012041, 2020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/479/1/012041>.

SILVA, E. L., & SILVA, M. A. D. Segurança de barragens e os riscos potenciais à saúde pública. **Saúde em Debate**, 44, 242-261, 2021. <https://doi.org/10.1590/0103-11042020E217>

SMITH, G., DAVEY, E., COX, R. Flood hazard (WRL Technical Report 2014/07). **Sydney: UNSW**, 2014. <https://www.aidr.org.au/media/2334/wrl-flood-hazard-technical-report-september-2014.pdf>.

STEPHENSON, D. Integrated flood plain management strategy for the Vaal. **Urban Water**, 4(4), 423-428, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(02\)00032-8](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(02)00032-8).

SUMIRA, M., ANGGRAHENI, E., & PRASTICA, R. M. S. Dam Break Analysis of Sermo Dam. In **Journal of the Civil Engineering Forum**. Vol. 9, No. 2, pp. 127-138, 2023. Universitas Gadjah Mada. <https://doi.org/10.22146/jcef.5619>.

TSCHIEDEL, A. D. F. **Avaliação de fontes de incerteza em estudos de rompimentos de barragens.** Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. <http://hdl.handle.net/10183/164266>.

USACE – UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. Hydrologic Engineering Center's – **Using HEC-RAS for Dam Break Studies**. Davis, CA, 2024. <https://www.hec.usace.army.mil/publications/TrainingDocuments/TD-39.pdf>.

VILAS BOAS, A. H. **Uso experimental de câmeras digitais para o estudo da concentração de sólidos em suspensão em sistemas aquáticos continentais.** Dissertação de mestrado do Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Itajubá, 2014. <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/412>.

VON THUN, J. L., & GILLETTE, D. R. Guidance on breach parameters. **US Department of the Interior, Bureau of Reclamation**, 1990. <https://usbr.contentdm.oclc.org/digital/collection/p15911coll24/id/30392>.

XU, Y., & ZHANG, L. M. Breaching parameters for earth and rockfill dams. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 135(12), 1957-1970, 2009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.000016](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.000016).

ZHU, Z., ZHANG, Y., GOU, L., & PANG, B. An entropic approach to estimating the instability criterion of people in floodwaters. **Entropy**, 23(1), 74, 2021. <https://doi.org/10.3390/e23010074>