



UNILAB

**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-
BRASILEIRA
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS**

JUED LOMBA PURNA

**RUPTURA DE BARRAGENS EM CASCATA EM UMA REDE DE
RESERVATÓRIOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO AÇUDE PENTECOSTE**

REDENÇÃO - CE

2025

JUED LOMBA PURNA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Energias, da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias.

Orientador: Prof. Dr. George Leite Mamede.

REDENÇÃO - CE

2025

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Purna, Jued Lomba.

P985r

Ruptura de barragens em cascata em uma rede de reservatórios na
bacia hidrográfica do açude pentecoste / Jued Lomba Purna. -
Redenção, 2025.
0f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de
Engenharias E Desenvolvimento Sustentável, Universidade da
Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção,
2025.

Orientador: Prof. Dr. George Leite Mamede.

1. Barragens - Desenvolvimento da fenda. 2. Caracterização
geométrica de barragens. 3. Sensoriamento remoto. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 624.18340981

JUED LOMBA PURNA

**RUPTURA DE BARRAGENS EM CASCATA EM UMA REDE DE RESERVATÓRIOS
NA BACIA HIDROGRÁFICA DO AÇUDE PENTECOSTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Energias, da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias.

Aprovado em: 29/05/2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **GEORGE LEITE MAMEDE**
Data: 04/06/2025 10:02:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. George Leite Mamede

Documento assinado digitalmente
 **ALEXANDRE CUNHA COSTA**
Data: 03/06/2025 14:09:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alexandre Cunha Costa

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ MARTINS DE ARAUJO JUNIOR**
Data: 03/06/2025 20:49:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luiz Martins De Araújo Júnior

A Deus.

Aos meus pais, Paulo e Angelina.

Aos meus irmão, Misael, Elisafam e Mirna.

Aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus Todo-Poderoso pela vida que me proporcionou durante todos esses anos. Porque Dele, e por meio dele, e para Ele são todas as coisas.

Agradeço a meus pais, que se esforçaram muito para que esse sonho se tornasse realidade. Meus agradecimentos a eles que sempre estiveram ao meu lado.

Agradeço a meus irmãos, que sempre me encorajam dando aquela força de permanecer firme e que em todo o tempo colocam à minha disposição.

Agradeço imensamente ao Governo Federal do Brasil que financiou meus estudos.

Agradeço a Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), pela essa enorme oportunidade de poder cursar Engenharia de Energias.

Agradeço aos meus professores do curso, que contribuíram bastante no meu percurso acadêmico e que sempre estão dispostos a transmitir o que sabem com toda força e dedicação.

Agradeço a equipe do grupo de pesquisa de Processamento e Gerenciamento de Energias Renováveis e Controle (PGERC) da UNILAB na pessoa do professor Vandilberto Pereira Pinto por me fazer integrar ao grupo de pesquisa.

Agradeço aos professores doutor Alexandre Cunha Costa, doutor Luiz Martins De Araújo Júnior, doutor Antônio Marcelo Cavalcanti Novaes e doutor Lailson Ferreira da Silva, por trabalharem comigo no projeto da elaboração do plano de gestão proativa de secas do cientista chefe do Estado do Ceará.

Agradeço ao grupo de pesquisa Hidrologia e Sustentabilidade de Hidrossistemas, da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira por me aceitarem como membro do grupo de pesquisa.

Agradeço ao meu orientador, professor doutor George Leite Mamede que me orientou durante o período de desenvolvimento do projeto da iniciação científica e consequentemente no andamento deste trabalho. Um imenso agradecimento a ele por ser um excelente orientador e pesquisador que demonstrou muito empenho, paciência, tranquilidade e principalmente por seu exemplo de profissionalismo e de vida, sou muito grato.

“Não a nós, SENHOR, não a nós, mas ao teu nome dá glória, por amor da tua misericórdia e da tua fidelidade.”

(Salmos 115:1).

RESUMO

O estado do Ceará é predominantemente semiárido e supostamente conhecido por possuir uma densa rede de reservatórios superficiais, que em muitas localidades da região se encontram de forma sequencial, isto é, em cascata. A pesquisa tem como objetivo simular a ruptura de barragens em cascata em uma rede de 15 reservatórios localizados na bacia hidrográfica do Açude Pentecoste. Para aquisição dos dados utilizou-se Sistemas de Informações Geográficas SIG para melhor representar a distribuição espacial das chuvas intensas, e consequentemente adquirir informações que caracterizam a bacia hidrográfica do Riacho Nogueira. A simulação do escoamento superficial foi realizada com o modelo HEC-HMS (Hydrologic Modeling System), considerando o método do Soil Conservation Service - SCS-CN, para a curva de intensidade-duração frequência - IDF da estação meteorológica de Pentecoste para tempos de retorno de 10, 25, 50, 100, 1.000 e 10.000 anos. A modelagem hidráulica da ruptura das barragens foi realizada com o HEC-RAS (River Analysis System), com a caracterização da fenda em processo de ruptura a partir de dados medidos no açude Escola, que rompeu em 2020, e demais atributos derivados de equações próprias. Os resultados indicam que vazões elevadas com tempos de retorno superiores a 100 anos são potenciais desencadeadores de ruptura de barragens em cascata. Os estudos também mostram que os reservatórios maiores, com capacidade de acumulação superiores a um milhão de m³, conseguem atenuar ondas de cheia resultantes de ruptura de barragens menores em cascata, mas ainda estão sujeitos a ruptura para vazões com tempo de retorno de 1.000 e 10.000 anos.

Palavras-chave: Desenvolvimento da fenda; Caracterização geométrica de barragens; Sensoriamento remoto.

ABSTRACT

The state of Ceará is predominantly semiarid and is known for having a dense network of surface reservoirs, which in many locations in the region are located sequentially, that is, in cascade. The research aims to simulate the rupture of cascade dams in a network of 15 reservoirs located in the Pentecoste Reservoir basin. Geographic Information Systems (GIS) were used to acquire the data to better represent the spatial distribution of heavy rainfall and, consequently, to acquire information that characterizes the Riacho Nogueira basin. The surface runoff simulation was performed with the HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) model, considering the Soil Conservation Service (SCS-CN) method for the intensity-duration-frequency curve (IDF) of the Pentecoste meteorological station for return times of 10, 25, 50, 100, 1,000 and 10,000 years. The hydraulic modeling of the dam rupture was performed using HEC-RAS (River Analysis System), with the characterization of the rupture crack based on data measured at the Escola dam, which ruptured in 2020, and other attributes derived from its own equations. The results indicate that high flows with return times greater than 100 years are potential triggers for the rupture of cascading dams. The studies also show that larger reservoirs, with storage capacity greater than one million m³, can attenuate flood waves resulting from the rupture of smaller cascading dams, but are still subject to rupture for flows with return times of 1,000 and 10,000 years.

Key words: Crack development; Geometric characterization of dams; Remote sensing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de rompimento da barragem por galgamento (overtopping)	22
Figura 2 – Exemplo de rompimento da barragem por piping	22
Figura 3 – Localização da área do estudo	29
Figura 4 – Hietograma da chuva de projeto e hidrograma de saída gerado com o HEC-HMS	35
Figura 5 – Hidrogramas de vazões de saída gerado pelo modelo HEC-HMS	37
Figura 6 – Geometria da fenda simulada com HEC-RAS	39
Figura 7 – Manchas de inundação da reprodução do açude Escola	40
Figura 8 – Regressão pela coeficiente a (valores em vermelhos referem-se a dois açudes da bacia hidrográfica do Riacho Nogueira investigados nesta pesquisa)	40
Figura 9 – Fluxogramas ilustrando os acontecimentos da ruptura	42
Figura 10 – Manchas de inundações dos 15 açudes	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dados dos relatórios de segurança de barragens	21
Quadro 2 – Precipitações máximas para os tempos de retorno de 10, 25, 50, 100, 1.000 e 10.000 anos e diferentes durações derivadas da curva IDF do Posto Pentecoste	32
Quadro 3 – Parâmetros de entrada dos 15 açudes estudados	35
Quadro 4 – Vazões de pico na entrada para os 15 açudes analisados na bacia hidrográfica do Riacho Nogueira	36
Quadro 5 – Largura dos vertedores	41
Quadro 6 – Vazões de pico na saída dos 15 açudes por vertimento ou ruptura da barragem (destacado em laranja)	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CV	Coeficiente de Variação
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
ICOLD	International Commission On Large Dams, em inglês
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
SRH	Secretaria de Recursos Hídricos
WMO	World Meteorological Organization, em inglês
S2ID	Sistema Integrado de Informações sobre Desastres
PRMS	Precipitation-Runoff Modeling System, em inglês
SWMM	Storm Water Management Model, em inglês
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System, em inglês
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center - River Analysis System, em inglês
ASDSO	Association of State Dam Safety Officials, em inglês
RSB	Relatório De Segurança De Barragens
ANA	Agência Nacional de Água
CE	Ceará
G1	Globo
RS	Rio Grande do Sul
SWEs	Shallow Water Equations, em inglês
ST	Sediment Transport, em inglês
MT	Mud and Tailings Flow, em inglês
PL	Pollutant Transport, em inglês
WQ	Water Quality, em inglês
UD	Urban Drainage, em inglês
PT	Plastic Transportation, em inglês
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
GERD	Grand Ethiopian Renaissance Dam, em inglês

USACE	United States Army Corps of Engineers, em inglês
DEM	Digital Elevation Model, em inglês
BEVC	Bacia Experimental Vale do Curu
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission, em inglês
SCS-CN	Soil Conservation Service Curve Number, em inglês
CN	Curve Number, em inglês
UTM	Universal Transverse Mercator, em inglês
USGS	United States Geological Survey, em inglês

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivos específicos.....	16
2. REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 Rede de reservatórios	17
2.2 Eventos extremos de escoamento.....	18
2.3 Rompimento de barragens	20
2.4 Modelagem de ruptura de barragens.....	23
2.3.1 Modelo RiverFlow 2D	25
2.3.2 Modelo Flo-2D	25
2.3.3 Modelo Mike 21	26
2.3.4 Modelo Flow-3D	26
2.3.5 Modelo OpenFoam.....	27
2.3.6 Modelo HEC-RAS	27
3. METODOLOGIA	28
3.1 Caracterização da área de estudo.....	28
3.2 Modelagem hidrológicas de eventos extremos com o HEC-HMS	29
3.3 Modelagem hidráulica de ruptura de barragens com o HEC-RAS	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1 Cheias máximas na bacia hidrográfica.....	34
4.1.1 Aplicação para o açude Escola.....	35
4.1.2 Aplicação para uma rede de reservatórios.....	36
4.2 Simulação da ruptura de barragens e propagação da onda de cheia	38
4.2.1 Aplicação para o açude Escola.....	39
4.2.2 Aplicação para uma rede de reservatórios.....	40
5. CONCLUSÕES	45
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1. INTRODUÇÃO

O Estado do Ceará possui uma população de quase 9 milhões de habitantes. O clima é predominantemente semiárido, compreendendo mais de 90% do seu território. A precipitação média anual é de 810 mm, variando de mais de 1.200 mm próxima ao litoral, e em algumas regiões montanhosas, para menos de 600 mm no sertão, onde a evaporação potencial anual pode chegar a 2.200 mm. A estação chuvosa é concentrada entre fevereiro e maio, somando 70% da precipitação anual. Entretanto, a variabilidade interanual, sazonal e mensal é elevada (Araújo *et al.*, 2023; Mamede *et al.*, 2018).

Os rios naturalmente são transitórios ou intermitentes, provocando o escoamento da precipitação anual variando de 10 a 20% com alta variabilidade temporal (com CV anual geralmente superior a 1,0) (Güntner e Bronstert, 2004). Os aquíferos aluvionares são responsáveis por receberem as perdas no processo transitórios dos grandes rios que são maioritariamente endógenos (Costa *et al.*, 2012, 2013). Além disso, os aquíferos aluvionares locais no sertão são normalmente salinos e “cravados” em rochas cristalinas com baixa densidade de fraturas (Frischkorn *et al.*, 2003). A estrutura cristalina no estado abarca cerca de 80% e oportuniza a geração de solos rasos com fragmentos de rochas. A desertificação no Ceará está com 12%, sendo que o fenômeno afeta drasticamente o bioma da caatinga e os moradores da região (CGEE, 2016). A evapotranspiração real é em torno de 78% da precipitação anual (SUDENE, 1980).

Com a reforma da política de águas, estabeleceu uma direção descentralizada e participativa para as maiores bacias hidrográficas no começo dos anos 90, sendo que a solução para a escassez hídrica na região era vista por meio da construção massiva de obras de infraestrutura hidráulica, como barragens e canais (Gutiérrez *et al.*, 2014). Como consequência, existem mais de 7.000 barramentos com bacia hidráulica maior que 5 ha no Ceará (FUNCEME, 2008), produzindo uma densa rede de reservatórios que impactam enormemente a conectividade do escoamento superficial na escala de bacia e a propagação das cheias (Güntner *et al.*, 2004; Mamede *et al.*, 2018).

No estado do Ceará – CE é comum encontrar pequenas barragens localizadas de forma sequenciada de modo que aquelas localizadas à jusante recebem aporte proveniente das posicionadas à montante, seja por liberação pela tomada d’água para perenização do trecho de rio entre elas seja por extravasamento pelo vertedor quando o nível de água acumulada extrapola a cota de soleira destas estruturas. No caso de pequenas barragens localizadas em cascata, em geral desprovidas de estruturas de regularização de vazões, a conexão entre elas se

dá exclusivamente por eventos de vertimentos. No caso de rompimento de uma barragem localizada à montante, a onda de cheia resultante é, em geral, bem superior à vazão de projeto do vertedor da barragem imediatamente à jusante, podendo ocasionar a ruptura desta e outras barragens localizadas à jusante na cascata (Fusaro *et al.*, 2012).

A ruptura de barragens é um tipo de desastre que vem ocorrendo com frequência, de acordo com o Relatórios de Segurança de Barragens da Agência Nacional de Água (ANA - 2019, 2020 e 2021) e outras fontes, com vários casos de grande repercussão nacional, sobretudo no caso de barragens de rejeitos e vários outros em barragens de armazenamento hídrico, sendo alguns deles reportados no Estado do Ceará (ver detalhes na Seção 2.3). Nesta pesquisa, analisou-se o processo de ruptura de barragens em uma rede com 15 reservatórios de uma bacia hidrográfica semiárida.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo principal caracterizar o processo de ruptura em cascata em uma rede com 15 reservatórios em uma bacia hidrográfica do Semiárido Brasileiro.

1.1.2 Objetivos específicos

- Simular a propagação da onda de cheia gerada nas sub-bacias de uma amostra de 15 reservatórios em cascata na bacia hidrográfica do Açude Pentecoste;
- Reproduzir o processo de desenvolvimento da fenda e ruptura da barragem do açude Escola e a propagação da onda de cheia resultante ao longo do trecho a jusante;
- Simular a ruptura de barragens em cascata e seus efeitos à jusante considerando uma amostra de 15 reservatórios conectados na bacia hidrográfica do açude Pentecoste.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Rede de reservatórios

A ausência de água é mais uma razão que concorre para o desequilíbrio ecológico nos sistemas hídricos, nas regiões semiáridas e nas zonas que apresentam um déficit crônico de precipitação (Madeiros *et al.*, 2024).

A região semiárida brasileira é restrita em água, e ela exibe uma margem das temperaturas médias anuais em torno de 18 °C, com contribuição de precipitação menores que a evapotranspiração potencial (Madeiros *et al.*, 2024).

Além disso, existem também os fatores como por exemplo solos rasos e leito rochoso cristalino, que são as características geológicas dominantes na região que contribuem para a elevada escassez d'água subterrânea e a intermitência dos rios. Dessa forma, a descontinuidade dos fluxos é causada pela intermitência dos cursos d'água nos períodos de seca (Madeiros *et al.*, 2024).

Por isso, recorda Cortez *et al.* (2022), que alguns anos atrás o nordeste brasileiro vivenciou um episódio de seca extrema e prolongada, o qual considerou um dos mais rigorosos dos últimos 60 anos; a seca plurianual (2012 - 2019). O evento, por sua vez, contribuiu na redução da quantidade e na qualidade da água, e, afetou de maneira direta as atividades agrícolas na região. De modo geral, aproximadamente cerca de 6 milhões de pequenos agricultores perderam seus cultivos devido à seca plurianual.

Diante desse cenário de secas recorrentes, uma estratégia adotada no semiárido brasileiro foi a construção de densas redes de reservatórios (Mamede *et al.*, 2012). Essas estruturas hidráulicas têm potencial de contribuir no desenvolvimento local, assim como cooperam na mitigação do estresse hídrico na região (Thales *et al.*, 2023).

Para isso, as autoridades, os donos de terras e as comunidades locais adotaram a construção de milhares de reservatórios, possuindo uma enorme variedade de tamanho no curso dos rios capazes de distribuir a água armazenada no período chuvoso durante longo período da seca (Peter *et al.*, 2014).

A rede de reservatórios é crucial nos processos de transporte de água em bacias hidrográficas. Sendo que, as estruturas a montante permitem que ocorra uma conexão contínua do sistema ainda durante a estações secas, porque elas retêm uma parte considerável do escoamento gerado pela rede fluvial. Esses reservatórios, por sua vez, contribuem na extensão da vida útil dos reservatórios a jusante, atuando como bacias de retenção de sedimentos,

agregando certa quantidade de sedimento gerado nas bacias hidrográficas (Mamede *et al.*, 2018).

Desde o século XIX, milhares de reservatórios foram construídos para armazenamento hídrico no período úmido e disponibilização no período seco (Rottler *et al.*, 2024). No período entre 1958 e 1966, registrou-se a construção de vários grandes reservatórios no Estado do Ceará, a exemplo da construção do reservatório Araras com 860 hm³ (1958), Orós com 1940 hm³ (1962) e Banabuiú com 1601 hm³ (1966). Mais recentemente, em 2002, foi construído, no Estado do Ceará, o açude Castanhão, com a capacidade de 6700 hm³, isso levou a um forte crescimento na capacidade de armazenamento dos reservatórios monitorados. Cerca de 60% do volume total monitorado dos reservatórios, são representados por estes quatro reservatórios (Rottler *et al.*, 2024).

As redes de reservatórios eficientes, tornaram-se crucial na mitigação da demanda por água causada por um elevado crescimento financeiro em algumas localidades. E essas construções não foram planejadas na maioria das vezes, mas simplesmente construídas por agricultores, normalmente com ajuda financeira governamental, de acordo com as suas necessidades locais de suprimento de água (Mamede *et al.*, 2012).

Dessa forma, aponta Mamede *et al.* (2012) a importância de acumular água ao longo da estação chuvosa por um denso e agregado reservatórios superficiais, a fim de poder atender a população no período de seca. Em particular, ao longo dos últimos séculos o semiárido brasileiro presenciou a construção de rede de reservatórios de alta capacidade (um para cada cerca de 5 km²), a fim de atender o abastecimento humano (Rocha e Lima Neto, 2022).

Portanto, a densa rede de reservatórios coopera na mitigação de seca, assim sendo, é primordial a amplificação das informações da rede hidrográfica ou rede de drenagem para esclarecer a transmissão da seca em bacias reguladas por reservatórios (Zhou *et al.*, 2023).

2.2 Eventos extremos de escoamento

As inundações têm sido um grande risco que gera preocupação universal, com impactos desastrosos presenciados nos países em desenvolvimento (Chapagain *et al.*, 2025). Tais eventos de escoamento e inundações cresceram muito em regiões urbanas causando perdas de vidas significativas e danos materiais devido às mudanças climáticas globais e a urbanização acelerada que contribuiu seriamente nos padrões de uso do solo (Chen *et al.*, 2025; Lu *et al.*, 2025). Além disso, Chapagain *et al.* (2025) afirmam que as mudanças climáticas intensificam

cada vez mais e isso piora as ameaças de enchentes global por meio do crescimento nos eventos extremos de precipitação e amplificação dos riscos de inundações costeiras.

Entre os anos de 2000 e 2019, a organização meteorológica mundial (World Meteorological Organization - WMO) registrou que cerca de 1,6 bilhões de pessoas foram afetadas mundialmente pelas 44% das inundações ocorridas em todo mundo (Soares *et al.*, 2025). Apenas em 2023, foram aproximadamente 32,4 milhões de pessoas afetadas pelas inundações, e mais de 7.700 vidas foram ceifadas consequentemente causou grandes perdas econômicas, principalmente na Ásia e na África (Chapagain *et al.*, 2025).

No Brasil em especial, o país da América Latina mais populoso, registrou-se entre 2000 e 2024, 108 tragédias de eventos extremos de precipitação que causaram alagamentos e perdas. Cerca de 9,1 milhões de pessoas foram atingidas, 2.451 feridos e 3.347 mortes. Além disso, os dados do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID) do governo federal registram que os eventos extremos meteorológicos são a segunda principal causa de catástrofes no Brasil, perdendo apenas para climatológicos (estiagens e secas). Nos anos de 1991 a 2023, foram registrados aproximadamente 9.407 eventos de inundações, que provocaram perdas agrícolas, humanas e materiais em todo Brasil (Fonseca *et al.*, 2025).

Recentemente, o estado do Rio Grande do Sul - Brasil foi afetado por evento hidrológico, chuvas intensas que provocaram enchentes nos hidrossistemas que consequentemente transbordaram, e atingiu 471 cidades, mais de 170 pessoas perderam a vida e desabrigou 600 mil pessoas (G1 RS, 2024).

Para Fraehr *et al.* (2025), a inundação pode ser definida como um processo de transbordamento de rios (fluvial), precipitação (pluvial), ou até mesmo tempestades que alagam terras secas. Nesse sentido, esses eventos incentivam o desenvolvimento de estudos extensivos sobre inundações, usando técnicas de simulação baseadas em modelos. Porque tanto quanto a avaliação e a prevenção efetiva do risco de inundação em eventos de chuvas extremas é de fundamental importância (Chen *et al.*, 2025).

De acordo com Soares *et al.* (2025), a literatura propõe três tipos de modelagem capazes de avaliar previsão de inundação como: modelagem baseada em física, modelagem orientada a dados e modelagem híbrida, que combina modelagem baseada em física e orientada a dados.

No entanto, vários modelos de modelagem hidrológicos vêm sendo utilizados para simulações hidrodinâmicos, como por exemplo, IPHS-1 na simulação do cenário de inundação urbano no trecho da bacia do córrego do Gregório, São Carlos - SP (Boldrin, 2005), o modelo Precipitation-Runoff Modeling System - Sistema de Modelagem de Escoamento de

Precipitação (PRMS), que simulou o escoamento de tempestades na Bacia do Rio Taunton para o evento de tempestade em 2010 (Teng *et al.*, 2018), MIKE FLOOD (Prato *et al.*, 2009), MIKE HYDRO River (Keerthy, *et al.*, 2024), o modelo hidrológico Storm Water Management Model (SWMM) (Collodel, 2009) e o modelo hidrológico disponível no Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) que vem ganhando popularidade ultimamente nas simulações dos eventos extremos, usado por (Peker *et al.*, 2024), (Chu e Steinman, 2009), (Ramly e Tahir, 2016) e os demais pesquisadores. O modelo foi utilizado no desenvolvimento desse trabalho para simular as características da propagação da onda de cheia no processo de ruptura de barragem.

2.3 Rompimento de barragens

A construção de barragens é provavelmente o melhor método para assegurar o fornecimento responsável de água e superar a crescente demanda por água devido ao aumento populacional. (Bharath *et al.*, 2021).

As barragens são arranjos de acumulação de água que desempenham um papel fortemente crucial no controle de enchentes, irrigação, abastecimento de água e geração de energia elétrica (Liu *et al.*, 2024), também elas desempenham um papel fundamental na economia do país (Bharath *et al.*, 2021).

A Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD), afirma que o mundo conta com mais de 57.000 grandes barragens, onde a maior parte dessas estruturas foram construídas no passado século e, devido a limitação nas ferramentas de avaliação de riscos de rompimento de barragens na época, essas estruturas atualmente apresentam vulnerabilidade com mudanças climáticas em todo mundo (Jibhakate *et al.*, 2024). O rompimento de barragens consiste na liberação não controlada de água armazenada em reservatórios, com severos impactos negativos a jusante. Essas cheias, normalmente levam à perda de vidas e provocam danos aos pertences (Liu *et al.*, 2024; Jibhakate *et al.*, 2024).

No ano de 2020, a Associação de Oficiais de Segurança de Barragens Estaduais (Association of State Dam Safety Officials - ASDSO) / afirmou que após 2000 o mundo sofreu com mais de 450 falhas de barragens, o qual deu em significativas desgraças e sofrimentos (ASDSO, 2020).

Liu *et al.* (2024), afirmam ainda que o planeta presenciou mais de 1.400 rompimentos de barragens nos últimos dois séculos, e que vinte dos piores causaram grandes números de mortes, isto é acima de 44.000 perdas de vida.

Jibhakate *et al.* (2024) consideraram a maior tragédia dos 36 grandes falhas de barragens a de barragem Machhu - II (Gujarat) na Índia que ocorreu em 1979 que sucedeu-se em mais de 2000 infortúnios, enquanto que na China, a mais grave aconteceu em 1975, quando houve o rompimento da barragem do reservatório Banquiao que deixou mais de 26000 mortos, a inundação afetou uma grande área de aproximadamente 12000 quilômetros quadrados (Liu *et al.*, 2024).

Como aponta o relatório de segurança de barragens (RSB) 2022, o Brasil constatou um forte acréscimo nos números de acidentes e incidentes em relação ao ano de 2021, conforme destaca o quadro 1. No ano de 2021 reportaram 13 acidentes e 37 incidentes, enquanto em 2022 houve 24 acidentes e 58 incidentes. Enquanto que no ano de 2023 o RSB da Agência Nacional de Água (ANA - 2023) relatou 25 rompimento de barragens e 25 incidentes em barragens e alguns desses casos aconteceram no Ceará e ainda existem outros casos de rompimento ocorrido no estado do Ceará como: do açude Escola em Pentecoste (2020) que o presente estudo modelou sua ruptura; o caso do açude Caraíbas em Várzea Alegre e do açude Catolé no Cedro (Freitas, 2022); em 2023 açude Romão em Farias Brito (Barata, 2023) e do açude Retiro em Maranguape (Sampaio, 2023) e recentemente, em janeiro de 2025, o rompimento de uma barragem na comunidade de Jucás, zona rural da cidade de Independência (G1 CE, 2025).

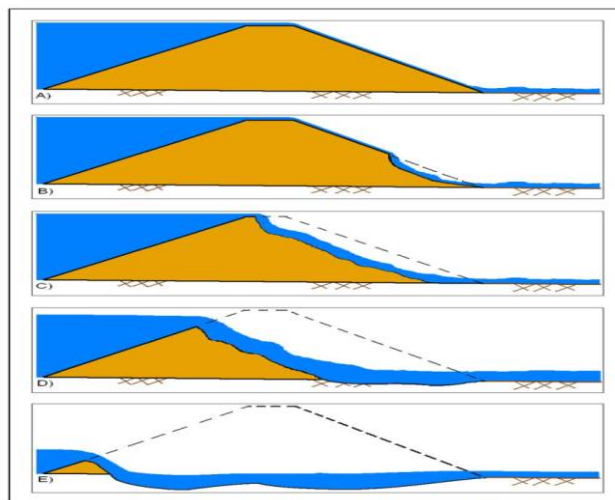
Quadro 1 – Dados dos relatórios de segurança de barragens

Relatório de Segurança de Barragens - RSB					
2021		2022		2023	
Acidentes	Incidentes	Acidentes	Incidentes	Acidentes	Incidentes
13	37	24	58	25	25

Fonte: Autor, 2025.

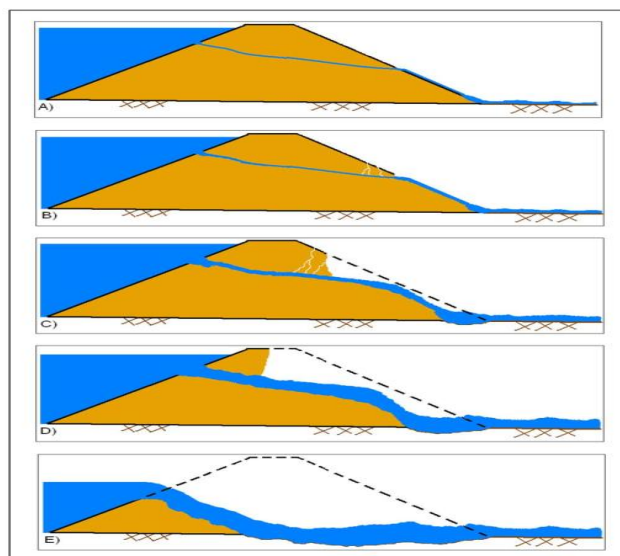
Ademais, 70% das rupturas de barragem ocorrem nos primeiros 10 anos de vida da barragem. E as principais causas dessas rupturas são devido a insuficiência da capacidade dos órgãos de descarga (vertedouro e descarregador de fundo), que provocam o galgamento (“overtopping”) da barragem (água passa por cima da barragem e erode o talude e/ou fundação) (Figura 1), também tem a ruptura por “piping” (Figura 2) que acontecem por conta dos problemas estruturais que provocam erosão interna ou nas fundações, gerando um escoamento que arrasta o solo do interior do aterro ou da fundação (RSB, 2019).

Figura 1 - Exemplo de rompimento da barragem por galgamento (overtopping)



Fonte: Bruner (2014; p. 11)

Figura 2 - Exemplo de rompimento da barragem por piping



Fonte: Bruner (2014; p. 12)

Os estudos experimentais das barragens em cascata constataram que, a ruptura de uma determinada barragem a montante afeta diretamente no aumento das fendas de barragens a jusante, o que pode provocar a ruptura das demais estruturas a jusante ou também tais estruturas (a jusante) podem ajudar muito na redução do fluxo de água e eventualmente evitando grandes tragédias (Zhang *et al.*, 2024). Portanto, a falha de várias barragens pode levar a catástrofes naturais ainda maiores.

Em todo o Brasil, de acordo com a Lei Federal 12.334/2010, que determina a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), os estudos de ruptura de barragens vêm sendo

desenvolvidos. No Ceará a nível estadual, a portaria da Secretaria de Recursos Hídricos (SRH) 2.747/2017 dispõe a fiscalização de barragens, cadastro de barragens, a revisão periódica de segurança de barragens e o plano de ação de emergência. A propósito, por meio da simulação da onda de cheia decorrente do rompimento da barragem, tornou-se possível a identificação e análise das situações de emergências pelas regiões à jusante do barramento (Ferreira e Andrzejewski, 2015).

Dessa forma, nos últimos anos vários pesquisadores desenvolveram estudos sobre rompimento de barragens e propagação da onda de cheia a jusante (Cristofono, 1973; Fread, 1984; Nogueira, 1984; Hervouet e Petijean, 1999; Tingsanchali e Rattanapitikon, 1999; Abdul, 2000; Valiani e Caleffi, 2004). Outros pesquisadores dedicaram atenção ao desenvolvimento de equações para reproduzir o processo de desenvolvimento de fenda durante eventos de rompimento de barragem (MacDonald e Langridge-Monopolis, 1984; von Thun e Gillette, 1990; Froehlich, 2008). Há ainda trabalhos recentes que focam na simulação de rompimento de barramentos naturais de rios (landslide dam) dispostos em cascata (Niu *et al.*, 2012; Cui *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2020; Takayama *et al.*, 2021).

Registra-se, ainda, alguns trabalhos desenvolvidos para simular processo de rompimento de reservatórios dispostos em cascata (Cao *et al.*, 2014; Li e Liang, 2016; Bouchehed, 2017; Zhang e Xu, 2017; Altinakar *et al.*, 2017; Luo *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2018; Cai *et al.*, 2019; Ríha *et al.*, 2020; Hu *et al.*, 2020; Campos *et al.*, 2020).

2.4 Modelagem de ruptura de barragens

As ocorrências pelas falhas de barragens, muitas vezes gera um grande impacto ao patrimônio natural e afeta consideravelmente às práticas desenvolvidas a jusante das barragens e ainda provoca perda de vidas humanas (Macchione e Graziano, 2024). As imperfeições normalmente iniciam gerando impacto limitado, se espalhando ao longo do tempo até atingir seu ponto crítico de saturação (Kays *et al.*, 2025). Porém, essa catástrofe, que em maioria dos casos produz uma grande propagação de onda de cheia gerada pela ruptura de barragens, é fortemente tomada por vários fatores, das quais o formato do canal transversal é o fator primário. Assim, é crucial compreender analiticamente a relação entre as características hidráulicas e o formato transversal da cheia de ruptura de barragens (Wang *et al.*, 2017).

Entre os vários estudos teóricos desenvolvidos sobre a propagação de ondas de inundação derivados do processo de ruptura de barragens, muitas pesquisas analíticas existentes na literatura foram dirigidas usando canais retangulares, e não só, também existe na literatura

as formulações adimensionais que podem ser usadas no estudo da propagação de ondas de inundação, o método é considerado muito significativo, pois possibilita na descoberta das características da onda de inundação, assim como na atenuação da propagação da onda a jusante (Wang *et al.*, 2017; Macchione e Graziano, 2024).

Como aponta Macchione e Graziano (2024), a modelagem das cheias resultantes das falhas de barragens pode ser produzida levando em consideração dois aspectos principais, como a geração de hidrograma de escoamento e a propagação a jusante. A propósito, a propagação da onda de cheia de inundação tem sido bastante modelada e analisada por meio das equações de Saint - Venant ou equação de águas rasas (SWEs). Nos últimos séculos estão sendo desenvolvidos modelos computacionais de alta resolução que são capazes de resolver as devidas equações.

Ademais, por meio das equações de Saint - Venant, Chagas e Mattos (2011) afirmam que é possível deduzir quatro tipos de modelos, a saber: (i) hidrodinâmicos, que utilizam as equações em sua forma mais completa; (ii) de difusão, que não consideram os termos de inércia; (iii) de onda cinemática, não consideram os termos de inércia, nem os termos de pressão; (iv) e de armazenamento, que levam em conta apenas os efeitos de armazenamento do escoamento.

Durante muito tempo, o planeta tem sido atormentado por alagamentos devido a causas naturais que muitas das vezes são provenientes das ações da humanidade, como por exemplo rompimento de barragens. Tais danos significativos causados por cheias, em consequência à falha perigosa de uma barragem virou preocupação da sociedade e dos engenheiros. Assim sendo, surgiu a grande necessidade de estudos e medições laboratoriais até simulações numéricas de escoamentos superficiais, e em especial os escoamentos provocados por falhas de barragens (Wood e Wang, 2015). A pesquisa científica sobre esses desastres é de grande relevância para prever as zonas que podem ser afetadas e consequentemente analisar e avaliar os impactos que pode provocar nas áreas a jusante (Wood e Wang, 2015). Amini *et al.* (2021) afirmam que desenvolver as investigação das falhas de barragens, levando em consideração os parâmetros de fratura, roteamento e zoneamento da enchente é de extrema importância, para melhor gerenciamento e segurança das áreas a jusante.

Vários modelos vêm sendo desenvolvidos e aplicados na simulação de ruptura de barragens, tais como: RiverFlow 2D, Flo-2D, Mike 21, Flow-3D, OpenFoam e HEC-RAS, sendo o último, o modelo escolhido para desenvolvimento deste trabalho.

2.3.1 Modelo RiverFlow 2D

O RiverFlow2D é um software comercial de modelagem hidráulica e hidrológica bidimensional de malha flexível muito avançado desenvolvido pela empresa Hydronia LLC, que desenvolve métodos para cálculo de volume finito de alto desempenho, rápidos e precisos. Ele simula as situações de inundação, ainda envolvendo as simulações de rompimento de barragens (Hydronia, 2025). O software ainda conta a sua facilidade em poder entendê-lo com módulos complementares como: Transporte de sedimentos (ST), Fluxo de lama e rejeitos (MT), Transporte de poluentes (PL), Qualidade da água (WQ), Drenagem urbana (UD) e Transporte de plástico (PT). O modelo possui uma velocidade de simulação de 700x mais rápido em comparação aos outros modelos 2D existentes, ele é capaz de utilizar duas interfaces gráficas do usuário (GUI): QGIS ou Aquaveo SMS(*) (Hydronia, 2025). Su (2020) usou este modelo para simular o transporte de sedimentos no riacho Natorsa - Taiwan província da China.

2.3.2 Modelo Flo-2D

O modelo Flo2D é uma ferramenta de modelagem hidráulica comercial considerada em 1987 para prever o comportamento dos fluidos de lama. Ele foi adaptado para realizar simulações terrestres e de canal, isto é: mapeamento de inundações urbanas, leques aluviais, inundações costeiras, rompimento de barragens e locais de energia solar e eólica (Flo2D, 2025). O modelo dispõe recursos de modelagem igual ao RiverFlow2D, ambos são de modelagem bidimensional (De Andrade *et al.*, 2024) ele permite a avaliação de escoamentos não-Newtonianos (Rodrigues e De Oliveira Nascimento, 2020). O modelo foi usado por Cesca e D'Agostino, (2008) para uma análise retrospectiva de um evento de fluxo de detritos bem documentado, que ocorreu em 5 de julho de 2006 nas Dolomitas (localidade de Fiammes, Belluno, Itália). O Flo2D foi desenvolvido para lidar com problemas de simulação de inundações urbanas com edifícios, ruas, muros e bueiros, e o mesmo pode se interagir facilmente com o GIS para gerar os arquivos de dados e mapear os resultados (O'Brien, 2022).

O Flo2D é capaz de resolver qualquer problema de inundação, incluindo:

- Inundação da margem do rio;
- Precipitação e escoamento da bacia hidrográfica;
- Inundações urbanas com fluxo de rua, obstrução de fluxo e perda de armazenamento;

- Surtos de tsunami/furacões terrestres;
- Modelagem de drenagem pluvial;
- Fluxos de lama e detritos;
- Fluxos de leque aluviais não confinados;
- Interação entre águas superficiais e subterrâneas;
- Ruptura de barragem e dique;
- Previsão de falha e volume de barragens de rejeitos;
- Estudos de seguro contra inundações;

2.3.3 Modelo Mike 21

O Mike 21 é um modelo comercial especializado em modelação bidimensional (2D), o software abrange em sua capacidade de simular, os efeitos de qualidade da água, a ecologia, e recirculação, fluxos de águas costeiras, estuarinos e fluviais, com ou sem sedimentos, usa malhas flexíveis, etc. (Mike, 2025; De Andrade *et al.*, 2024). O modelo é muito conhecido por oferecer as opções de aplicação em engenharia costeira, gerenciamento de recursos hídricos, avaliação de impacto ambiental e planejamento de adaptação às mudanças climáticas, tanto que é muito adotado por cientistas, engenheiros e profissionais ambientais (Mike, 2025). No entanto, o referido software foi usado para realizar experimentos de hindcast de ondas no Oceano Índico, considerando os dados do ano de 2005 (Remya *et al.*, 2012).

2.3.4 Modelo Flow-3D

O modelo Flow-3D é um software de simulação tridimensional (3D) muito avançado e completo com ferramentas de simulação de fácil utilização, ele tem a capacidade de rodar e suportar dados geométricos grandes, com alta velocidade e sem erros (Flow Science, 2025). As estruturas hidráulicas tal como, comportas, vertedouros, turbinas, e outras podem ser simuladas no modelo Flow-3D (De Andrade *et al.*, 2024).

Kim *et al.*, (2022) fizeram a aplicação do modelo Flow-3D quando uma análise numérica das características de escoamento de estruturas hidráulicas a jusante da barragem Changnyeong-Haman na República da Coreia.

2.3.5 Modelo OpenFoam

O OpenFoam é um software gratuito de código aberto de três dimensões de ampla gama de recursos, desenvolvido pela comunidade Open CFD Ltd em 2004, capaz de resolver problemas de simulação computacional como, fluxos de fluidos complexos incluindo problemas de reações químicas, turbulência e transferência de calor, até acústica, mecânica dos sólidos e eletromagnetismo (Open CFD Ltd, 2025). O modelo OpenFoam foi considerado adequado para simulações computacionais de engenharia costeira, após apresentar bons resultados e um alto desempenho dos cinco casos analisados (Higuera *et al.*, 2013).

2.3.6 Modelo HEC-RAS

O modelo HEC-RAS foi projetado para realizar simulações e cálculos hidráulicos e hidrológicos unidimensionais e bidimensionais, ele torna o modelo mais preferido ultimamente pelos pesquisadores por conta da sua estabilidade, seu baixo custo computacional e a capacidade de acoplar dois tipos de modelos (1D e 2D) permitindo uma análise integrado. O HEC-RAS foi desenvolvido pelo Corpo do Engenheiros do Exército dos EUA, ele possui alguns componentes de análise hidráulica como: cálculo de perfil de superfície de água de fluxo constante, simulação de fluxo instável unidimensional e bidimensional, cálculos de transporte de sedimentos de limites móveis e análise de qualidade da água (USACE, 2025). Esse software foi usado por Eldeeb *et al.* (2023), que analisaram o caso da ruptura de grand Ethiopian Renaissance dam (GERD) para avaliar possíveis impactos nas regiões a jusante, usando o software Hydrologic Engineering Center - River Analysis System (HEC-RAS) simulando em 2D. Eles ainda usaram as equações de Saint Venant de conservação de massa e conservação de momento, pelo HEC-RAS a fim de realizarem os devidos cálculos na simulação 1D e 2D.

Constataram nos resultados, que a cidade de Cartum (a jusante) ficará exposta a ondas de inundação em até 12 m de altura por conta do pico de vazão que excedeu a capacidade ideal do vertedouro da barragem principal.

Amini *et al.* (2021), usaram o modelo HEC-RAS para simular a geometria e o tempo de falha da barragem, bem como a vazão máxima nas duas barragens (Vahdat e Zhavé). E também

usou HECGeoRAS para criação do modelo digital do terreno (DEM). Nos resultados, observaram que a barragem de Vahdat sofreu transbordamento em 280 min após o início da enchente, esse transbordamento elevou o nível da água no reservatório vizinho (Zhavé) que causou a ruptura em 668 min após a simulação, isto é, 388 min após a falha da barragem de Vahdat.

Por isso, a prática de avaliação de ruptura de barragens é extremamente essencial para poder mitigar os grandes danos que podem ocorrer.

3. METODOLOGIA

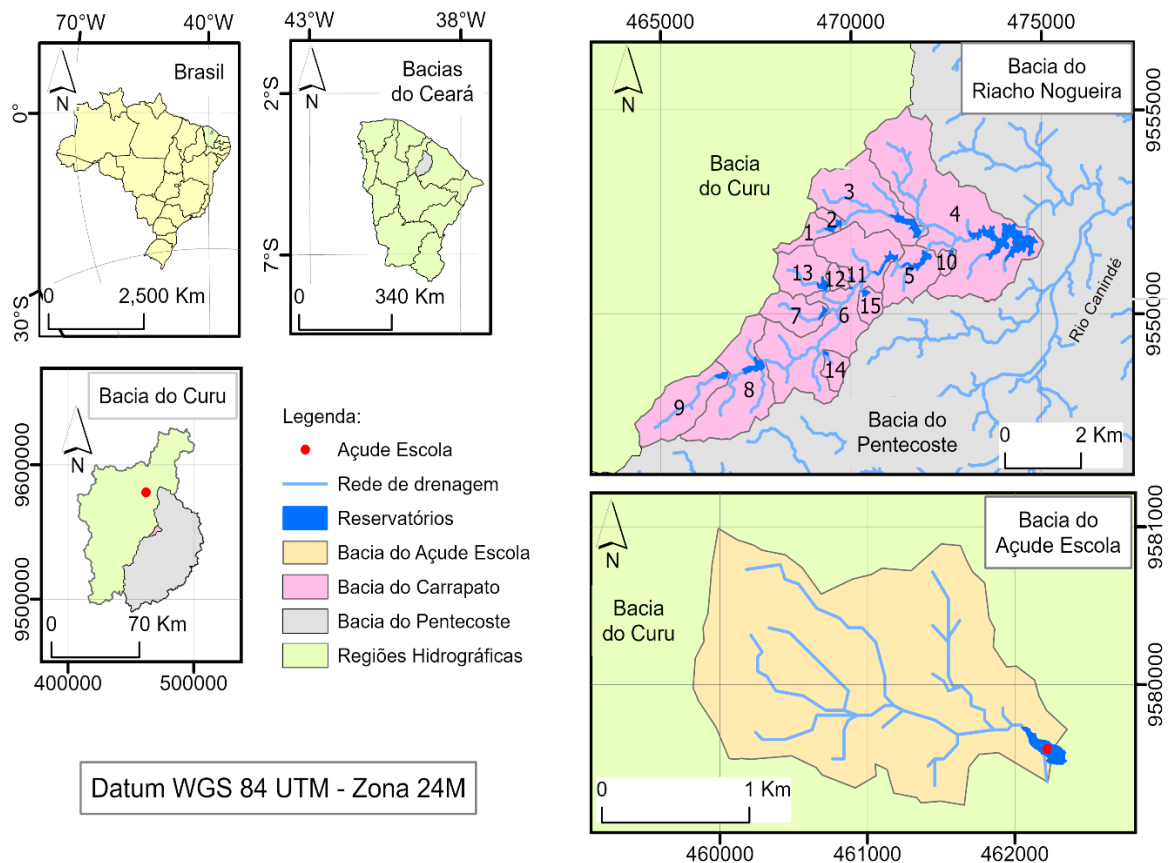
3.1 Caracterização da área de estudo

A área do estudo do presente trabalho é a bacia hidrográfica do açude Pereira Miranda - Pentecoste, com barragem localizada no município de Pentecoste, Estado de Ceará, a cerca de 85 km da cidade de Fortaleza. O açude é uma sub-bacia do rio Canindé, pertencente à bacia hidrográfica do rio Curu, drenada pelo riacho Nogueira apresentando uma capacidade de acumulação de 360 hm³. Selecionou-se uma amostra de quinze reservatórios da sub-bacia do Carrapato com 31,6 km², na bacia hidrográfica açude Pentecoste (Figura 3) com área de 3230 km² e bacias hidráulicas com áreas de variando de 0,2 a 50,5 ha.

Para caracterização do processo de formação da fenda na ruptura de pequeno reservatório da região, utilizou-se o caso de rompimento da barragem do açude Escola, na Bacia Experimental Vale do Curu (BEVC), na zona rural do município de Pentecoste, pertencente à Universidade Federal do Ceará, com área de contribuição de 2,6 km². Com base em levantamento realizado em campo foram coletadas informações da geometria da fenda e de volume erodido do corpo do maciço durante o processo de ruptura.

O clima do município de Pentecoste é classificado por semiárido com precipitação irregular, a bacia hidrográfica contém 5 classes de solos predominante no município, nomeadamente, solo bruno não cálcico, solo podzólico vermelho amarelo equivalente eutrófico, solo litólico, planossolo solódico e solo podzólico vermelho amarelo, sendo eles, revestidos por vegetação do tipo caatinga arbustiva, caatinga arbustiva densa, caatinga arbórea e mata seca (Lira, 2012).

Figura 3 - Localização da área do estudo



Fonte: Autor, 2025.

3.2 Modelagem hidrológicas de eventos extremos com o HEC-HMS

Para caracterização da área do estudo usando técnicas de sensoriamento remoto, via imagens de satélite. Utilizou-se dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com a resolução espacial de 30m, para gerar o modelo digital de elevação da área do estudo para caracterizar a topografia do terreno. Os dados foram processados com auxílio da ferramenta do Sistemas de Informações Geográficas SIG para representar a distribuição espacial das chuvas intensas, e consequentemente adquirir informações que caracterizam a bacia hidrográfica do açude de Pentecoste, a saber, área, perímetro, comprimento do rio principal, cota do rio principal no exutório e cota do rio principal na nascente. Tais informações vêm sendo utilizadas nas simulações dos eventos extremos para 15 redes de reservatórios estudados.

O modelo SCS-CN (*Soil Conservation Service Curve Number*) é considerado uma boa opção para a estimativa do escoamento superficial, por apresentar facilidade em suas

aplicações, baixos requisitos de dados de entrada e simples estruturas (Wang *et al.*, 2025). Mas, o modelo requer os ajustes necessários levando em consideração as condições climáticas locais e características da bacia hidrográfica (tipo de solo, cobertura e uso da terra, tamanho, forma, declive, rede de drenagem e condições iniciais de umidade). Dessa forma, foi calculado o escoamento superficial ou precipitação efetiva como se vê na equação 1:

$$P_e = \frac{(P - 0,2 S)^2}{(P + 0,8 S)} \quad (1)$$

Onde:

P_e = Precipitação efetiva ou escoamento superficial (mm);

P = Precipitação total (mm);

S = capacidade de armazenamento da camada superior do solo (mm).

A capacidade de armazenamento da camada superior do solo (S), foi encontrado utilizando a equação 2:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

Onde:

CN = Número de curva (Curve Number), que depende do tipo de solo.

O número da curva (CN), é um número decimal adimensional, associado a uma condição particular da bacia hidrográfica. O método de *Número de Curvas* (CN) é um procedimento bastante utilizado para estimar o excesso ou a perda de precipitação que leva em conta o uso da terra e os tipos de solo. A metodologia de CN foi derivada empiricamente em estudos de pequenas bacias hidrográficas agrícolas. O HEC-HMS permite que o usuário entre com um valor de CN médio da sub-bacia, assim, cada reservatório receberá sua própria precipitação e as perdas ou excessos são computados com base no valor de CN informado (USACE, 2025).

Para todo território Brasileiro os índices de *Curva Número* (CN) são disponibilizados pela Agência Nacional das Águas (ANA), entretanto, para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado os dados publicados referente aos anos 1985, 2014 e 2022.

Neste trabalho, foram considerados os valores do CN do ano 2022, em formato raster com a resolução 30m, adquiridos através do site da USGS (*Serviço Geológico dos Estados*

Unidos). As imagens foram devidamente processadas com ferramentas do SIG, usando as coordenadas em metros (UTM), WGS-1984-UTM-Zona 24S a que corresponde o estado do Ceará. Consequentemente, calculou-se a média ponderada dos valores do CN para cada sub-bacia estudada com o auxílio do Excel.

Por sua vez, o tempo de concentração das sub-bacias foi calculado baseado na equação de Kirpich, ilustrada a seguir como equação 3:

$$t_c = 0,0663 \frac{(L^{0,77})}{(y^{0,385})} \quad (3)$$

Onde:

t_c = tempo de concentração (em horas);

L = comprimento do curso d'água principal (em km);

y = declividade média do curso d'água principal (adimensional, expressa como razão entre a diferença de elevação e o comprimento).

Ademais, utilizou-se a equação da intensidade-duração-frequência IDF do posto pluviométrico de Pentecoste (Rodrigues *et al.*, 2008), a fim de obter a precipitação máxima. Considerou-se os períodos de retorno de 10, 25, 50, 100, 1.000 e 10.000 anos, com a chuva máxima diária. O cálculo foi feito baseado na equação 4 a seguir.

$$i = \frac{2246 T^{0,185}}{(D+18)^{0,950}} \quad (4)$$

Onde:

i = intensidade associada ao tempo de concentração da bacia (mm/h);

T_r = período de retorno (anos);

D = duração da chuva de projeto (min), igual ao tempo de concentração de cada sub-bacia. A precipitação máxima é calculada pelo produto da intensidade da chuva (mm/h) pela duração da chuva (h).

Pela equação (4), tornou-se possível calcular e obter a precipitação máxima diária da região. Os dados são ilustrados de forma tabelada como mostra no quadro 2 a seguir.

Quadro 2 - Precipitações máximas para os tempos de retorno de 10, 25, 50, 100, 1.000 e 10.000 anos e diferentes durações derivadas da curva IDF do Posto Pentecoste.

Duração (min)	Precipitação máxima (mm)					
	TR (anos)					
	10	25	50	100	1000	10000
5	14.6	17.3	19.6	22.3	34.2	52.3
10	24.2	28.6	32.6	37.0	56.7	86.8
15	31.0	36.8	41.8	47.5	72.7	111.4
30	43.5	51.5	58.5	66.6	101.9	156.0
60	54.8	64.9	73.8	83.9	128.5	196.8
120	63.8	75.5	85.9	97.6	149.5	228.9
180	67.9	80.4	91.4	103.9	159.1	243.6
360	73.4	87.0	98.9	112.4	172.2	263.6
720	77.8	92.2	104.8	119.1	182.4	279.2
1440	81.5	96.5	109.7	124.8	191.0	292.4

Fonte: Autor, 2025.

O modelo HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) versão 4.12 foi utilizado para simulação da onda de cheia que provocou o rompimento da barragem do açude Escola em 23 de abril 2020 no município do Pentecoste, e gerou sua hidrograma de cheia. Adicionalmente, o modelo foi usado para geração das hidrogramas de cheia de 15 açudes da bacia hidrográfica do Riacho Nogueira, na bacia hidrográfica do Pentecoste.

A simulação foi realizada considerando as informações adquiridas nas etapas anteriores. O processo da simulação aconteceu de seguinte forma:

- A criação do novo projetos, isto é para cada um dos açudes simulados;
- Entrada de tabelas de dados meteorológicos (dados de chuva) início e fim;

Nessa etapa, foram introduzidos os dados disponíveis no quadro 1. Importante salientar que, foi rodada a simulação 6 vezes para cada um dos 15 açudes, levando em consideração os períodos de retorno de 10, 25, 50, 100, 1000 e 10000 anos.

- Definição de elementos hidrológicos da bacia (área, CN e tempo de concentração);

Aqui, foram adicionados manualmente os respectivos dados de entrada que caracterizam as sub-bacias (área, valores de CN e tempo de concentração), considerando o método SCS *Curve Number*.

- Definição de método de cálculo de variáveis meteorológicas;

Considerou-se o tipo de precipitação *Frequency Storm* (hietograma da chuva de projeto) com a intensidade da duração de 5 minutos.

- Configuração dos parâmetros para executar a simulação, como o passo de tempo e o período da simulação e indicação dos dados a utilizar de precipitação e o modelo de geração de escoamento.

3.3 Modelagem hidráulica de ruptura de barragens com o HEC-RAS

Após a geração de hidrograma de cheia dos açudes estudados com o HEC-HMS, iniciou-se a simulação da ruptura de barragem do açude Escola e dos 15 sub-bacias da bacia hidrográfica do açude Pentecoste no HEC-RAS (*River Analysis System*) versão 6.4.1.

Realizou-se a simulação bidimensional (2D) com seguintes passos realizados:

- Foi criado um novo projeto atribuindo um nome;
- Editou-se a geometria do projeto;

Importou-se o arquivo gerado pelo SIG (DEM) com informação do datum da área de estudo e, em sequência, adicionou-se a imagem de satélite disponível no próprio HEC-RAS.

- Criar geometria, iniciar edição;

Agora foi traçado a área de inundação, área do reservatório e a barragem, admitindo uma largura de 6 m.

- Dados geométricos;

Aqui foram introduzidos de forma manual todos os dados levantados no campo que caracterizam os açudes. Foi feito o levantamento dos dados no campo, para que se possa obter as informações reais. Dentre os 15 açudes estudados, apenas dois foram investigados em detalhes durante uma visita feita no campo no ano de 2024. Para estimativa do tamanho do vertedor e desnível máximo entre a cota de soleira e a cota de coroamento, analisaram-se as características geométricas de uma amostra aleatória com os 29 menores reservatórios do Estado do Ceará, monitorados pela COGERH, incluindo dois açudes da rede estudada. Para os outros 13 açudes da rede foi aplicada uma regressão entre do coeficiente a (que representa o

produto do coeficiente de vertimento pela largura do vertedor) com a área de sua bacia hidrográfica.

Para calcular a largura média da fenda e seu tempo desenvolvimento foram usadas as equações 6 e 7 de Froehlich (Brunner, 2014).

$$B_{ave} = 0,1803 K_0 V_w^{0,32} h_b^{0,19} \quad (6)$$

$$t_f = 0,00254 V_w^{0,53} h_b^{-0,90} \quad (7)$$

Onde:

B_{ave} = largura média da brecha (metros)

K_0 = constante (1,4 para falhas por galgamento, 1,0 por *piping*)

V_w = volume do reservatório no momento da falha (metros cúbicos)

h_b = altura da fenda final (metros)

t_f = tempo de formação da fenda (horas)

- Atribuição de condições de contorno;

Nesse estágio, foi inserido o dados de saída do modelo HEC-HMS como entrada no modelo HEC-RAS. Para açudes dispostos em cascata, a vazão de saída pela fenda em um açude a montante computada pelo HEC-RAS foi adicionada ao hidrograma gerado na própria bacia de contribuição do açude de jusante simulada no HEC-HMS.

- Delimitação do período de simulação e rodagem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Cheias máximas na bacia hidrográfica

Nesta seção, serão simulados os hidrogramas gerados pelo HEC-HMS, mostrando as cheias máximas na bacia hidrográfica. Para isso, foi considerado os dados da precipitação disponível no Quadro 2. Os parâmetros de entrada do modelo HEC-HMS para simulação da cheia de projeto está estão sintetizados no Quadro 3 a seguir.

Quadro 3 - Parâmetros de entrada dos 15 açudes estudados

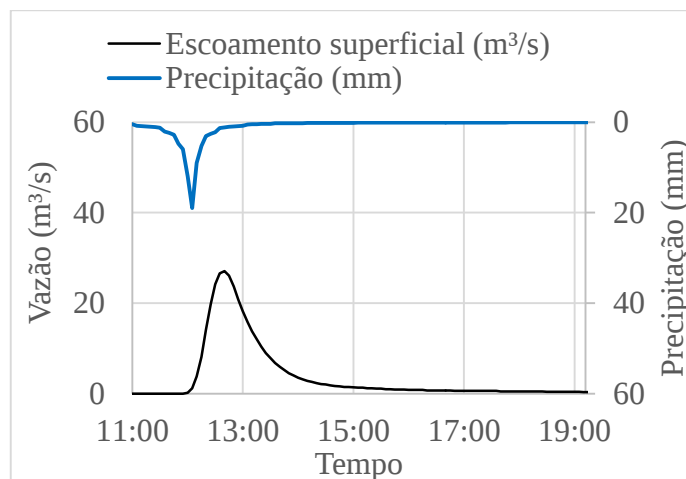
Açude	ID	CN_médio	Área da bacia (km²)	Lag time - HEC-HMS (min)	Tempo de concentração - SCS/CN (h)
1	633	84.18	0.550	16.96	1.36
2	632	84.07	0.772	8.96	0.70
3	59	84.27	4.285	37.27	3.25
4	61	75.77	31.591	69.36	8.39
5	64	79.57	17.982	17.28	1.67
6	734	84.44	16.438	72.61	7.15
7	71	84.27	1.257	20.45	1.66
8	77	83.38	5.954	34.53	3.10
9	647	71.67	2.370	33.89	4.35
10	612	66.59	0.232	8.74	1.18
11	615	85.14	0.089	5.86	0.42
12	616	84.59	0.248	8.40	0.64
13	68	84.33	1.400	17.42	1.41
14	668	84.01	0.491	10.35	0.80
15	603	84.16	0.461	11.15	0.88

Fonte: Autor, 2025.

4.1.1 Aplicação para o açude Escola

A Figura 4 destaca o hietograma da chuva de projeto e o hidrograma gerado na simulação com o HEC-HMS com a perspectiva de reproduzir o evento que provocou a ruptura da barragem em 23/04/2020. Os resultados mostram uma vazão de pico na entrada de 27,1 m³/s e um pico de 19 mm do hietograma da chuva de projeto.

Figura 4 - Hietograma da chuva de projeto e hidrograma de saída gerado com o HEC-HMS



Fonte: Autor, 2025.

4.1.2 Aplicação para uma rede de reservatórios

O Quadro 4 apresenta as cheias máximas em cada um dos 15 açudes simulados, considerando os tempos de retornos de 10, 25, 50, 100, 1.000 e 10.000 anos. Os resultados mostram que as maiores vazões estão associadas aos maiores açudes e maiores tempo de retorno, como no caso do açude 4, localizado no exutório da bacia.

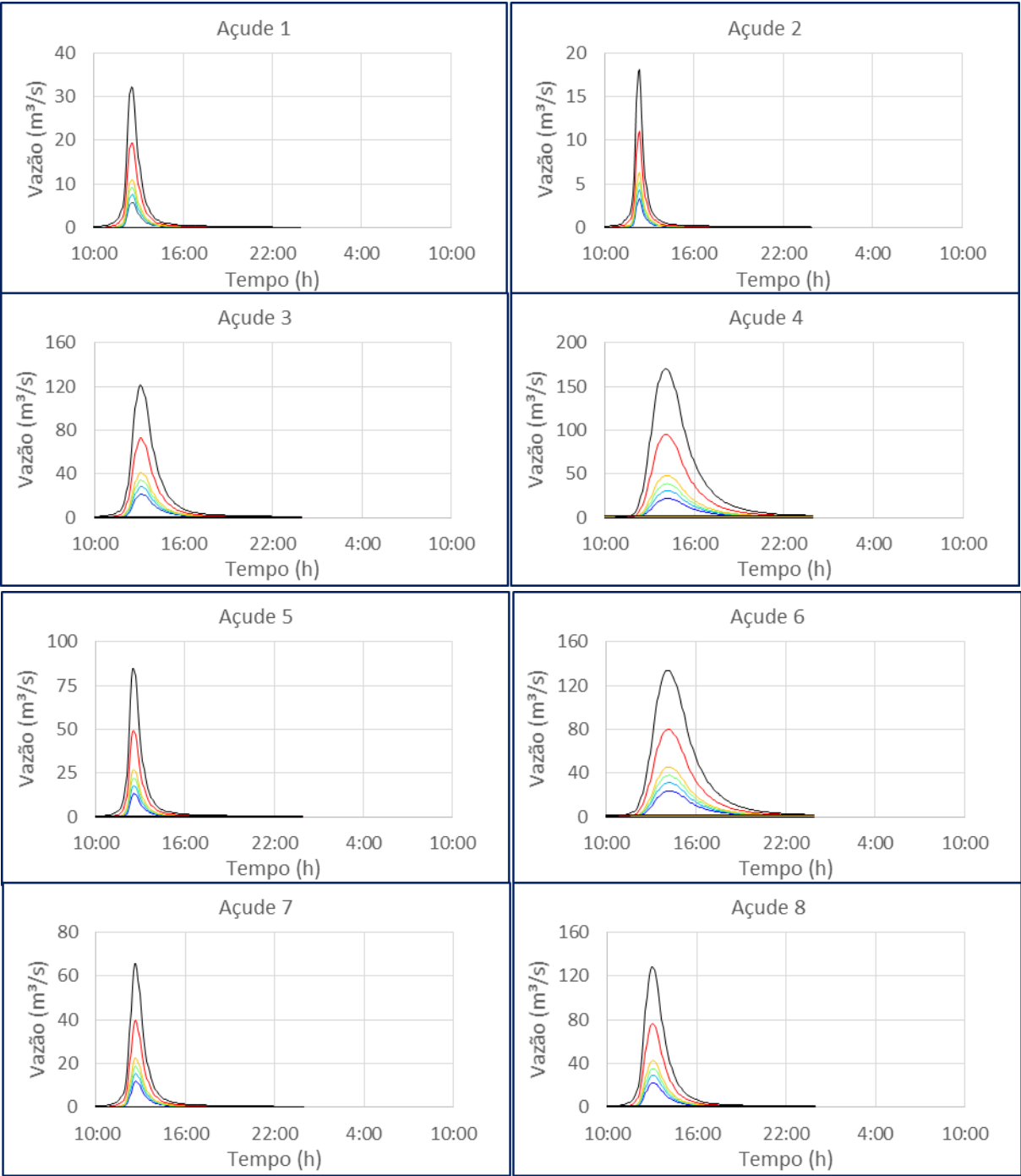
Quadro 4 - Vazões de pico na entrada para os 15 açudes analisados na bacia hidrográfica do Riacho Nogueira.

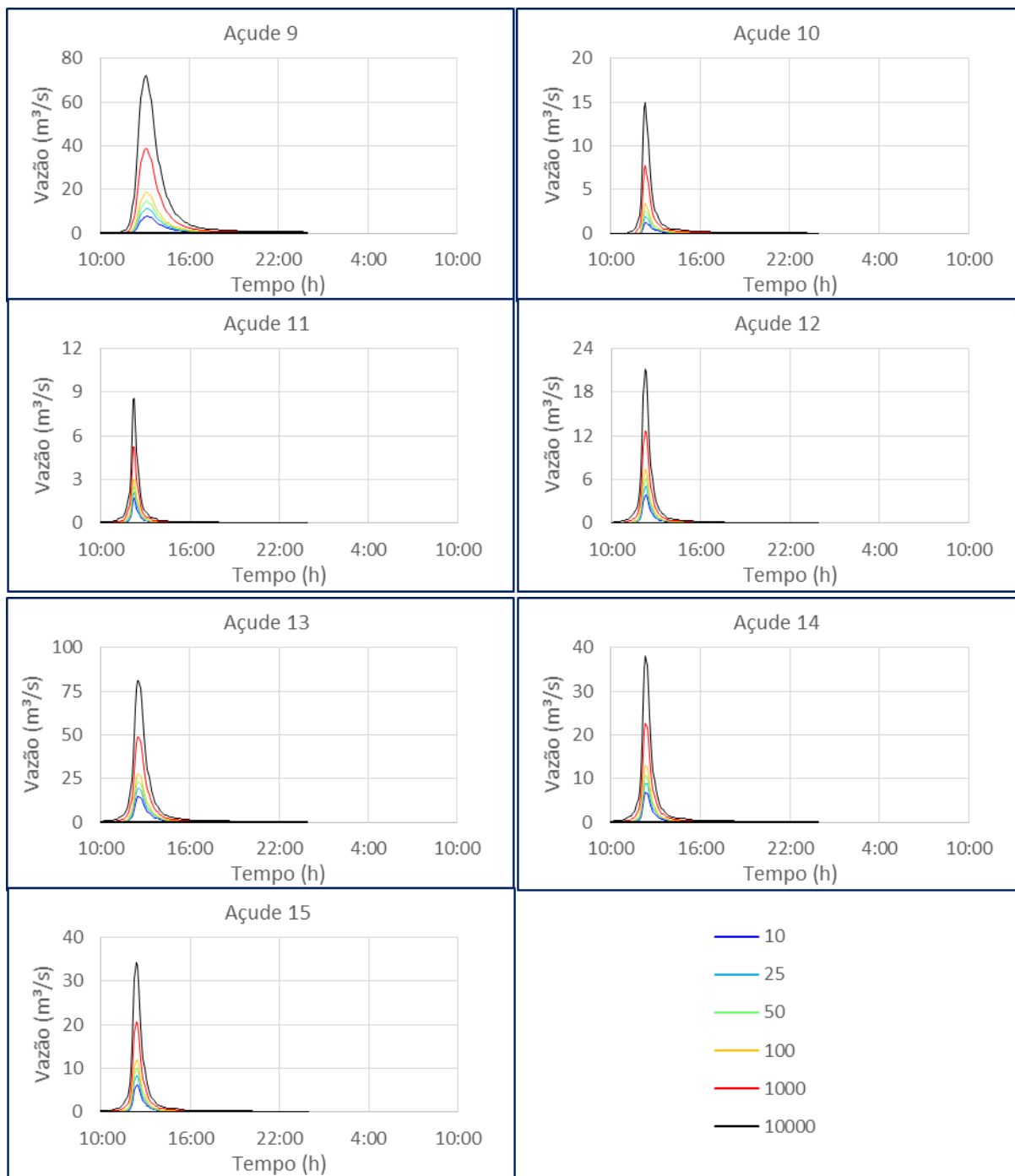
Açude	Vazão de pico (m³/s)					
	10	25	50	100	1000	10000
1	5.80	7.60	9.20	11.00	19.30	32.30
2	3.40	4.30	5.20	6.30	11.00	18.10
3	21.50	28.20	34.10	41.10	72.70	121.30
4	21.80	30.60	38.60	48.20	94.90	170.30
5	13.10	17.90	22.10	27.10	49.30	84.80
6	23.80	31.30	37.80	45.50	79.90	133.90
7	11.90	15.50	18.80	22.60	39.70	65.80
8	22.00	29.00	35.30	42.70	76.20	127.90
9	7.70	11.20	14.50	18.60	38.80	72.00
10	1.20	1.90	2.60	3.40	7.70	14.90
11	1.70	2.10	2.50	3.00	5.20	8.60
12	3.90	5.10	6.10	7.30	12.70	21.10
13	14.80	19.30	23.30	27.90	48.90	81.20
14	6.80	8.90	10.80	13.00	22.80	38.00
15	6.30	8.20	9.90	11.90	20.70	34.20

Fonte: Autor, 2025.

A Figura 5 mostra os hidrogramas gerados nas bacias hidrográficas dos 15 açudes simulados com o modelo HEC-HMS para os tempos de retorno de 10, 25, 50, 100, 1.000 e 10.000 anos. Os resultados mostram as respostas hidrológicas nestas bacias hidrográficas para as chuvas extremas associadas aos diferentes tempos de retorno. As bacias hidrográficas com maiores tempos de concentração apresentam picos mais acentuados e maiores tempos de base, como no caso dos açudes 3, 4, 6, 8 e 9.

Figura 5 – Hidrogramas de vazões de saída gerado pelo modelo HEC-HMS





Fonte: Autor, 2025.

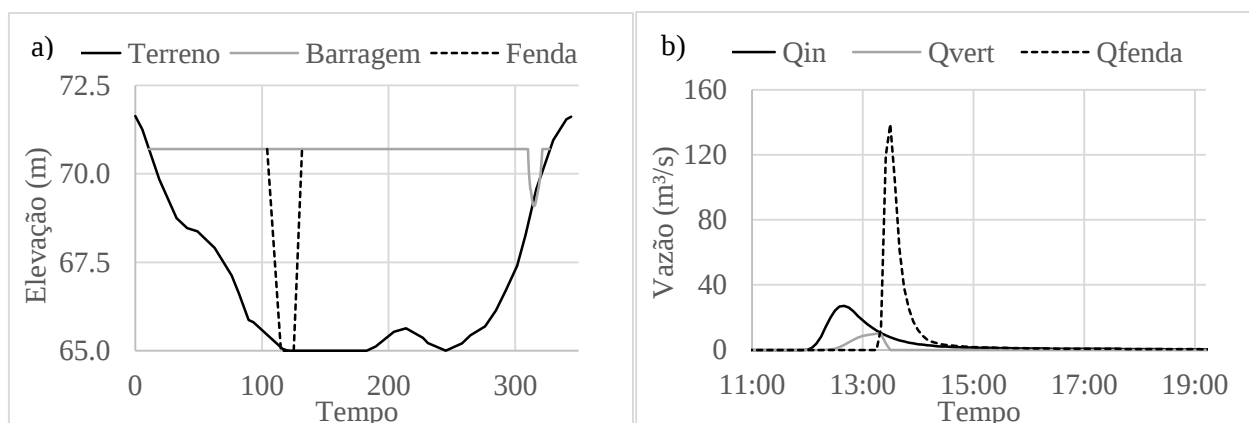
4.2 Simulação da ruptura de barragens e propagação da onda de cheia

Nesta seção, apresenta-se o caso da ruptura de barragem do açude Escola simulado pelo HEC-RAS, o comportamento da propagação da onda de cheia atenuada pelo trecho do rio Curu. Além disso, analisaram-se os cenários de simulação de ruptura de barragens em cascata em uma rede de 15 reservatórios estudados da bacia hidrográfica do Riacho Nogueira, afluente da margem esquerda do rio Canindé, na bacia do Pentecoste.

4.2.1 Aplicação para o açude Escola

Com os resultados das vazões obtidas no HEC-HMS foi possível simular o processo de rompimento da barragem do açude Escola. Os resultados das simulações com os modelos HEC-HMS e HEC-RAS estão ilustrados na Figura 6. Na Figura 6a, é possível perceber a geometria da fenda modelada com o HEC-RAS. A largura média da fenda estimada com base nos dados topográficos levantados foi de 18,75 m, enquanto o valor computado pelo modelo com base nos dados de altura do maciço e volume do reservatório no momento do colapso foi pouco inferior (16,10 m). Na Figura 6b, pode-se verificar um pico da vazão na entrada do reservatório simulada com o HEC-HMS de 27,1 m³/s e um pico de saída pela fenda formada durante o processo de ruptura da barragem, atingindo 139 m³/s. A vazão máxima no vertedor foi de 10 m³/s.

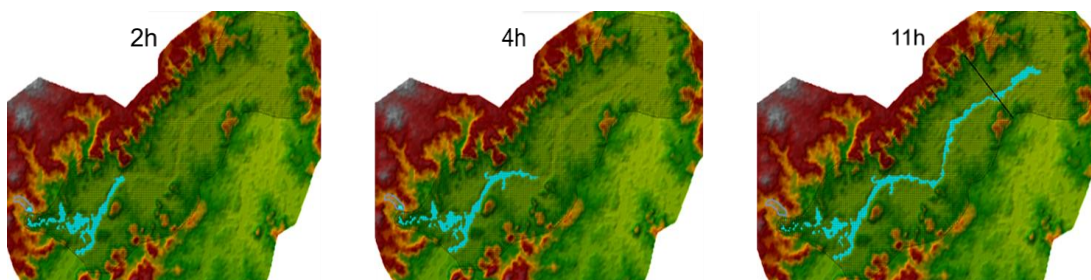
Figura 6 - Geometria da fenda simulada com HEC-RAS



Fonte: Autor, 2025.

Constatou-se que a ruptura dessa barragem aconteceu com um evento correspondente a 41 anos de tempo de retorno. A Figura 7 ilustra a mancha de inundação nos trechos a jusante da barragem após 2h, 4h e 11h do desastre. A onda de cheia propagada atinge rapidamente o leito do rio Curu, localizado imediatamente a jusante, com capacidade de transportar fluxos hídricos bem superiores, minimizando, portanto, os impactos deste desastre.

Figura 7 - Manchas de inundação da reprodução do açude Escola

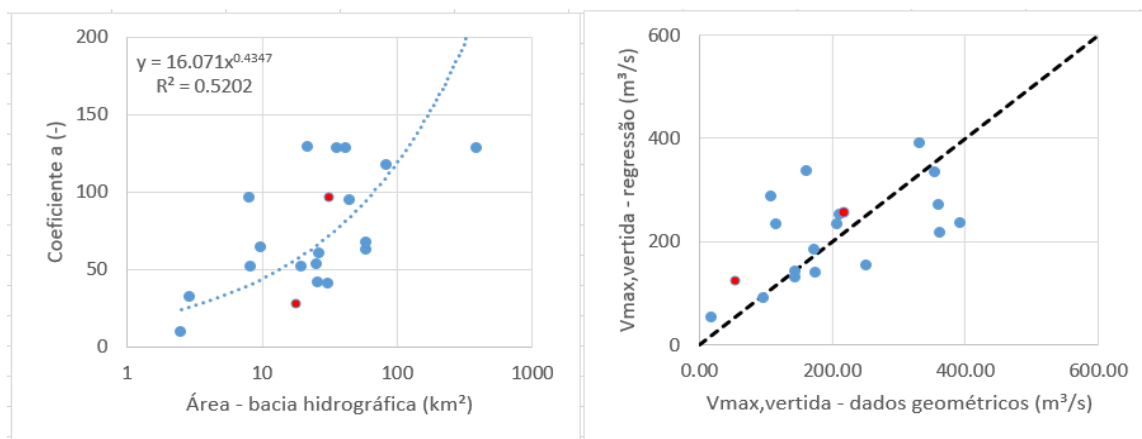


Fonte: Autor, 2025.

4.2.2 Aplicação para uma rede de reservatórios

A Figura 8 apresenta a regressão entre o coeficiente a da equação de um vertedor e a área da bacia hidrográfica para uma amostra de 29 reservatórios do Estado do Ceará, com R^2 de 0,52.

Figura 8 - Regressão pela coeficiente a (valores em vermelhos referem-se a dois açudes da bacia hidrográfica do Riacho Nogueira investigados nesta pesquisa)



Fonte: Autor, 2025.

Com base na regressão encontrada, estimaram-se as larguras dos 13 reservatórios da bacia do riacho Nogueira. Em outros dois (Açudes 4 e 5), estes dados foram levantados em campo.

O Quadro 5 ilustra as larguras dos vertedores dos reservatórios da bacia hidrográfica do Riacho Nogueira.

Quadro 5 - Largura dos vertedores nos 15 reservatórios da bacia hidrográfica do Riacho Nogueira

Açude	ID	Largura do vertedouro L (m)
1	633	2.00
2	632	10.26
3	59	21.61
4	61	68.62
5	64	19.55
6	734	38.76
7	71	12.68
8	77	24.93
9	647	16.70
10	612	6.08
11	615	4.01
12	616	6.27
13	68	13.29
14	668	8.42
15	603	8.20

Fonte: Autor, 2025.

A simulação de ruptura das barragens da rede de reservatórios da bacia hidrográfica do Riacho Nogueira foi, então, realizada para avaliar os impactos de ruptura em cascata, com picos de vazão na saída destes reservatórios apresentados no Quadro 6. Os resultados mostram que apenas um reservatório (açude 5) rompeu com a vazão de pico de 50 anos, o que pode ser explicado pelo fato deste açude apresentar uma capacidade de armazenamento e tamanho de vertedor subdimensionado (conforme medição em campo) para a grande área de contribuição, além de receber as vazões vertidas em vários outros açudes da rede localizado a montante. Pode-se constatar também que dois dos açudes estudados (açudes 10 e 11) não romperam mesmo para vazões de projeto com tempo de retorno de 10.000 anos, o que pode ser explicado pela pequena área de suas bacias hidrográficas que resultaram em vazões inferiores à capacidade dos vertedores de suas barragens. Outro fato interessante que foi constatado é que os reservatórios mais a jusante, quando dispostos em cascata, conseguem atenuar ondas de cheia resultantes de ruptura das barragens menores de montante, como se observa na cascata dos açudes 1, 2 e 3 (jusante para montante), ou ainda no caso da cascata dos açude 5 e 4 (jusante para montante), onde o maior açude da rede (açude 4), mesmo recebendo a onda de cheia de ruptura do açude 5 para tempos de retorno superiores a 50 anos, só chegou a romper para eventos extremos de 1.000 e 10.000 anos.

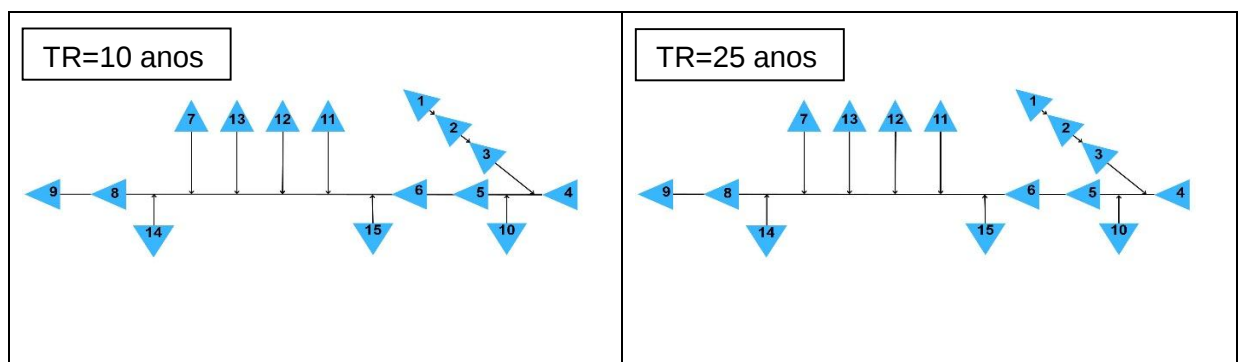
Quadro 6 - Vazões de pico na saída dos 15 açudes por vertimento ou ruptura da barragem
(destacado em laranja)

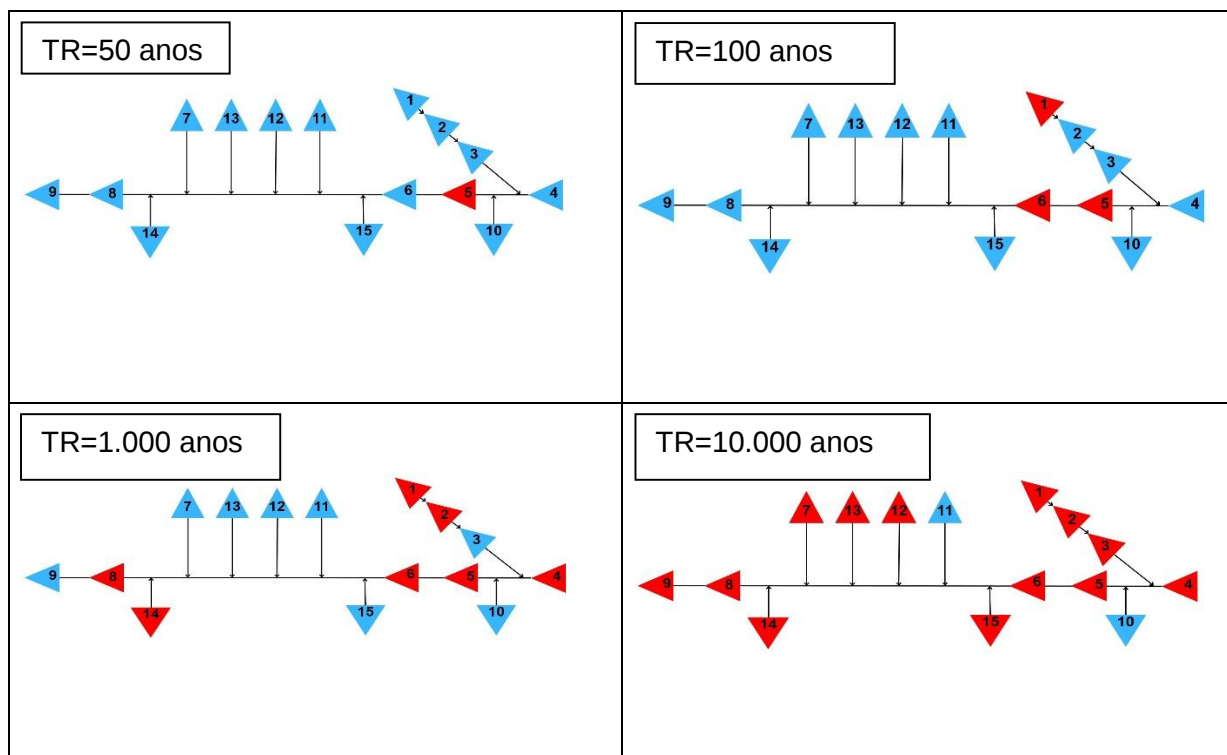
Açude	Vazão de pico (m³/s)					
	10	25	50	100	1000	10000
1	3.60	4.94	6.23	56.61	67.15	80.55
2	3.82	5.38	6.81	31.26	79.39	96.31
3	13.32	18.79	23.85	34.68	69.47	669.74
4	33.47	49.19	134.08	178.36	815.17	1359.22
5	45.49	63.26	664.86	755.17	892.20	1025.30
6	51.11	69.65	104.04	400.88	490.84	754.98
7	8.82	11.97	14.84	18.27	34.15	198.04
8	18.19	26.08	33.53	42.81	87.44	445.96
9	6.60	9.90	13.05	17.02	37.74	127.25
10	0.73	1.21	1.72	2.34	5.85	12.14
11	1.21	1.59	1.95	2.36	4.27	7.18
12	3.48	4.63	5.61	6.79	12.04	33.20
13	6.66	9.34	11.86	14.94	30.13	194.60
14	4.93	6.70	8.30	10.20	42.48	60.62
15	2.31	3.30	4.23	5.34	208.92	225.91

Fonte: Autor, 2025.

Na Figura 9 estão ilustrado os esquemas que ilustram a conexão da rede de reservatórios e destacam as ocorrências de ruptura para os diferentes tempos de retorno (10, 25, 50, 100, 1.000 e 10.000 anos). É possível perceber na Figura 9, como a ruptura de uma barragem a montante pode impactar outras estruturas hídricas localizadas a jusante, como nas simulações para tempos de retorno superior a 50 anos. Os esquemas também destacam a capacidade de barragens maiores atenuar a onda de cheia de barragens menores que se submeteram a ruptura como no caso dos açudes 3 e 4.

Figura 9 – Fluxogramas ilustrando os acontecimentos da ruptura

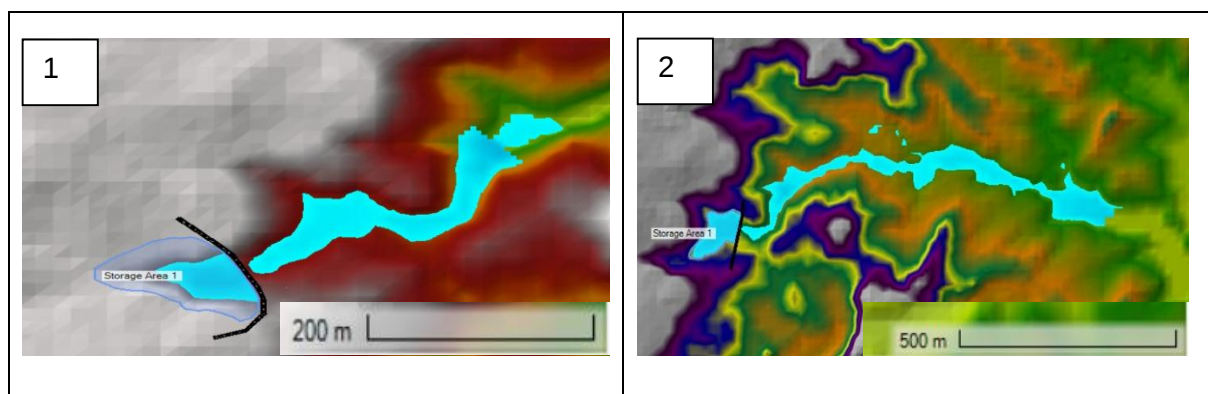


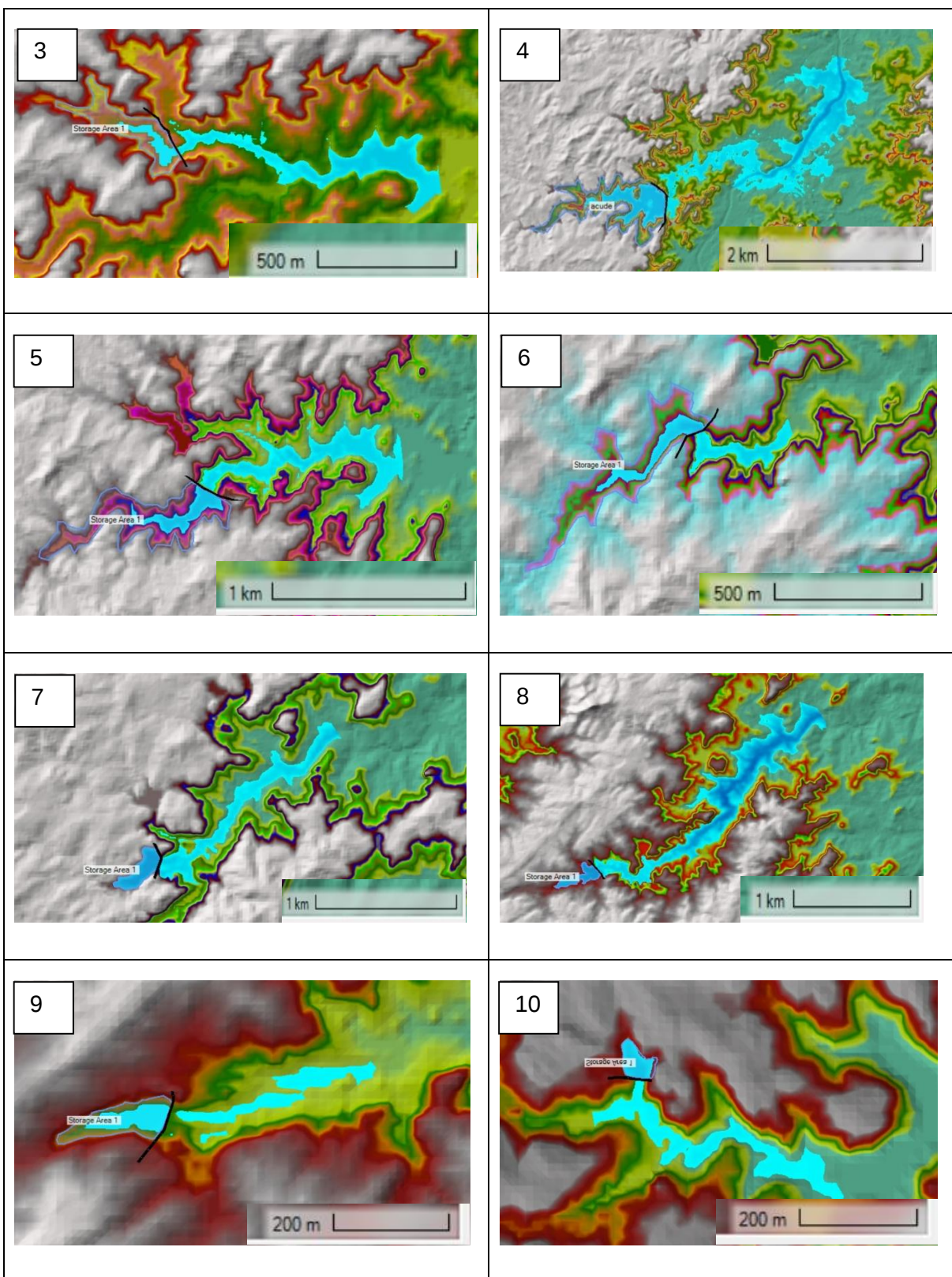


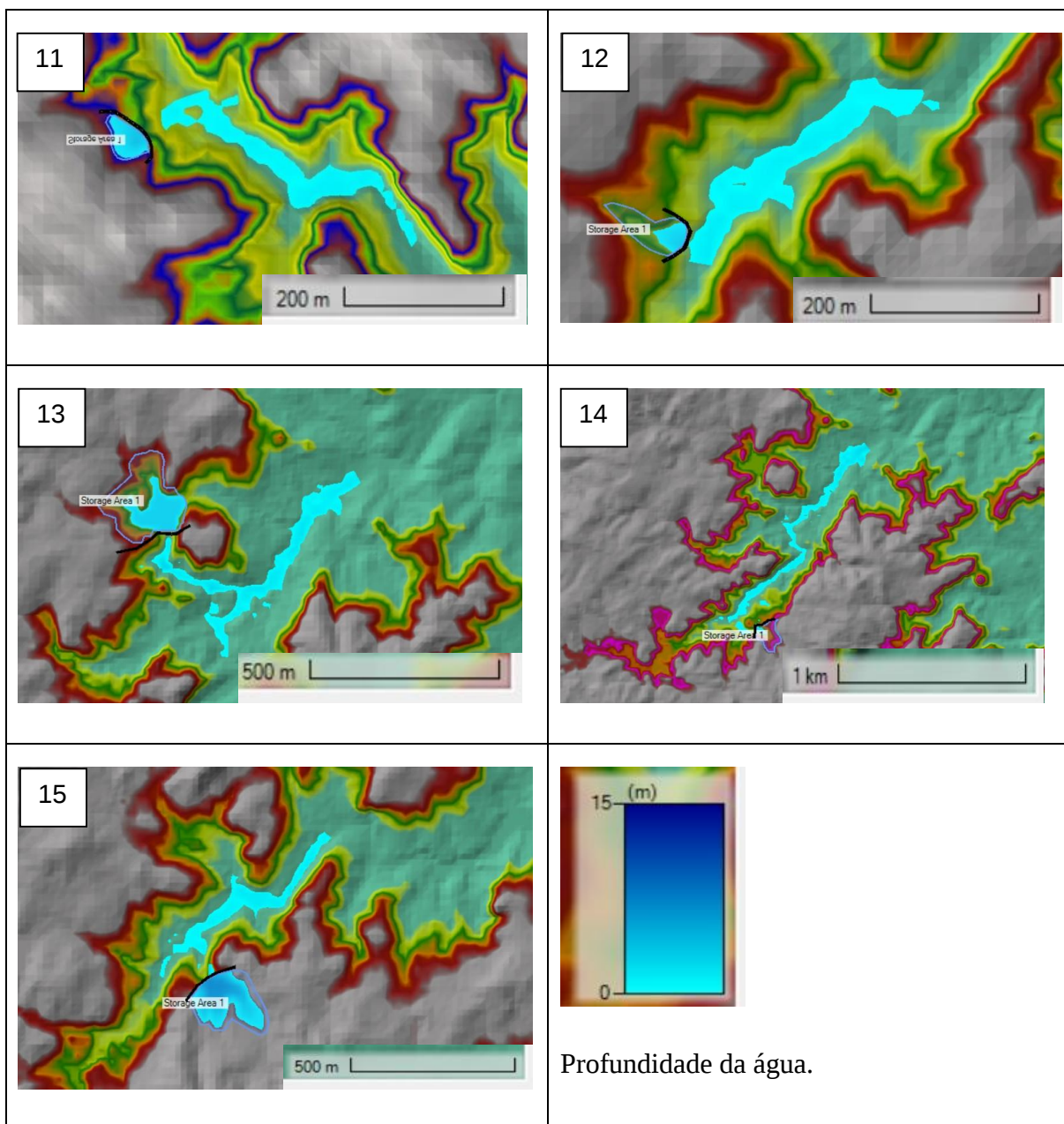
Fonte: Autor, 2025.

A Figura 10, por sua vez apresenta as manchas de inundações nos trechos a jusante das barragens dos 15 reservatórios estudados, exemplarmente para o tempo de retorno de 10.000 anos. Cabe destacar que nos açudes 10 e 11 que não romperam mesmo para este tempo de retorno extremo (10.000 anos), a mancha de inundação a jusante é resultante dos vertimentos ocorridos durante o tempo de simulação.

Figura 10 – Manchas de inundações dos 15 açudes







Fonte: Autor, 2025.

5. CONCLUSÕES

A utilização do Sistemas de Informações Geográficos (SIG) para obtenção de dados a fim de representar a distribuição espacial das chuvas intensas, e consequentemente adquirir informações que caracterizam a bacia hidrográfica do açude de Pentecoste, apresentou bom desempenho na caracterização hidrológica dos reservatórios da rede.

O uso combinado do modelo hidrológico (HEC-HMS - Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) e hidráulico (HEC-RAS - Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) permitiu simular os eventos extremos de cheias que provocaria a

ruptura dos reservatórios analisados, assim como verificar os eventos para diferentes tempos de retorno. As simulações de ruptura em cascata permitiram uma melhor compreensão da dinâmica de ruptura de barragens em cascata e os efeitos a jusante, com reservatórios maiores atenuando a onda de cheia gerada nos rompimentos a montante.

Considerando que há registros recorrentes de ruptura de barragens no Estado do Ceará, é de fundamental importância que essas estruturas hidráulicas sejam devidamente dimensionadas, a fim de suportarem as cheias máximas de projeto e eventuais ondas resultantes de do rompimento de barragens em cascata.

O presente trabalho demonstrou a grande importância na identificação de barragens mais susceptíveis a ruptura em eventos extremos de escoamento, o que pode servir de suporte para decisão dos governantes e das comunidades. Contudo, recomenda-se os pequenos reservatórios dispostos em cascata sejam incluídos nas ações de segurança de barragens para prevenir acidentes e que sejam conduzidos estudos hidrológicos para verificação da capacidade de extravasamento dos vertedores destas barragens.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDUL A.K. (2000). Modeling flow over an initially dry bed. *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 38. Iss. 5 p. 383– 388.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (BRASIL) (2019). Relatório de segurança de barragens 2018. Agência Nacional de Águas, Brasília.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (BRASIL) (2021). Relatório de segurança de barragens 2020. Agência Nacional de Águas, Brasília.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (BRASIL) (2022). Relatório de segurança de barragens 2021. Agência Nacional de Águas, Brasília.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (BRASIL) (2023). Relatório de segurança de barragens 2022. Agência Nacional de Águas, Brasília.

ALTINAKAR, M.S.; MCGRATH, M.Z.; DABAK, T.; THOMAS, W.; SCROGGINS, C.; GAUNTT, T.; HARVEY, H.; and KELLY, J. (2017). Two-dimensional dam-breach flood modeling and inundation mapping with cascading failures. In *Proceedings of the World*

Environmental and Water Resources Congress. Reston: ASCE.
<http://dx.doi.org/10.1061/9780784480625.034>.

ALVES H.R. (2015). O rompimento de barragens no Brasil e no mundo: desastres mistos ou tecnológicos? Faculdade Dom Helder Câmara, Belo Horizonte. Available from:
http://www.domhelder.edu.br/uploads/artigo_HRA.pdf.

AMINI, A.; BAHRAMI, J.; MIRAKI, A. Effects of dam break on downstream dam and lands using GIS and Hec Ras: a decision basis for the safe operation of two successive dams. *International Journal of River Basin Management*, v. 20, n. 4, 2021, p. 487-498. Disponível em:
<https://doi.org/10.1080/15715124.2021.1901728>. Acesso em: 19 fev. 2025.

ARAÚJO, J. C. de; LANDWEHR, T.; ALENCAR, P. H. L.; PAULINO, W. D. Water management causes increment of reservoir silting and reduction of water yield in the semiarid State of Ceará, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, [S.l.], v. 121, p. 104102, 2023. ISSN 0895-9811. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981122003881>.

Associação de Oficiais de Segurança de Barragens Estaduais (ASDSO) 2020.

BARATA, G. C. (2023). Barragem se rompe na zona rural de Farias Brito, no Cariri; veja vídeo. *O Povo*, 18 mar. 2023. Disponível em:
<https://www.opovo.com.br/noticias/ceara/2023/03/18/barragem-se-rompe-na-zonarural-de-farias-brito-no-cariri-veja-video.html>. Acesso em 14 dez. 2024.

BHARATH, A.; SHIVAPUR, Anand V.; HIREMATH, C. G.; MADDAMSETTY, Ramesh. Dam break analysis using HEC-RAS and HEC-GeoRAS: A case study of Hidkal dam, Karnataka state, India. *Environmental Challenges*, v. 5, 2021, p. 100401. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100401>. Acesso em: 14 dez. 2024.

BOLDRIN, Rodrigo Süzes. Avaliação de cenários de inundações urbanas a partir de medidas não estruturais de controle: trecho da bacia do córrego do Gregório, São Carlos-SP. 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em:
https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/USP_28d5e0c34922136692cb611d82061595. Acesso em: 12 fev. 2025.

BOUCHEHED, H.; MIHOUBI, M. K.; DERDOUS, O.; and DJEMILI, L. (2017). Evaluation of potential dam-break flood risks of the cascade dams Mexa and Bougous (El Taref, Algeria). *Journal of Water and Land Development*, 33(1), 39-45. <http://dx.doi.org/10.1515/jwld-2017-0017>.

BRUNNER, Gary. Using HEC-RAS for Dam Break Studies. Training Document, ago. 2014. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/publications/TrainingDocuments/TD-39.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2025.

CAI, W.; ZHU, X.; PENG, A.; WANG, X.; and FAN, Z. (2019). Flood risk analysis for cascade dam systems: a case study in the dadu river basin in China. *Water (Basel)*, 11(7), 1365. <http://dx.doi.org/10.3390/w11071365>.

CAMPOS, R.G.D.; SALIBA, A.P.M.; BAPTISTA, M.B.; BISCARO; V.H.B; SÁ, J.M.M; PASSOS, D.T.; COELHO, S.A.S.; and GÓMEZ, J.A.M. (2020). Breach parameters for cascade dams' breaks using physical, empirical and numerical modeling. *RBRH, Porto Alegre*, v. 25, <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190109>.

CAO, Z.; HUANG, W.; PENDER, G.; and LIU, X. (2014). Even more destructive: cascade dam break floods. *Flood Risk Management*, 7(4), 357-373. <http://dx.doi.org/10.1111/jfr3.12051>.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE) (2016). Desertificação, Degradação da Terra e Secas na área Susceptível à Desertificação no Brasil. Brasília: CGEE.

CESCA, Matteo; D'AGOSTINO, Vincenzo. Comparison between FLO-2D and RAMMS in debris-flow modelling: a case study in the Dolomites. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, v. 60, p. 197-206, 2008. Disponível em: <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-engineering-sciences/60/19190>. Acesso em: 19 fev. 2025.

CHAGAS, Patrícia Freire; MATTOS, Arthur. VI-209-Estudo da propagação de ondas de cheias, e suas consequências nas questões ambientais de rios urbanos. 2009. Disponível em: https://abes-dn.org.br/anaisletronicos/19_Download/TrabalhosCompletoPDF/VI-209.pdf. Acesso em: 19 fev. 2025.

CHAPAGAIN, Dipesh; HOCHRAINER-STIGLER, Stefan; VELEV, Stefan; KEATING, Adriana; MECHLER, Reinhard. Realized resilience after community flood events: A global empirical study. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 118, 2025, p. 105246. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2025.105246>. Acesso em: 12 fev. 2025.

CHEN, Xiaolan; LI, Hongtao; YU, Haijun; HOU, Enguang; SONG, Sulin; SHI, Hongjian; CHAI, Yikai. Counterfactual analysis of extreme events in urban flooding scenarios. *Journal of*

Hydrology: Regional Studies, v. 57, 2025, p. 102166. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.102166>. Acesso em: 12 fev. 2025.

CHU, Xuefeng; STEINMAN, Alan. Event and continuous hydrologic modeling with HEC-HMS. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 135, n. 1, p. 119-124, 2009. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2009\)135:1\(119\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9437(2009)135:1(119)). Acesso em: 13 fev. 2025.

COLLODEL, Milena Gardai. Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-14102009-182636/>. Acesso em: 14 fev. 2025.

CORTEZ, Fernanda; MONICELLI, Fernanda; CAVALCANTE, Herika; BECKER, Vanessa. Effects of prolonged drought on water quality after drying of a semiarid tropical reservoir, Brazil. Limnologia, v. 93, 2022, p. 125959. ISSN 0075-9511. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0075951122000135>. DOI: 10.1016/j.limno.2022.125959. Acesso em: 12 dez. 2024.

COSTA, A. C.; BRONSTERT, A.; and KNEIS, D. (2012) Probabilistic flood forecasting for a mountainous headwater catchment using a nonparametric stochastic dynamic approach. HYDROLOGICAL SCIENCES JOURNAL-JOURNAL DES SCIENCES HYDROLOGIQUES, v. 57, p. 10-25.

COSTA, A.C.; FOERSTER, S.; DE ARAÚJO, J.C.; and BRONSTERT, A. (2013). Analysis of channel transmission losses in a dryland river reach in northeastern Brazil using streamflow series, groundwater level series and multi-temporal satellite data. Hydrological Processes (Print), v. 27, p. 1046-1060.

CRISTOFANO, E.A. (1973). Method of Computing Erosion Rate for Failure of Earth Fill Dams; United States Department of the Interior, Engineering and Research Center: Denver, CO, USA, No. 727.

CUI, P.; ZHOU, G.G.D.; ZHU, X.H.; and ZHANG, J.Q. (2013). Scale amplification of natural debris flows caused by cascading landslide dam failures. Geomorphology, 182, 173e189.

DE ANDRADE, Stella Braga et al. Avaliação de softwares de modelos numéricos 2D e 3D para estudos de ruptura hipotética de barragens. 2024. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/239/II-FLUHIDROS0160-1-0-20240801-224648.pdf>. Acesso em: 8 fev. 2025.

DHI GROUP. MIKE 21 & MIKE 3 – Software para modelagem hidrodinâmica. Disponível em: <https://www.dhigroup.com/technologies/mikepoweredbydhi/mike-21-3>. Acesso em: 07 fev. 2025.

ELDEEB, Hazem; MOWAFY, Magdy H.; SALEM, Mohamed N.; IBRAHIM, Ali. Flood propagation modeling: Case study the Grand Ethiopian Renaissance dam failure. *Alexandria Engineering Journal*, v. 71, p. 227-237, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.03.054>. Acesso em: 19 fev. 2025.

FERREIRA, A.L.M.; and ANDRZEJEWSKI, E.A. (2015). Comparação de Métodos de Cálculo da Ruptura de uma Barragem Hipotética. In: XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Foz do Iguaçu: Comitê Brasileiro de Barragens.

FLO-2D. Documentação do software FLO-2D. Disponível em: <https://documentation.flo-2d.com/>. Acesso em: 08 fev. 2025.

FLO-2D. Página oficial do software FLO-2D. Disponível em: <https://flo-2d.com/>. Acesso em: 07 fev. 2025.

FLOW 3D. What's new in FLOW-3D. Disponível em: <https://www.flow3d.com/whats-new-in-flow-3d/>. Acesso em: 07 fev. 2025.

FONSECA, Murilo Noli da; SILVA, Luciene Pimentel da; TEDIM, Fantina Maria Santos. Challenges and opportunities regarding flood risk communication in Brazil. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2025. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:276272223>. Acesso em: 12 fev. 2025.

FRAEHR, Niels; WANG, Quan J.; WU, Wenyan; NATHAN, Rory. Generation and selection of training events for surrogate flood inundation models. *Journal of Environmental Management*, v. 373, 2025, p. 123570. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123570>. Acesso em: 12 fev. 2025.

FREAD, D.L. (1984). DAMBRK: The NWS Dam Break Flood Forecasting Model. National Oceanic and Atmospheric Administration; National Weather Service: Silver Spring, MD, USA, 27p.

FREITAS, C. (2022). Barragens que romperam em Várzea Alegre e Cedro, no Ceará, não estavam cadastradas em sistema do governo. G1, 17 mar. 2022. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2022/03/17/barragens-que-romperam-emvarzea-alegre-e-cedro-no-ceara-nao-estavam-cadastradas-em-sistema-dogoverno.ghml>>. Acesso em 14 dez. 2024.

FRISCHKORN, H.; ARAÚJO, JC; and SANTIAGO, MMF. (2003). Water resources of Ceará and Piauí. In GAISER, T., KROL, MS., FRISCHKORN, H. and ARAÚJO, JC. (Eds.). Global change and regional impacts: water availability and vulnerability of ecosystems and society in the semi-arid Northeast of Brazil. Berlin: Springer-Verlag. p. 87-94.

FROEHLICH, D. C. (2008). Embankment dam breach parameters and their uncertainties. Journal of Hydraulic Engineering, 134(12), 1708-1720. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:12\(1708\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1708)).

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME) (2008). Mapeamento dos Espelhos D'água do Brasil. Fortaleza: Funceme.

G1. Um mês de enchentes no RS: veja cronologia do desastre. Rio Grande do Sul, 29 maio 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2024/05/29/um-mes-de-enchentes-no-rs-veja-cronologia-do-desastre.ghml>. Acesso em: 18 fev. 2025.

GÜNTNER, A. AND BRONSTERT, A. (2004). Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for large-modelling in semi-arid areas. Journal of Hydrology, 297(1-4), pp. 136-161.

GÜNTNER, A., KROL, M. S., DE ARAÚJO, J., and BRONSTERT, A. (2004). Simple water balance modelling of surface reservoir systems in a large data-scarce semiarid region, Hydrolog. Sci. J., 5, 145–164, 2004.

GUTIERREZ, A.P.A.; ENGLE, N.L., DE NYS, E., MOLEJON, C., and MARTINS, E.S. (2014). Drought preparedness in Brazil. Wea. and Clim. Extrem., 3, 95–106. doi: 10.1016/j.wace.2013.12.001.

HERVOUET J.M.; and PETIJEAN A. (1999). Malpasset dam-break revised with two dimensional computations. *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 37. Iss. 6 p. 777-788.

HIGUERA, Pablo; LARA, Javier L.; LOSADA, Iñigo J. Simulating coastal engineering processes with OpenFOAM®. *Coastal Engineering*, v. 71, p. 119-134, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378383912001093>. Acesso em: 19 fev. 2025.

HU, L.; YANG, X.; LI, Q.; and LI, S. (2020). Numerical Simulation and Risk Assessment of Cascade Reservoir Dam-Break. *Water*, 12, 1730; doi:10.3390/w12061730.

HUANG, J.; LI, J.; and LIANG, P. (2018). Inflow flood simulation and risk analysis of cascade reservoirs. China: School of Renewable Energy North China Electric Power, University Beijing. <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201824601106>.

HYDRONIA. RiverFlow2D. Disponível em: <https://www.hydronia.com/riverflow2d>. Acesso em: 07 fev. 2025.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS - ICOLD (1973). *Lessons from Dam Incidents*, reduced edition, Paris: ICOLD, 205 p.

JIBHAKATE, Shubham M.; TIMBADIYA, P. V.; PATEL, P. L. Dam-break flood hazard and risk assessment of large dam for emergency preparedness: A study of Ukai Dam, India. *Journal of Hydrology*, v. 640, 2024, p. 131659. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131659>. Acesso em: 14 dez. 2024.

KAYS, H M Imran; SADRI, Arif Mohaimin; MURALEETHARAN, K.K. "Muralee"; HARVEY, P. Scott; MILLER, Gerald A. Modeling flood propagation and cascading failures in interdependent transportation and stormwater networks. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, v. 48, 2025, p. 100741. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2025.100741>. Acesso em: 19 fev. 2025.

KEERTHY, K.; CHANDRAN, S.; DHANASEKARAPANDIAN, M.; et al. MIKE HYDRO River model's performance in simulating rainfall-runoff for Upper Vaigai sub-basin, Southern India. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 17, p. 125, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12517-024-11930-7>. Acesso em: 14 fev. 2025.

KIM, Beom-Jin; HWANG, Jae-Hong; KIM, Byunghyun. FLOW-3D Model Development for the Analysis of the Flow Characteristics of Downstream Hydraulic Structures. *Sustainability*, v. 14, n. 17, p. 10493, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/17/10493>. Acesso em: 19 fev. 2025.

LEAL, Andrew; QUEIROZ, Waleska. Desastres climáticos e ambientais no Brasil: uma análise detalhada dos dados (1991-2023). *Observatório das Baixadas*, 4 out. 2024. Disponível em: <https://observatoriodasbaixadas.org/desastres-ambientais-no-brasil/>. Acesso em: 18 fev. 2025

LI, P.; and LIANG, C. (2016). Risk analysis for cascade reservoirs collapse based on bayesian networks under the combined action of flood and landslide surge. *Mathematical Problems in Engineering*, (2903935), 1-13. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/2903935>.

LIMA, Thales Bruno Rodrigues; MEDEIROS, Pedro Henrique Augusto; MAMEDE, George Leite; ARAÚJO, José Carlos de. Impact of intensive water use from farm dams on the storage dynamics in strategic reservoirs. *Hydrological Sciences Journal*, v. 68, n. 16, p. 2422-2434, 2023. DOI: 10.1080/02626667.2023.2272669. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2272669>. Acesso em: 11 dez. 2024.

LIRA, Daniely Lidiany Costa. Assoreamento em densas redes de reservatórios: o caso da bacia hidrográfica da barragem Pereira de Miranda, CE. 2012. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

LIU, Yanshun; ZHANG, Xiao; YU, Hao; SUN, Yuxue; SUN, Chuanyu; LI, Zihan; LI, Xianghui. Hydraulic model of partial dam break based on sluice gate flow. *Ocean Engineering*, v. 295, 2024, p. 116974. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116974>. Acesso em: 14 dez. 2024.

LU, Haipeng; ZHANG, Shuliang; GAO, Yu; JIN, Hengxu; ZHAO, Pengcheng; GAO, Yixuan; LI, Yating; WANG, Wenxuan; ZHANG, Yixuan. Using social media data to construct and analyze knowledge graph for "7.20" Henan rainstorm flood event. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 116, 2025, p. 105129. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.105129>. Acesso em: 12 fev. 2025.

LUO, J.; XU, W.; ZHONG, T.; and CHEN, H. (2017). Numerical simulation of cascaded dambreak flow in downstream reservoir. London: Institution of Civil Engineers.

MACCHIONE, Francesco; GRAZIANO, Andrea Antonella. Dimensionless attenuation of dam-breach flood wave propagating along a river. *Journal of Hydrology*, v. 641, 2024, p. 131765. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131765>. Acesso em: 19 fev. 2025.

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

MAMEDE, George L. et al. Modeling the effect of multiple reservoirs on water and sediment dynamics in a semiarid catchment in Brazil. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 23, n. 12, p. 05018020, 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001701. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001701](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001701). Acesso em: 11 dez. 2024.

MAMEDE, George L.; ARAÚJO, Nuno A. M.; SCHNEIDER, Christian M.; DE ARAÚJO, José Carlos; HERRMANN, Hans J. Overspill avalanching in a dense reservoir network. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Washington, v. 109, n. 19, p. 7191-7195, 8 maio 2012. DOI: 10.1073/pnas.1200398109.

MEDEIROS, C. R.; PAIVA, F. F.; FERREIRA, L. M. R.; COSTA, L. D. A.; NÓBREGA, R. L. B.; CUNHA, J.; MOLOZZI, J.; GALVÃO, C. O. How does the storage volume of semi-arid reservoirs change water quality and modulate the diversity of benthic macroinvertebrates? *Science of The Total Environment*, v. 958, 2025, p. 177881. ISSN 0048-9697. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724080380>. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.177881. Acesso em: 12 dez. 2024.

Medeiros, C.R.; Paiva, F.F.; Ferreira, L.M.R.; Costa, L.D.A.; Nóbrega, R.L.B.; Cunha, J.; Molozzi, J.; Galvão, C.O. (2024). How does the storage volume of semi-arid reservoirs change water quality and modulate the diversity of benthic macroinvertebrates?, *Volume 958*, (177881). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177881>.

NIU, Z.; XU, W.; LI, N.; XUE, Y.; and CHEN, H. (2012). Experimental investigation of the failure of cascade landslide dams. *Journal of Hydrodynamics*, 24(3), 430-441.

NOGUEIRA, V.D.Q. A. (1984). Mathematical model of progressive earth dam failure. Ph.D. Thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO, USA.

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y. Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 114, n. 8, p. 877-887, 1988.

OPENFOAM. Disponível em: <https://www.openfoam.com/>. Acesso em: 07 fev. 2025.

PATRO, S.; CHATTERJEE, C.; MOHANTY, S.; et al. Flood inundation modeling using MIKE FLOOD and remote sensing data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 37, p. 107–118, mar. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12524-009-0002-1>. Acesso em:

PEKER, İsmail Bilal; et al. Integration of HEC-RAS and HEC-HMS with GIS in flood modeling and flood hazard mapping. *Sustainability*, v. 16, n. 3, p. 1226, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/3/1226>. Acesso em: 13 fev. 2025.

PETER, Samuel J.; ARAÚJO, José Carlos de; ARAÚJO, Nuno A. M.; HERRMANN, Hans Jürgen. Flood avalanches in a semiarid basin with a dense reservoir network. *Journal of Hydrology*, v. 512, p. 408-420, 2014. ISSN 0022-1694. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.001>. Acesso em: 27 dez. 2024.

RAMLY, Salwa; TAHIR, Wardah. Application of HEC-GeoHMS and HEC-HMS as rainfall–runoff model for flood simulation. In: *ISFRAM 2015: Proceedings of the International Symposium on Flood Research and Management 2015*. Springer Singapore, 2016. p. 181-192. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-0500-8_15. Acesso em: 13 fev. 2025.

REDAÇÃO G1 CE. Barragem rompe após chuvas e deixa moradores ilhados no interior do Ceará. G1, 19 jan. 2025. Disponível em: <https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2025/01/19/barragem-rompe-apos-chuvas-e-deixa-moradores-ilhados-no-interior-do-ceara.ghtml>. Acesso em: 19 jan. 2025.

REMYA, P. G. et al. Wave hindcast experiments in the Indian Ocean using MIKE 21 SW model. *Journal of Earth System Science*, v. 121, p. 385-392, 2012. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12040-012-0169-7>. Acesso em: 19 fev. 2025.

ŘÍHA, J.; KOTAŠKA, S.; and PETRULA, L. (2020). Dam Break Modeling in a Cascade of Small Earthen Dams: Case Study of the C[˘] ižina River in the Czech Republic. *Water*, 12 , 2309, <https://doi.org/10.3390/w12082309>.

ROCHA, Maria de Jesus Delmiro; LIMA NETO, Iran Eduardo. Internal phosphorus loading and its driving factors in the dry period of Brazilian semiarid reservoirs. *Journal of Environmental Management*, v. 312, p. 114983, 2022. ISSN 0301-4797. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114983. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114983>. Acesso em: 12 dez. 2024.

RODRIGUES, Bruno Oliveira; DE OLIVEIRA NASCIMENTO, Nilo. Análise de parâmetros em modelagens de rupturas de barragens de rejeito: os casos de Mariana e Brumadinho. *Encontro Nacional de Desastres*, v. 2, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Bruno-Rodrigues-24/publication/379506576_Analise_de_parametros_em_modelagens_de_rupturas_de_barragens_de_rejeito_os_casos_de_Mariana_e_Brumadinho/links/660c3d32390c214cfd30b991/Analise-de-parametros-em-modelagens-de-rupturas-de-barragens-de-rejeito-os-casos-de-Mariana-e-Brumadinho.pdf. Acesso em: 08 fev. 2025.

ROTTLER, Erwin; SCHÜTTIG, Martin; BRONSTERT, Axel; ESTÁCIO, Alyson Brayner Sousa; ROCHA, Renan Vieira; CARVALHO, Valdenor Nilo de; GUIMARÃES, Clecia Cristina Barbosa; MARTINS, Eduardo Sávio P. R.; LORENZ, Christof; VORMOOR, Klaus. Regional-scale seasonal forecast of surface water availability in a semi-arid environment: The case of Ceará State in Northeast of Brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 56, 2024, p. 102058. ISSN 2214-5818. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581824004075>. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.102058. Acesso em: 12 dez. 2024.

SAMPAIO, I. (2023). Barragem de açude rompe no Ceará e assusta moradores; vídeo. G1, 11 abr. 2023. Disponível em: < <https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2023/04/11/barragem-de-acude-rompe-noceara-e-assusta-moradores-video.ghhtml> >. Acesso em 14 dez. 2024.

SOARES, Jaqueline A. J. P.; OZELIM, Luan C. S. M.; BACELAR, Luiz; RIBEIRO, Dimas B.; STEPHANY, Stephan; SANTOS, Leonardo B. L. ML4FF: A machine-learning framework for flash flood forecasting applied to a Brazilian watershed. *Journal of Hydrology*, v. 652, 2025,

p. 132674. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132674>. Acesso em: 12 fev. 2025.

SU, P.-N. Simulação de transporte de sedimentos no Riacho Natorsa por RiverFlow2D e SRH-2D. Assembleia Geral da EGU 2020, Online, 4–8 maio 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-9180>. Acesso em: 19 fev. 2025.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE (SUDENE) (1980). Plano de Aproveitamento Integrado de Recursos Hídricos do Nordeste do Brasil. Recife: SUDENE.

TAKAYAMA, S.; FUJIMOTO, M.; and SATOFUKA, Y (2021). Amplification of flood discharge caused by the cascading failure of landslide dams. *International Journal of Sediment Research*, 36, 430-438.

TENG, Fei; HUANG, Wenrui; GINIS, Isaac. Hydrological modeling of storm runoff and snowmelt in Taunton River Basin by applications of HEC-HMS and PRMS models. *Natural Hazards*, v. 91, p. 179-199, 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-017-3121-y>. Acesso em: 14 fev. 2025.

TINGSANCHALI, T.; and RATTANAPITIKON W. (1999). 2-D modelling of dambreak wave propagation on initially dry bed. *Thammasat International Journal of Science and Technology*. Vol. 4. No. 3 p. 28–37.

USACE. (2000). Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 2000. HEC-HMS Hydrologic Modeling System, Technical Reference Manual, CPD-74B.

USACE. (2016). HEC-RAS River Analysis System- User Manual. US Army Corps of Engineers-Hydrologic Engineering Center. USA.

VALIANI A.; and CALEFFI V. (2004). Closure to “Case study: malpasset dam-break simulation using a two-dimensional finite volume method”. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 130. No. 9 p. 945–948.

VON THUN, J.L.; and GILLETTE, D.R. (1990). Guidance on breach parameters (Unpublished internal document, 17 p.). Denver: US Bureau of Reclamation.

WANG, Bo; CHEN, Yunliang; WU, Chao; PENG, Yong; MA, Xiao; SONG, Jiajun. Analytical solution of dam-break flood wave propagation in a dry sloped channel with an irregular-shaped

cross-section. *Journal of Hydro-environment Research*, v. 14, 2017, p. 93-104. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jher.2016.11.003>. Acesso em: 19 fev. 2025.

WANG, Qi; ZHAO, Xiaole; LI, Fuchun; ZHAO, Wucheng; AWUKU, Ibrahim; MA, Wen; LIU, Qinglin; LIU, Bing; CAI, Tao; LIU, Yanping; LI, Xuchun. Optimized parameters for SCS-CN model in runoff prediction in ridge-furrow rainwater harvesting in semiarid regions of China. *Agricultural Water Management*, v. 310, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109363>. Acesso em: 24 mar. 2025.

WOOD, Amanda; WANG, Keh-Han. Modeling dam-break flows in channels with 90 degree bend using an alternating-direction implicit based curvilinear hydrodynamic solver. *Computers & Fluids*, v. 114, 2015, p. 254-264. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2015.03.011>. Acesso em: 19 fev. 2025.

World Meteorological Organization, 2021. *The State of Climate Services 2021: Water*, vol. WMO-No. 1278.

YANG, Q.; GUAN, M.; PENG, Y.; and CHEN, H. (2020). Numerical investigation of flash flood dynamics due to cascading failures of natural landslide dams. *Engineering Geology* 276, 105765.

ZHANG, LiYuan; XU, WeiLin; ZHANG, FaXing; ZHANG, WenMing; ZHOU, MaoLin; ZHANG, XiaoLong. Experimental study on the impact of the second dam break heights on the evolution of two-dam failure floods. *Ocean Engineering*, v. 309, pt. 1, 2024, p. 118359. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118359>. Acesso em: 14 dez. 2024.

ZHANG, Y.; and XU, W. (2017). Retarding effects of an intermediate intact dam on the dam-break flow in cascade reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, 55(3), 438-444. <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2016.1276103>.

ZHOU, Mi; XIONG, Lihua; JIANG, Cong; CHEN, Gang; LIU, Chengkai; ZHA, Xini. River network-based index to clarify transmission of hydrological drought in reservoir-regulated basins. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 51, 2024, p. 101604. ISSN 2214-5818. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581823002914>. Acesso em: 12 dez. 2024.

ZHOU, Z.; WANG, X.; CHEN, W.; DENG, S.; and LIU, M. (2017). Numerical simulation of dam-break flooding of cascade reservoirs. Heidelberg: Springer-Verlag GmbH. <http://dx.doi.org/10.1007/s12209-017-0073-y>.