INCERTEZAS NA ANÁLISE DE RISCO DE RUPTURA DE BARRAGENS EM DENSAS REDES DE RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO

Tibério Vieira Sampaio[1]; Emilly Martins Silveira Oliveira[2]; Peniel Zacarias Chirrinzane[3]; George Leite Mamede[4]

Palavras-Chave – Cascata de reservatórios, Eventos extremos de escoamento, Semiárido Brasileiro.

INTRODUÇÃO

O Estado do Ceará apresenta uma densa rede de reservatórios superficiais para armazenamento hídrico em uma região com predominância de embasamento cristalino e precipitação concentrada em poucos meses do ano, de fevereiro a maio. Estas estruturas hidráulicas são, comumente, construídas sem os estudos hidrológicos e de estabilidade de talude necessários para garantir a segurança do barramento, o que pode resultar na ruptura destas barragens de terra construídas na zona rural, como reportado nos últimos anos nos Relatórios de Segurança de Barragem da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e nos veículos de comunicação local, além de várias ocorrências sem notificação, conforme investigação *in loco*.

A modelagem de riscos de ruptura de barragem não é uma tarefa trivial e os modelos convencionais requerem uma grande quantidade de dados, o que pode ser um entrave para aplicação em regiões com restrições na disponibilidade de informações geométricas de barragens e vertedores em densas redes de reservatórios como ocorre no Estado do Ceará (Mamede *et al.*, 2025). Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho foi analisar incertezas associadas à aplicação do modelo CaDBr (*Cascade Dam Break Model*) para avaliação de riscos de ruptura de barragens em densas redes de reservatórios.

METODOLOGIA

A área do estudo compreende a Bacia Hidrográfica do Reservatório Pentecoste (BHRP), com área de 3230 km². O Reservatório Pentecoste barra o rio Canindé, principal afluente do rio Curu, inundando uma área de 4781 ha e armazenando 360 hm³ de água. Outros oito reservatórios estratégicos e pertencentes à BHRN também são monitorados pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH): Caracas (9,6 hm³), Desterro (5 hm³), Pentecoste (360 hm³), Salão (5,6 hm³), São Domingos (2,8 hm³), São Mateus (8,1 hm³), Sousa (29 hm³) e Trapiá I (2 hm³).

A bacia hidrográfica de Pentecoste possui clima tropical semiárido quente, com precipitação média anual de aproximadamente 800 mm, evapotranspiração média anual de 1.600 mm, temperatura média anual de cerca de 27 °C e insolação média diária de 7,4 h. A extração de características da rede de reservatórios da bacia do açude Pentecoste foi realizada utilizando geotecnologias, incluindo o comprimento e a declividade do rio principal, a área e o perímetro das sub-bacias associadas aos 734 reservatórios identificados na bacia hidrográfica do Rio Curu, utilizando imagens de satélite de anos com precipitação acima da média na área, como os de 2004 e 2009.

1) Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, e-mail: tiberiovsampaio@gmail.com
2) Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, e-mail: emillymartinssilveira@gmail.com
3) Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, e-mail: penychirrindzane@gmail.com
4) Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, e-mail: mamede@unilab.edu.br

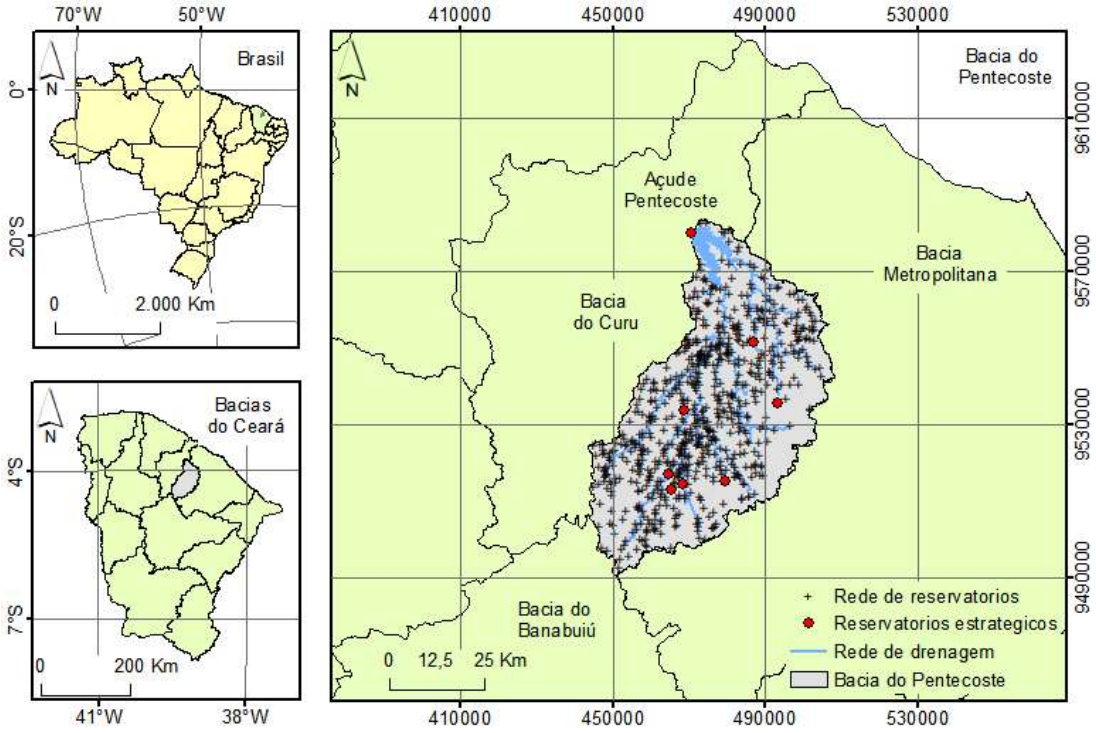


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica da área de estudo com bacias hidrográficas de diferentes escalas: a Bacia Hidrográfica do Riacho Nogueira (BHRN e a Bacia Hidrográfica do Açude Pentecoste com a rede de 734 reservatórios.

O modelo CaDBr (*Cascade Dam Break Model*) é um software desenvolvido em *python* para a simulação de rupturas de barragens individuais e em cascata em densas redes de reservatórios superficiais (Silveira, 2026). Esta ferramenta foi desenvolvida para integrar, em uma única plataforma computacional, os processos hidrológicos, hidráulicos e sedimentológicos envolvidos na propagação de ondas de cheia e no transporte de sedimentos decorrentes do rompimento de barragens. O software foi estruturado para receber como dados de entrada informações referentes à conectividade da rede de drenagem, características hidrológicas das sub-bacias, atributos físicos e hidráulicos dos reservatórios, além dos parâmetros relacionados à produção e propagação de sedimentos.

A parametrização dos atributos hidrológicos, hidráulicos e sedimentológicos para realização das simulações se configura uma etapa complexa sobretudo na caracterização geométrica das barragens e vertedores em densas redes de reservatórios, como no caso da BHRP. A maioria dos reservatórios desta rede não dispõe de qualquer informação sobre as barragens e seus dispositivos hidráulicos. As capacidades de armazenamento são estimadas com base em regressão com a área da bacia usando a Equação de Molle (Molle, 1989), com parâmetros calibrados para a bacia hidrográfica do Pentecoste.

Para caracterização de parâmetros como o de eficiência dos vertedores, lâmina d'água máxima acima do vertedor, altura da barragem de terra e a capacidade de atenuação das vazões de pico afluente aos reservatórios pela laminação nos reservatórios, equações de regressão foram usadas a partir de dados medidos em reservatórios investigados nesta pesquisa (15 barragens) e fornecidos pela COGERH (19 barragens). A eficiência do vertedor representado pelo coeficiente a, corresponde ao produto da capacidade de vertimento pela largura do vertedor. As equações de regressões geradas estão destacadas na Figura 2, incluindo: regressão do coeficiente a com a área da bacia hidrográfica (Figura 2a); regressão da lâmina máxima de vertimento, que representa o desnível entre a cota de soleira do vertedor e a cota de coroamento da barragem, com a área da bacia hidrográfica (Figura 2b); regressão da altura da barragem com a capacidade de armazenamento do reservatório (Figura 3c); regressão da capacidade de atenuação dos picos de vazão pelos reservatórios com a razão entre a capacidade de armazenamento C e a vazão máxima do vertedor $Q_{vert,max}$ (Figura 3d).

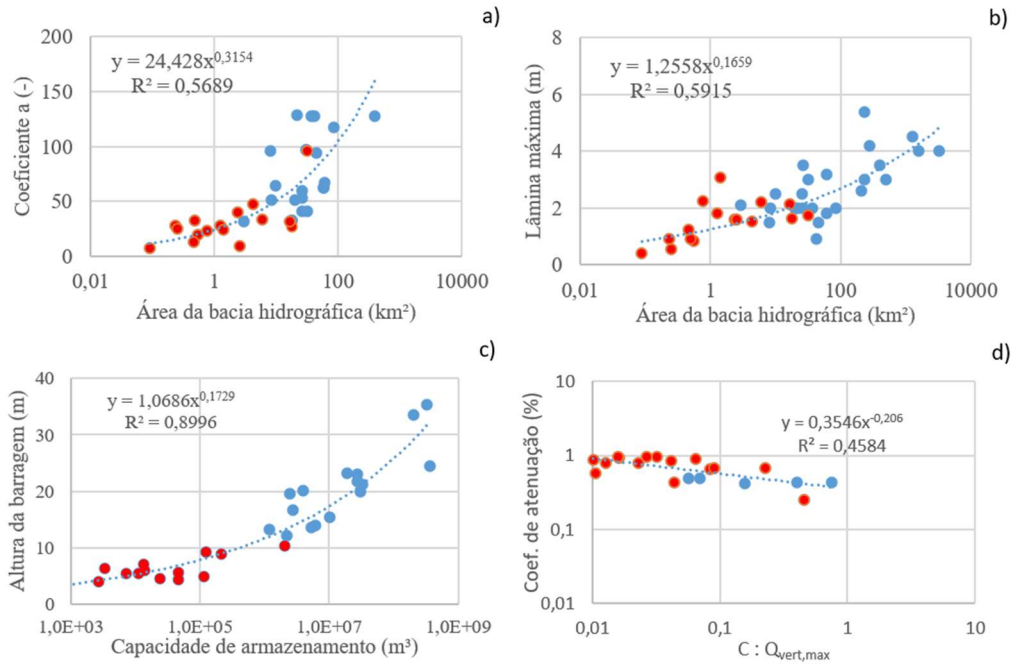


Figura 2. Equações de regressão: a) regressão do coeficiente a com a área da bacia hidrográfica; b) regressão da lâmina máxima de vertimento, que representa o desnível entre a cota de soleira do vertedor e a cota de coroamento da barragem, com a área da bacia hidrográfica; c) regressão da altura da barragem com a capacidade de armazenamento do reservatório; d) regressão da capacidade de atenuação dos picos de vazão pelos reservatórios com a razão entre a capacidade de armazenamento (C) e a vazão máxima do vertedor (Qvert,max). Os pontos destacados em vermelhos representam os reservatórios levantados nesta pesquisa.

A análise de sensibilidade do modelo a alterações de seus parâmetros foi realizada considerando variações de 50% a 150%, com incremento de 10% em relação à parametrização de referência, para a capacidade de extravasamento dos vertedores das barragens e o fator de atenuação dos picos de vazão pelos reservatórios. Adicionalmente, analisaram-se os riscos de ruptura da barragem do açude Pentecoste, com maior capacidade de armazenamento do sistema (360 hm³), considerando cenários que alteram as condições geométricas dos vertedores das barragens de montante: simulação considerando a parametrização de referência para todas as 734 barragens com características dos vertedores e barragens geradas usando geotecnologias, dados medidos (quando disponíveis) e equações de regressão para algumas variáveis (cenário a); simulação com ampliação da capacidade de extravasamento de todos os reservatórios não estratégicos da bacia em dez vezes (cenário b); e simulação com ampliação da capacidade de extravasamento de todos os reservatórios da bacia em dez vezes, incluindo os estratégicos (cenário c).

RESULTADOS

A análise de sensibilidade realizada está ilustrada na Figura 2, para a capacidade de extravasamento dos vertedores das barragens (Figura 2a) e o fator de atenuação dos picos de vazão pelos reservatórios (Figura 2b). Os resultados destacam uma alta sensibilidade do modelo a alterações nesses parâmetros e que a redução nas incertezas associadas às características geométricas de vertedores e à capacidade de atenuação nos reservatórios é uma ação necessária para potencializar a acurácia do modelo CaDBr.

Quanto à análise de risco de ruptura da barragem do Pentecoste, considerando alterações nos vertedores das barragens de montante, observou-se que o rompimento na simulação de referência (cenário a) ocorreria para um evento extremo com tempo de retorno de 1265 anos. Nas simulações com ampliação dos vertedores dos reservatórios de montante, excluindo-se os estratégicos (cenário b) e incluindo-os (cenário c), eventos extremos bem superiores seriam necessários para romper a barragem do Pentecoste, com tempos de retorno de 1851 anos e 2559 anos, respectivamente.

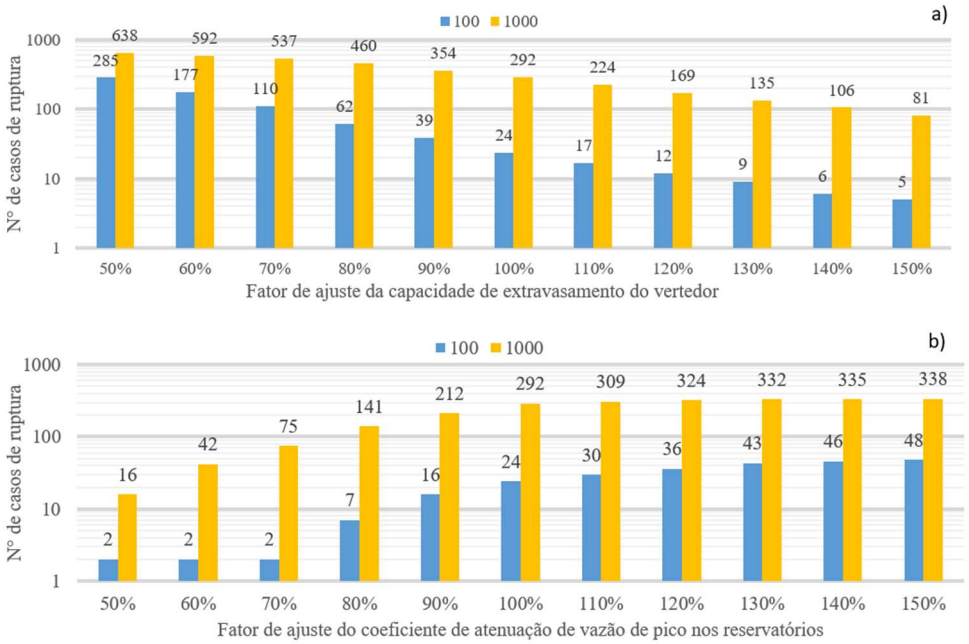


Figura 2 – Análise de risco de ruptura para: a) alterações na capacidade de extravasamento dos vertedores e diferentes períodos de retorno; b) alterações no fator de atenuação dos picos de vazão no reservatório.

CONCLUSÕES

- Os resultados do modelo CaDBr apresentaram alta sensibilidade a alterações de parâmetros como a capacidade de extravasamento do vertedor e o coeficiente de atenuação da vazão de pico pelos reservatórios, sendo, portanto, estratégico envidar esforços para redução de incertezas na estimativa destes parâmetros;
- O estudo identificou, ainda, que a vida útil de um grande reservatório, como o Pentecoste, pode ser severamente impactada por ruptura de reservatórios de montante, destacando o potencial de redução dos riscos de ruptura de barragens estratégicas, quando aquelas localizadas à montante estão bem dimensionadas, chegando a dobrar a vida útil do reservatório Pentecoste para condições de ruptura.

REFERÊNCIAS

MAMEDE, G. L.; PURNA, J. L.; DE MENEZES, S. K. M; SILVEIRA, E. M. (2025). Sediment dynamics in a semiarid catchment with cascade dam failures. Revista Amb. e Água. V.20, p.1-12.

MOLLE, F. Evapotranspiration and infiltration losses in small reservoirs. (1989). Serie Hidrologia, 25, SUDENE / ORSTOM, Recife, Brazil.

SILVEIRA, E. M. (2026). Rompimento de barragens em densas redes de reservatórios superficiais do semiárido brasileiro. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente, Redenção, 2022.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP, Processo nº UNI-0210-00025.01.00/23) pelo financiamento da pesquisa e pela bolsa de iniciação científica ao terceiro autor, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES, Código de Financiamento 001) pela bolsa de mestrado à segunda autora.