ROMPIMENTO DE BARRAGENS EM DENSAS REDES DE RESERVATÓRIOS SUPERFICIAIS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Emilly Martins Silveira[1]; Isaak Yuri Andrade Lima[2];
Tales Paiva Nogueira [3]; George Leite Mamede[4]

Palavras-Chave – Formação da fenda, Riscos de ruptura de barragens, Cascata de reservatórios.

INTRODUÇÃO

Como estratégia para suprimento hídrico no Estado do Ceará, uma densa rede de reservatórios superficiais foi construída nas últimas décadas, sendo a maioria de pequeno e médio porte com capacidades de armazenamento inferiores a 1 hm³, dispostas em cascata. Estas densas redes de reservatórios não são observadas apenas no semiárido nordestino, mas também em várias partes do mundo (Colombo *et al*., 2024; Pisaniello *et al,* 2024). No entanto, 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. Não por acaso, vários casos de rompimento de barragens ou incidentes com tais estruturas hidráulicas vêm sendo reportados no estado do Ceará, ocupando o terceiro lugar em ocorrências de ruptura de barragens no país, de acordo com os Relatórios de Segurança de Barragem da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar riscos potenciais de rompimento de barragens individuais ou em cascata e seus efeitos à jusante com a propagação da onda de cheia e de sedimentos decorrentes da ruptura do maciço. O estudo foi conduzido na Bacia Hidrográfica do Reservatório Pentecoste, com uma rede de 734 reservatórios superficiais.

METODOLOGIA

A área do estudo está inserida na bacia hidrográfica do Curu (Figura 1), incluindo: a Bacia Hidrográfica do Reservatório Pentecoste (BHRP), drenada pelo rio Canindé, principal afluente do rio Curu, com área de 3230 km² e uma rede com 734 açudes; e a Bacia Hidrográfica do Riacho Nogueira (BHRN), inserida na bacia do Pentecoste, com área de 31,6 km² e uma rede com 15 reservatórios. A BHRP possui 8 reservatórios estratégicos 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 caracterização da rede de reservatórios da BHRP foi realizada utilizando geotecnologias, complementada com dados medidos nos açudes monitorados pela (COGERH) e nesta pesquisa. As características geométricas da barragem e vertedor dos 15 reservatórios da BHRN foram medidas *in loco*, o que permitiu estabelecer equações de regressão para os demais reservatórios da bacia do Pentecoste, quando ausente esta informação.

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

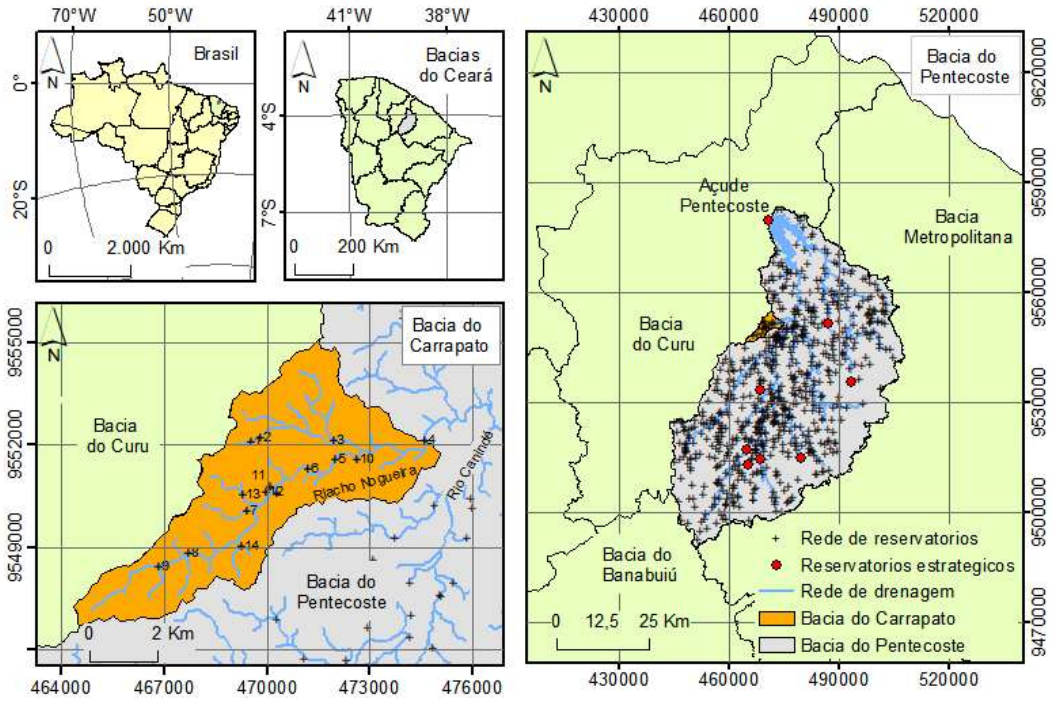


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica da área de estudo com bacias hidrográficas de diferentes escalas: a Bacia Hidrográfica do Riacho Nogueira (BHRN e a Bacia Hidrográfica do Açude Pentecoste com a rede de 734 reservatórios.

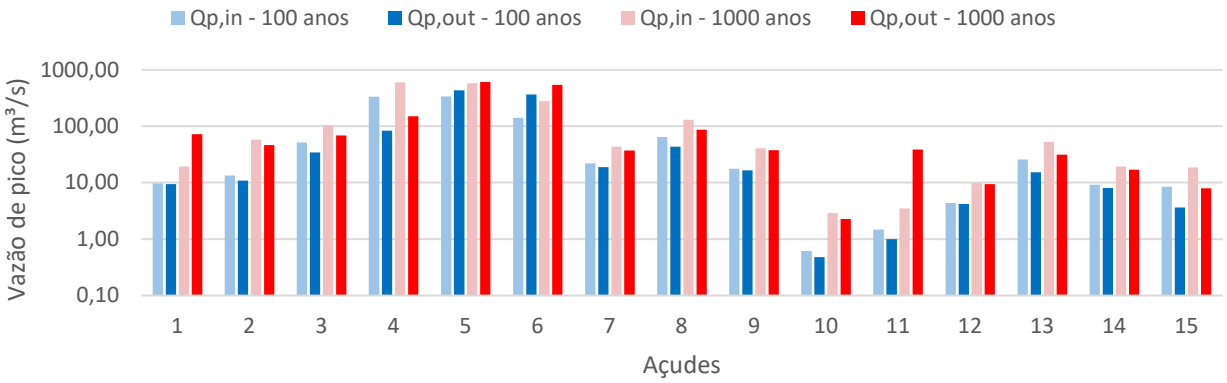
Para simulação da ruptura de barragens em redes de reservatórios, foi desenvolvido um modelo computacional (CaDBr – Cascade Dam Break Model). O CaDBr é uma ferramenta de análise capaz de identificar e estimar cenários de ruptura sucessiva de barragens em densas redes de reservatórios. O modelo foi estruturado a partir de um fluxo sistemático de processamento de dados hidrológicos, hidráulicos e sedimentológicos. Para estimar as vazões máximas associadas a diferentes tempos de retorno, aplicou-se o método SCS-CN (Soil Conservation Service – Curve Number), considerando o tempo de concentração das sub-bacias, calculado segundo o método de Kirpich, e o hietograma de chuva derivado da curva IDF da estação meteorológica de Pentecoste, localizado no entorno da área.

O CaDBR foi aplicado para a simulação de processo de ruptura de barragens individualmente ou em cascata na Bacia Hidrográfica do Reservatório Pentecoste. A parametrização dos atributos hidrológicos e sedimentológicos foi realizada usando geotecnologias, complementadas com dados levantados em campo. Na modelagem hidráulica de propagação dos fluxos pelo reservatório, admitiu-se, como condição inicial, que todos os reservatórios da rede estão com sua capacidade máxima de acumulação no início do evento, o que é a condição padrão usada em projetos de dimensionamento de vertedouros de barragens. Caso a vazão de pico no vertedor exceda a capacidade de extravasamento deste dispositivo hidráulico, haverá galgamento e consequente ruptura da barragem.

RESULTADOS

O modelo CaDBr foi aplicado à BHRN com uma rede de 15 reservatórios para simular os riscos de ruptura associados a eventos extremos de precipitação com tempos de retorno (Tr) de 100 e 1000 anos. As vazões de pico na entrada ($Q_{p,in}$) e saída ($Q_{p,out}$) dos reservatórios estão destacadas na Figura 2. Os resultados indicam casos de ruptura para 100 (açudes 5 e 6) e 1000 anos (açudes 1, 5, 6 e 11), com vazão de pico na saída relativamente maior do que na entrada, como resultado do processo de esvaziamento do reservatório durante o desenvolvimento da fenda. Quando não há ruptura, observa-se um comportamento de atenuação da vazão de pico do hidrograma de entrada decorrente do processo de laminação da cheia pelo vertedor da barragem.

Figura 2 – Vazões de pico na entrada (Qp,in) e na saída (Qp,out) para os tempos de retorno de 100 e 1000 anos na Bacia Hidrográfica do Riacho Nogueira



Para testar a habilidade do modelo em analisar riscos de ruptura de barragens, utilizou-se uma análise comparativa com a modelagem integrada de processos hidrológicos (HEC-HMS) e hidráulicos (HEC-RAS) para a BHRN. Na Figura 3 é mostrado o esquema de conexões da rede de reservatórios da BHRN, com destaque para as rupturas ocorridas em cascata para os tempos de retorno de 100 e 1.000 anos, comparando os resultados obtidos com os dois métodos. As barragens destacadas em azul indicam a não ocorrência de ruptura em ambos os modelos (CaDBr e HEC-HMS/HEC-RAS). Nos casos de ruptura, as barragens destacadas em vermelho indicam divergência entre os modelos, enquanto aquelas destacadas em verde indicam concordância dos métodos na detecção de ruptura. Os resultados do modelo CaDBr indicam uma boa assertividade dos casos de ruptura para os eventos extremos com tempo de retorno de 100 e 1000 anos, quando comparado com a modelagem integrada.

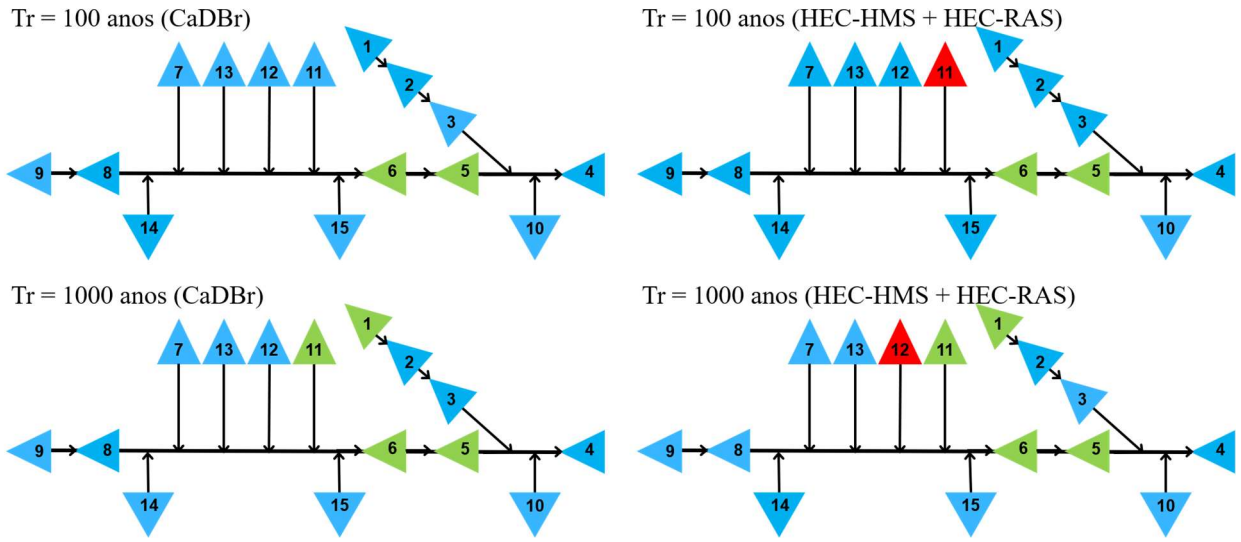


Figura 3. Esquema de conexões da rede de reservatórios da BHRN, com destaque para as rupturas ocorridas em cascata para os tempos de retorno de 100 e 1.000 anos, comparando os resultados do método simplificado proposto neste estudo com os da modelagem combinada (HEC-HMS e HEC-RAS).

O modelo CaDBr foi, então, aplicado à densa rede de reservatórios da BHRP para análise de risco de rupturas individuais e em cascata, considerando eventos extremos com tempos de retorno de 100 e 1000 anos. A Figura 4 permite identificar os casos de ruptura de barragens associados aos eventos extremos com tempo de retorno de 100 e 1000 anos, atingindo 24 e 292 barragens, respectivamente. Nesta análise, entretanto, apenas os açudes Salão, Sousa e Trapiá I romperiam para condição mais extrema (Tr =1000 anos), indicando uma maior capacidade de atenuação dos picos de cheia pelos grandes reservatórios.

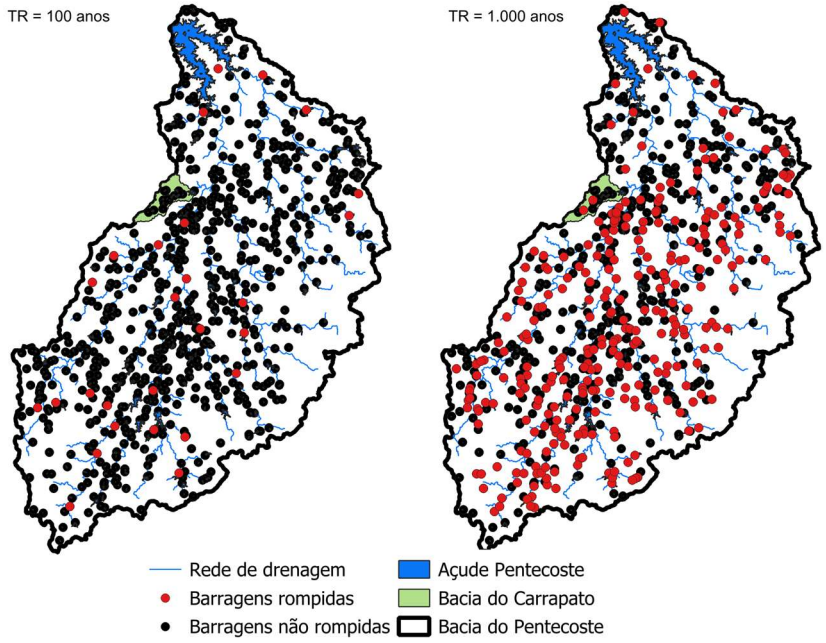


Figura 4. Mapeamento espacial de casos de ruptura de barragens na rede de reservatórios da bacia hidrográfica do açude Pentecoste para tempos de retorno de 100 e 1.000 anos.

CONCLUSÕES

- A modelagem simplificada com o CaDBr mostrou ser uma ferramenta robusta de análise preliminar de risco de ruptura em densas redes de reservatórios, quando os modelos convencionais apresentam restrições devido à grande quantidade de dados requeridos. Por outro lado, os modelos convencionais permitem uma representação mais detalhada das interações em condições extremas, sendo particularmente úteis para análises mais aprofundadas em rupturas individuais ou em redes pequenas de reservatórios;
- O estudo identificou maior risco de ruptura de pequenos reservatórios, comumente construídos sem critérios técnicos de dimensionamento do vertedor e de estabilidade de taludes. Os grandes reservatórios, entretanto, apresentam maior capacidade de atenuação dos picos de cheia e atuam como salvaguarda em rupturas de barragem de montante, requerendo um monitoramento contínuo de segurança do maciço e demais dispositivos hidráulicos.

REFERÊNCIAS

COLOMBO, P. et al. (2024). Modeling the influence of small reservoirs on hydrological drought propagation in space and time. Journal of Hydrology, v. 629, p. 130640–130640.
PISANIELLO, J. D.; TINGEY-HOLYOAK, J. L. (2024). Farm dams and the need for integrated water storage safety, equity and land-use policy: comparative case study evidence from Australia. J. Clean. Prod. 476, 143707.

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, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES, Código de Financiamento 001) pela bolsa de mestrado à primeira autora, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de iniciação científica ao segundo autor.