

## XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **Modelo simplificado de atenuação de ondas de cheia: validação para eventos naturais e rompimentos históricos de barragens**

*Stefany G. Lima<sup>1</sup> & Rodrigo C. D. de Paiva<sup>2</sup>*

**Abstract:** Floods rank among the most devastating and frequent catastrophic events capable of causing extremely harmful impacts to communities. Floods caused by dam failures often result in much more significant damages than those caused by natural factors. Currently, there are 24,000 registered dams in Brazil according to the National Water Agency, but there are indications that this number may be even larger, reaching approximately 300,000 dams. The major disasters in the past involving floods have brought up the discussion about the importance of hazard assessments to assist in the management and prevention of these events. In this context, this study proposes a flood attenuation model that seeks to provide fast and conservative hazard predictions capable of assisting in decision-making. When tested, the model demonstrated remarkable accuracy in reproducing historical peak flow observations and was considerably more precise than a simplified empirical model, showing satisfactory performance metrics. Furthermore, the model provided attenuation predictions equivalent to those provided by a detailed hydrodynamic model, as well as in-situ observations for an actual flood. The model errors were lower than 10% and not larger than the typical uncertainty of flood flow observations. The results indicate that the proposed model is a promising tool for the prediction and management of flood-related hazards. Its ability to provide reliable estimates can contribute to a better understanding of the risks involved in natural flooding events and dam failures, as well as assist in decision-making.

**Resumo:** Inundações estão entre os eventos catastróficos mais devastadores e comuns causando um impacto extremamente prejudicial às comunidades. As inundações por falhas em barragens frequentemente resultam em danos mais significativos que as causadas por fatores naturais. No Brasil, existem atualmente 24 mil barragens cadastradas, de acordo com a Agência Nacional de Águas, mas há indícios que esse número possa ser ainda maior, chegando a cerca de 300 mil barragens. Os desastres passados envolvendo inundações, trouxeram à tona a discussão sobre a importância de estimativas de perigo para auxiliar na gestão e prevenção desses eventos. Nesse contexto, este estudo propõe um modelo de atenuação da onda de cheia que busca fornecer previsões rápidas e conservadoras de perigo, auxiliando na tomada de decisões. Ao ser testado, o modelo demonstrou precisão na reprodução das observações históricas de vazão de pico e foi mais preciso que um modelo empírico simplificado, apresentando métricas de desempenho satisfatórias ( $R=0,98$ ;  $BIAS=-0,05$  e  $RMSE=0,09$ ). Além disso, o modelo forneceu previsões de atenuação equivalentes às fornecidas por um modelo hidrodinâmico detalhado, assim como as observações *in situ* para uma cheia real. Os erros do modelo foram inferiores a 10% e não maiores do que a incerteza típica das observações de vazões de cheias. Os resultados indicam que o modelo proposto é uma ferramenta promissora para a previsão e gestão de perigos relacionados a inundações. Sua capacidade de fornecer estimativas confiáveis podem contribuir para uma melhor compreensão dos riscos envolvidos em inundações naturais e rompimentos de barragens, auxiliando na tomada de decisões.

**Palavras-Chave** – Inundações; Modelo de atenuação de da onda de cheia; Tomada de decisões.

1) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – BR. [stefglima@gmail.com](mailto:stefglima@gmail.com)  
2) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre – BR. [rodrigo.paiva@ufrgs.br](mailto:rodrigo.paiva@ufrgs.br)

## INTRODUÇÃO

Inundações estão entre os eventos catastróficos mais devastadores, com potencial de gerar um impacto extremamente prejudicial para as comunidades, tanto em termos de perdas humanas, lesões, deslocamento de indivíduos, quanto em relação aos danos causados à infraestrutura, cultura, patrimônio ambiental e atividades econômicas (CRED-UNDRR, 2020; Doocy et al., 2013).

Esses eventos podem ser desencadeados por eventos naturais, como o transbordamento de rios, rompimento de taludes fluviais, tempestades costeiras, marés ou chuvas intensas em áreas urbanas. E ainda, também podem ter causas nas ações humanas, como falhas em estruturas hidráulicas, liberação descontrolada de água decorrente de acidentes, além de colapso parcial ou total de barragens (Maranzoni et al., 2023; ICOLD 2022; Merz et al., 2021).

É importante ressaltar que as inundações causadas por falhas em barragens são frequentemente muito maiores em comparação às originadas pelo degelo ou chuvas (Costa, 1985). Além disso, os deslizamentos envolvendo barragens são um fenômeno global que ocorre em diversas regiões do mundo, e.g. o desastre de Johnstown em 1889 e os eventos de St. Francis em 1928 e Teton em 1976 nos Estados Unidos, Malpasset em 1959 na França, Óros em 1960, Cataguases em 2003, Fundão em 2015 e Mariana em 2019 no Brasil, Vajont em 1963 na Itália e Banqiao em 1975 na China.

De acordo com a Agência Nacional de Águas – ANA, existem aproximadamente 24 mil barragens registradas no Brasil (ANA, 2022). No entanto, há indícios de que esse número seja significativamente maior, alcançando cerca de 300 mil barragens (Menescal, 2005). A maioria dessas barragens é utilizada para armazenamento de água e usos múltiplos (76,8%), e a grande parte enfrenta dificuldades na implementação dos instrumentos da Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. Mesmo quando os instrumentos da PNSB são elaborados para as barragens, ainda existem diversos desafios para integrar esses produtos com as políticas de defesa civil para auxiliar na tomada de decisões.

Diante das muitas ocorrências envolvendo inundações, diversos estudos têm explorado diferentes abordagens para descrever as ondas de cheia, abrangendo soluções analíticas (Henderson, 1966), semi-analíticas (Ponce et al., 2003; Ponce e Simons, 1997) e empíricas (Rossi et al., 2021; USBR, 1989; Rutschmann e Hager, 1996; Costa, 1985; Wetmore e Fread, 1981). No entanto, apesar dos esforços realizados anteriormente, ainda não foi desenvolvido um modelo abrangente que permita uma aplicação fácil, utilizando uma equação simples e significativa com parâmetros comumente disponíveis na natureza, capaz de prever com precisão a atenuação do pico da onda de cheia.

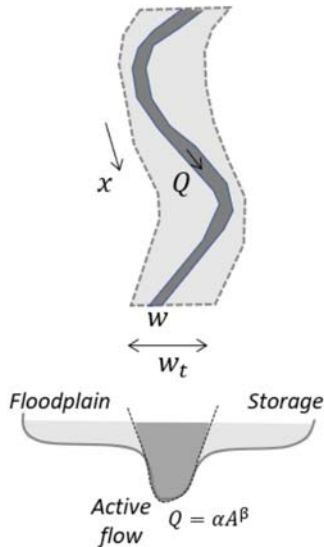
Neste trabalho, apresentamos um modelo de atenuação da onda de cheia que foi desenvolvido e utilizado com o objetivo de fornecer previsões rápidas e conservadoras de perigo que pode auxiliar na tomada de decisões. Para validar e avaliar a precisão do modelo, utilizamos múltiplas observações de rupturas históricas de barragens, bem como um modelo hidrodinâmico detalhado e observações *in situ* para uma cheia real.

## MODELO DE ATENUAÇÃO DE ONDAS DE CHEIA

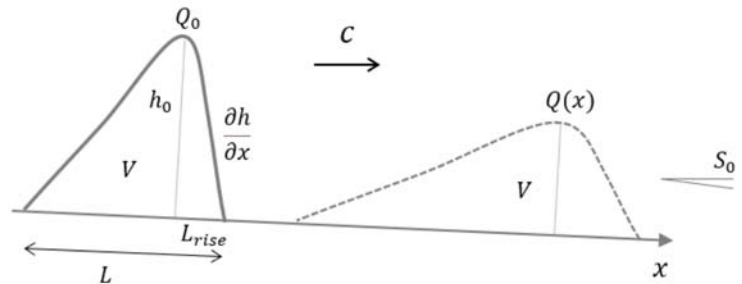
Para elaboração dos resultados, foi utilizado o modelo de atenuação da onda de cheia desenvolvido para prever a atenuação da vazão de pico da onda de cheia. Esse modelo, fundamentado em princípios físicos, o modelo pode ser aplicado de forma simples utilizando uma equação simplificada (Equação 1) que incorpora parâmetros comumente disponíveis relacionados às características do rio e do hidrograma afluente (Equação 2). Ele representa a onda de cheia ao longo da sua trajetória, tendo como base o modelo de difusão com efeitos inerciais. O modelo também considera que o hidrograma e perfil da onda possuem forma e volume constantes e considera uma curva chave de vazões genérica, armazenamento na planície de inundação e celeridade e difusividade variáveis (Figura 1) (Paiva e Lima, 2023a).

Figura 1 – Representação da onda de cheia pelo modelo de atenuação da onda de cheia: a) Seção transversal do rio ativa com parâmetros de classificação de fluxo  $\alpha$  e  $\beta$  e armazenamento da planície de inundação com a razão entre a largura da planície de inundação e do rio ( $\frac{w_t}{w}$ ); b) Hidrogramas de vazão com volume constantes  $V$ , forma e curvatura relativa  $C'$  no pico; c) Perfil longitudinal de vazão mostrando a onda de cheia viajando rio abaixo com celeridade  $c$  e difusividade hidráulica  $D_h$ ; d) O modelo de atenuação da onda de cheia prevendo a redução do pico de vazão ao longo da distância do rio  $x$  de  $Q_0$  a  $Q(x)$  como uma função do fator de atenuação  $\varphi$ .

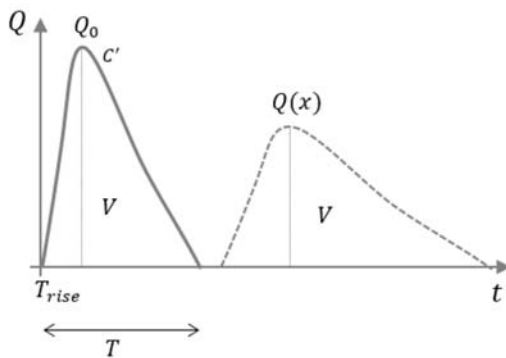
a) River-floodplain



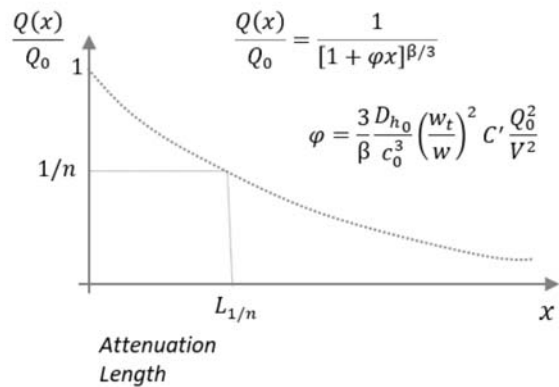
c) Flood wave longitudinal profile



b) Flood wave hydrograph



d) Peak discharge attenuation



$$\frac{Q(x)}{Q_0} = \frac{1}{[1 + \varphi x]^{\beta/3}} \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{3}{\beta} \frac{D h_0}{c_0^3} \left( \frac{w_t}{w} \right)^2 C' \frac{Q_0^2}{V^2} \quad (2)$$

Onde:

$Q_0$ : vazão no trecho analisado ( $m^3/s$ );

$Q(x)$ : vazão imediatamente a jusante do trecho analisado ( $m^3/s$ );

$\varphi$ : fator de atenuação do pico da onda de cheia;

$x$ : comprimento do trecho analisado (m);

$\beta$ : expoente de vazão (em rios naturais,  $\beta = 5/3$ ).

$Dh_0$ : difusividade hidráulica ( $m^2/s$ );

$c_0$ : celeridade iterativa da planície de inundação (m/s);

$w_t$ : largura da planície de inundação (m);

$w$ : largura do canal (m);

$C'$ : curvatura do hidrograma (para o hidrograma sintético de NERC (1975),  $C' \approx 5.78s^{-0.33}$ );

$s$ : simetria do hidrograma ( $s = 1$ );

$Q_0$ : vazão no trecho analisado ( $m^3/s$ );

$V$ : volume do hidrograma ( $m^3$ ).

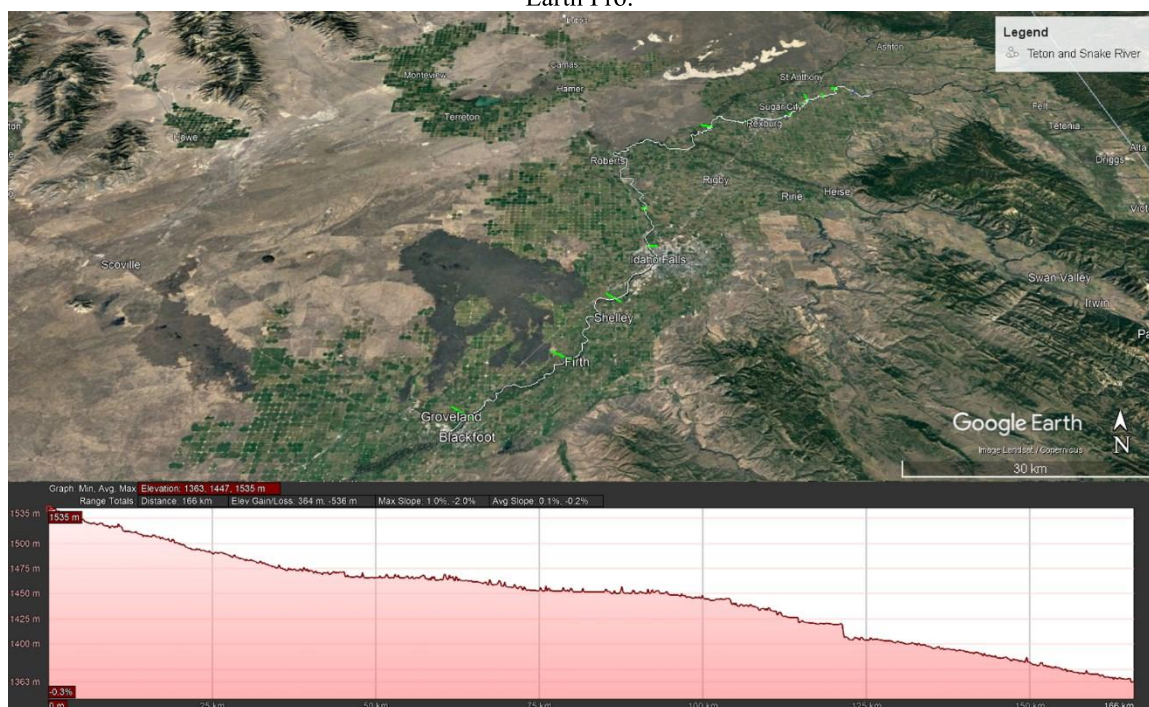
## VALIDAÇÃO EM COMPARAÇÃO COM ENCHENTES HISTÓRICAS DE ROMPIMENTOS DE BARRAGENS

O modelo de atenuação da onda de cheia também foi validado em relação a 29 observações de vazão de pico provenientes de 11 rompimentos históricos de barragens documentadas nos relatórios da USBR (1989) e CPRM (2015). As observações contêm dados de reservatórios de água (9) e barragens de rejeito de mineração (2). Elas incluem o recente desastre do rompimento da barragem de Fundão em 2015, que afetou o Rio Doce no Brasil, e eventos que serviram como casos testes para pesquisas anteriores em modelagem de ondas de cheia, como os casos de Teton em 1976 e Buffalo Creek em 1972.

### Métodos

As observações dos picos das ondas de cheia, celeridade e volume do reservatório foram obtidas através da compilação fornecida pela USBR (1989), exceto para a barragem de Fundão no Rio Doce, onde foram usados dados da CPRM (2015). O volume do hidrograma de entrada foi estimado igual ao volume do reservatório. O tempo de subida foi assumido igual aos tempos de formação/desenvolvimento da brecha compilados por Wahl (1998). Imagens de satélite de alta resolução foram utilizadas para a digitalização das linhas centrais dos rios usando o *software* Google Earth Pro cobrindo os locais descritos na USBR (1989) e CPRM (2015). O *software* também foi utilizado para medir comprimentos de extensão e planícies de inundação, declividades e larguras de rios e planícies de inundação (em média 4-5 por trecho, ver exemplo em Figura 2), também apoiado por descrições da USBR (1989) e damfailures.org. O coeficiente de Manning foi assumido constante ( $n = 0,035$ ) para todos os casos. Todas as outras variáveis e atenuação de pico da onda cheia foram calculadas usando as Equações 1 e 2, a equação de Manning, a equação de Singh & Snorrason (1984) e uma planilha simples. O desempenho do modelo também foi comparado com o modelo empírico  $\frac{Q(x)}{Q_0} = 10^{-0.0125x}$  proposto por USBR (1989), que estima a atenuação do pico da onda de cheia apenas em função da distância do rio e representa uma abordagem simplificada que é atualmente usada para avaliações de rompimento de barragens.

Figura 2 – Barragem de Teton, Rio Teton e Snake. Linhas centrais do rio (branco), largura de rios e planícies de inundações (verde) e perfil longitudinal (vermelho) sobre imagens de satélite de alta resolução do *software* Google Earth Pro.

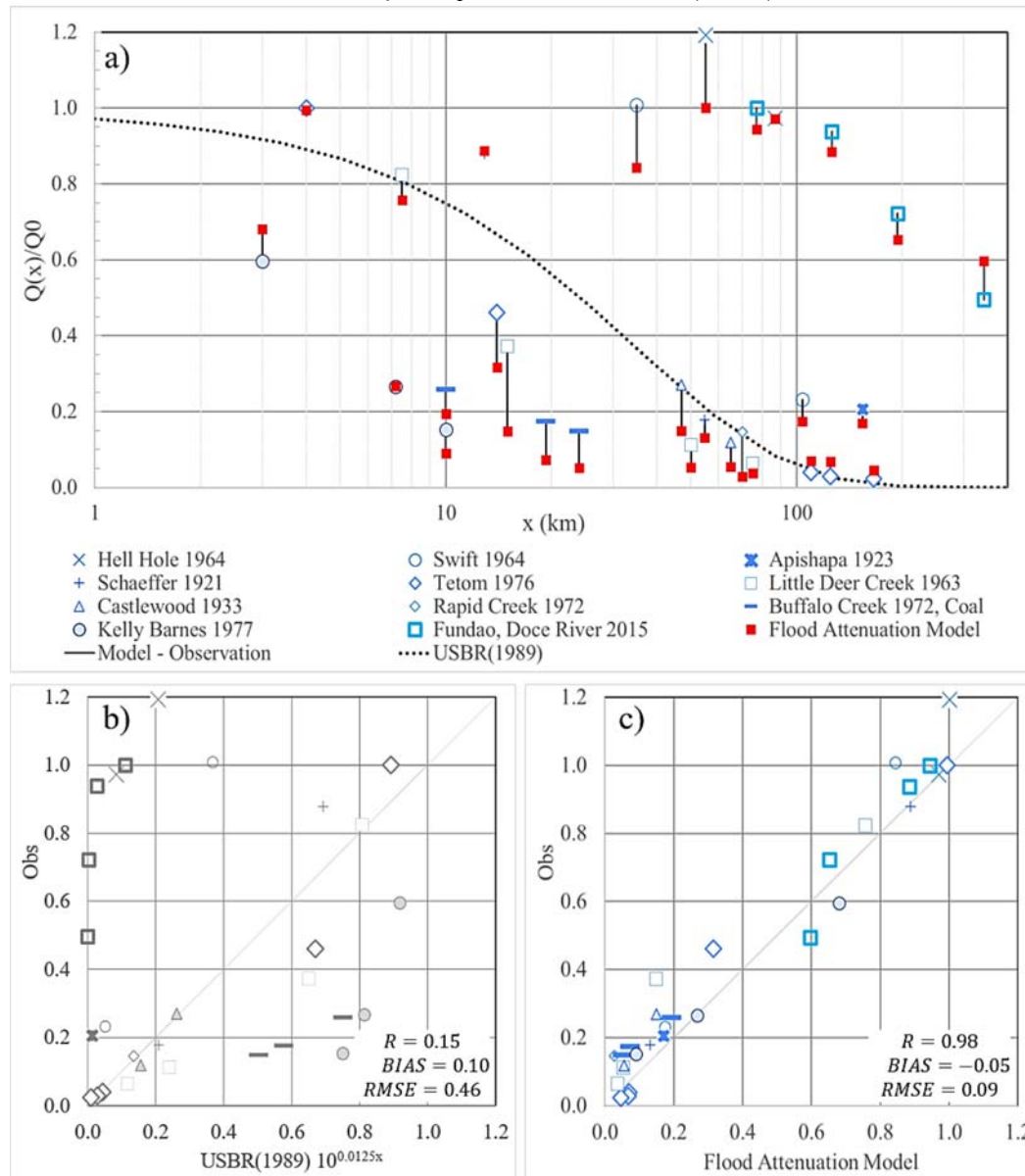


## Resultados

As previsões do modelo de atenuação da onda de cheia podem aproximar as observações históricas da vazão de pico relativa  $Q(x)/Q_0$  e reproduzir a sua variabilidade (Figura 3). As análises revelam a dispersão da atenuação do pico de cheia observada e mostram que a distância do rio  $x$ , por si só, não representa tal variabilidade. A validade do modelo é corroborada pelos valores satisfatórios das métricas de desempenho, como coeficiente de correlação, viés e raiz quadrada do erro médio ( $R=0,98$ ;  $BIAS=-0,05$  e  $RMSE=0,09$ ). A precisão do modelo é significativamente melhorada em comparação com as estimativas baseadas apenas na distância ( $R=0,15$ ;  $BIAS=0,10$  e  $RMSE=0,46$ ).

A validação do modelo em relação a este conjunto de eventos históricos suporta a proposta de representação da onda de cheia e solução das equações hidrodinâmicas. Também, é uma prova de conceito demonstrando a adequação do modelo para avaliações de vazão de pico de cheia atenuada e aplicação de rompimento de barragens, visto que é possível ser facilmente implementado com alguns parâmetros extraídos com métodos GIS.

Figura 3 - Validação do modelo de atenuação de inundações contra observações de 11 rompimentos históricos de barragens. a) vazão de pico relativa em função da distância do rio para o modelo de atenuação da onda de cheia (marcadores vermelhos), observações (marcadores azuis), diferenças (linha contínua preta) e estimativas baseadas apenas na distância de USBR (1989) (linha tracejada preta). Gráficos de dispersão mostrando a vazão de pico relativa de estimativas do modelo versus métricas de desempenho e observadas para o USBR (1989) (b, cinza) e o modelo de atenuação de pico da onda de cheia (c, azul).



## CASO TESTE ENVOLVENDO UMA ENCHENTE NATURAL E UM ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DE BARRAGEM EM TERRENO COMPLEXO

O modelo de atenuação da onda de cheia foi avaliado em um terreno complexo, comparando-o com observações *in situ* e resultados de um modelo hidrodinâmico detalhado no HEC-RAS 1D (USACE, 2020).

### Métodos

Como caso teste, foi selecionado o Rio Jacuí, localizado no Sul do Brasil, entre as cidades de Santa Maria e Porto Alegre. Foi estudado o trecho do Rio Jacuí entre a hidrelétrica de Dona Francisca e a cidade de Cachoeira do Sul (~150 km). O Rio flui por um vale com declividade de ~1 m/km com uma pequena planície de inundação, e depois por um trecho de 10 a 20 cm/km com grandes planícies

de inundação (até 100x a largura do rio principal), cobertas por campos de arroz separados por diques e canais de irrigação. Foi avaliada a enchente natural ocorrida em janeiro de 2010, onde o nível do Rio Jacuí se elevou em mais de 10 metros, causando colapso da principal ponte da região e importantes perdas humanas/econômicas. Em um segundo cenário, avalia-se uma cheia extrema causada pelo rompimento hipotético da barragem Dona Francisca.

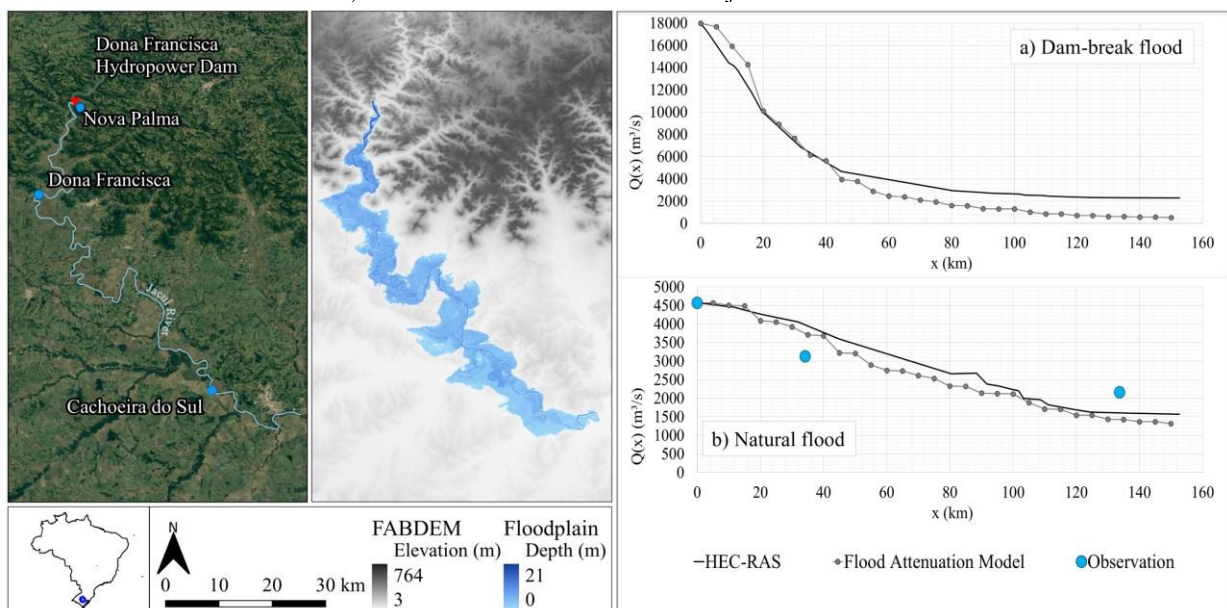
Os hidrogramas de afluência para o evento de cheia natural foram obtidos do Sistema de Monitoramento de Reservatórios – SAR da ANA (ANA, 2013). A vazão de pico foi estimada utilizando a equação de Singh e Snorrason (1984), e as observações de vazão a jusante foram obtidas nas estações de medição da ANA na plataforma HIDROWEB. O modelo hidrodinâmico detalhado foi construído usando o *software* HEC-RAS 1D com o modelo digital de elevação FABDEM, com resolução de 30 metros (Hawker et al., 2022), e considerando as planícies como áreas de armazenamento usando grandes valores de rugosidade de Manning. Os erros de volume foram inferiores a 0,0063%. Nenhuma calibração foi realizada para nenhum dos modelos.

Imagens de satélite de alta resolução foram utilizadas para apoiar a digitalização da linha central do rio, usando o *software* Google Earth Pro, para medir comprimentos de trechos, declividades, larguras de rio e planícies de inundação. O modelo de atenuação de inundação foi aplicado de forma recursiva em trechos regulares de 5 km. Foi assumida uma inclinação mínima de 0,1 m/km.

Os resultados apresentados na Figura 4 demonstram que as previsões da vazão de pico atenuada ao longo do rio, usando o modelo de atenuação da onda de cheia e o modelo hidrodinâmico, são equivalentes. Em ambos os modelos a atenuação é maior para o cenário de rompimento de barragem. Ambos os modelos concordam com as observações *in situ* da vazão de pico diminuindo a jusante. As diferenças entre as previsões dos modelos também têm a mesma ordem de grandeza dos erros do modelo em comparação com as observações.

Os resultados deste caso de teste demonstram que o modelo proposto pode fornecer previsões de atenuação da onda de cheia que são equivalentes àquelas fornecidas por modelos hidrodinâmicos detalhados.

Figura 4 - Comparação do modelo de atenuação da onda de cheia sobre um terreno complexo e um modelo hidrodinâmico detalhado (HEC-RAS) e observações *in situ*. Rio Jacuí no Sul do Brasil entre a Barragem Dona Francisca (vermelho) e Cachoeira do Sul, juntamente com estações de medição *in situ* (azul), terreno do FABDEM (cinza) e profundidade de cheia simulada (campo azul, modelo HEC-RAS). Vazão máxima ao longo do caminho da onda de cheia, estimada utilizando o modelo analítico de atenuação da onda de cheia (marcadores cinza), HEC-RAS (linha contínua preta) e observações *in situ* (círculos azuis) para a) uma cheia hipotética de rompimento de barragem e b) uma cheia natural da enchente de janeiro de 2010.



## CONCLUSÕES

A validade e precisão do modelo foram demonstradas por meio de três análises diferentes. O modelo proposto reproduziu soluções numéricas das equações de Saint-Venant para uma ampla gama de características do rio e de escoamentos, apresentado em Paiva e Lima (2023b). O modelo foi preciso na reprodução das observações históricas de vazão de pico e consideravelmente mais preciso que um modelo empírico simplificado proposto pela USBR (1989). Além disso, forneceu previsões de atenuação equivalentes às fornecidas por um modelo hidrodinâmico detalhado e observações *in situ* para uma cheia real (cheia de 2010 no Rio Jacuí) e um rompimento hipotético de barragem. Os erros gerados pelo modelo foram inferiores a 10% e não maiores do que a incerteza típica das observações de vazões de cheias.

O modelo de atenuação de pico da inundação pode ser impreciso em casos específicos quando suas hipóteses são violadas, e outros modelos hidrodinâmicos devem ser preferidos, como para sistemas complexos com fluxo 1D indefinido, estruturas hidráulicas complicadas ou configurações de fluxos laterais, efeitos significativos de remanso devido a controles a jusante, ondas rápidas com grandes acelerações verticais, mudanças drásticas no formato do hidrograma, transições de fluxos livres para fluxos pressurizados, fluxos de lama e detritos com densidade variável ou reologia complexa. Ainda assim, o modelo proposto abrange uma ampla gama de inundações encontradas na natureza.

As validações do modelo suportam a proposta de representação da onda de cheia e solução das equações hidrodinâmicas, e pode ser facilmente aplicado usando planilhas simples com alguns parâmetros extraídos de bases de dados atuais de GIS. Com isso, o modelo é considerado adequado para aplicações práticas como primeiras avaliações de inundações naturais e de rompimentos de barragens.

## REFERÊNCIAS

- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Relatório de Segurança de Barragens 2021*. (2022) Superintendência de Regulação (SRE), Brasília, DF. [Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/snirh/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2021/rsb-2021.pdf>]
- ANA. (2013). Sistema acompanhamento de reservatórios – SAR. [Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar/>]
- Brasil, C. S. G. (2015). *Monitoramento especial da bacia do Rio Doce. Relatório 01: acompanhamento da onda de cheia*. CPRM.
- Costa, J. E. (1985). *Floods from dam failures* (Vol. 85, No. 560). US Geological Survey.
- CRED-UNDRR. (2020). The human cost of disasters: An overview of the last 20 years (2000–2019). Centre for Research on the Epidemiology of Disasters — UN Office for Disaster Risk Reduction. [https://cred.be/sites/default/files/adsr\\_2019.pdf](https://cred.be/sites/default/files/adsr_2019.pdf)
- Doocy, S., Daniels, A., Murray, S., & Kirsch, T. D. (2013). The human impact of floods: A historical review of events 1980-2009 and systematic literature review. *PLoS Currents*, 5, ecurrents.dis.f4deb457904936b07c09daa98ee8171a. <https://doi.org/10.1371/currents.dis.f4deb457904936b07c09daa98ee8171a>
- Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., & Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17(2), 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
- Henderson, F. M. (1966). Open channel flow. *Macmillan, New York*.
- ICOLD, C. I. G. B. (2022). *Dam Surveillance-Lessons Learnt from Case Histories: Bulletin 180*. Taylor & Francis Group.
- Maranzoni, A., D’Oria, M., and Rizzo, C. (2023). Quantitative flood hazard assessment methods: a review. *Journal of Flood Risk Management*, 16 (1), e12855. [Crossref. ISI. https://doi.org/10.1111/jfr3.12855](https://doi.org/10.1111/jfr3.12855)



- Menescal, L R. (2005). *A Segurança de Barragens e a Gestão de Recursos Hídricos no Brasil*. Brasília: Ed. ProÁgua.
- Merz, B., Blöschl, G., Vorogushyn, S., Dottori, F., Aerts, J. C., Bates, P., ... & Macdonald, E. (2021). Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(9), 592-609. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00195-3>
- Paiva, R.C.D. e Lima, S.G. (2023a) A Simple Model of Flood Peak Attenuation. *Em revisão na Water Resources Research*.
- Paiva, R.C.D e Lima, S.G. (2023b). Modelo simplificado de atenuação de ondas de cheia. In: *XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- Ponce, V. M., & Simons, D. B. (1977). Shallow wave propagation in open channel flow. *Journal of the Hydraulics Division*, 103(12), 1461-1476. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0004892>
- Ponce, V. M., Taher-shamsi, A., & Shetty, A. V. (2003). Dam-breach flood wave propagation using dimensionless parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(10), 777-782. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:10\(777\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:10(777))
- Rossi, C. L. C. U., Marques, M. G., Teixeira, E. D., Melo, J. F. D., Ferla, R., & Prá, M. D. (2021). Dam-Break analysis: proposal of a simplified approach. *RBRH*, 26. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120200066>
- Rutschmann, P., & Hager, W. H. (1996). Diffusion of floodwaves. *Journal of Hydrology*, 178(1-4), 19-32. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02824-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02824-2)
- Singh, K. P., & Snorrason, A. (1984). Sensitivity of outflow peaks and flood stages to the selection of dam breach parameters and simulation models. *Journal of hydrology*, 68(1-4), 295-310. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90217-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90217-8)
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2020), HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual, Version 6.0, Hydrol. Eng. Center, Davis, CA. [Disponível em: [www.hec.usace.army.mil](http://www.hec.usace.army.mil)]
- U. S. Bureau of Reclamation. (1989). Policy and Procedures for Dam Safety Modification Decision Making. *Denver: Department of Interior*. April 1989. 302 p.
- Wahl, T. L. (1998). Prediction of embankment dam breach parameters: a literature review and needs assessment. *Dam Safety Rep. U.S. Dept. of the Interior*, Bureau of Reclamation, Denver.
- Wetmore, J. N., & Fread, D. L. (1981). The NWS simplified dam-break flood forecasting model. *National Weather Service, Silver Spring, Maryland*, 164-197.

**AGRADECIMENTOS** - Os autores desejam reconhecer a CAPES e a Agência Nacional de Águas - ANA pelo financiamento concedido para publicação deste trabalho.