

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

AUTOMATIZAÇÃO DO HEC-RAS PARA GERAÇÃO PROBABILÍSTICA DE HIDROGRAMAS DE RUPTURA DE BARRAGENS POR GALGAMENTO

*Alexandre Ângelo Carmo Luiz da Silva¹ ; Rodrigo Perdigão Gomes Bezerra² &
Julian Cardoso Eleutério³*

Palavras-Chave – Ruptura de barragens, Python, HEC-RAS.

1. INTRODUÇÃO

Estudos de ruptura hipotética de barragens são aplicados como instrumentos de políticas públicas desde a criação da primeira lei europeia de gestão de riscos de barragens em 1968. Os principais resultados da simulação da ruptura hipotética de barragens correspondem ao hidrograma defluente da barragem e à consequente caracterização da inundação associada (MORRIS *et al.*, 1999). No Brasil, a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB (Lei Federal 12.334/2010) dispõe que Zonas de Autossalvamento (ZAS), definidas como áreas do vale a jusante da barragem para as quais não há tempo suficiente para intervenção de autoridades competentes em situações de emergência, devem ser identificadas por meio de modelagens e simulações de rupturas hipotéticas de barragens. Ademais, mapas de inundação provenientes desses modelos são ferramentas fundamentais para planejamento e gestão do risco, como para implementação de sistemas de alerta e determinação de planos de evacuação (SILVA & ELEUTÉRIO, 2019; MATOS & ELEUTÉRIO, 2019). Os resultados desses modelos apresentam, conseqüentemente, grande impacto socioeconômico e ambiental nas comunidades a jusante dessas estruturas.

Dada a complexidade dos modelos, suas incertezas, e sua importância, vários estudos recomendam a avaliação de incertezas para subsídio à formulação de políticas públicas (BEVEN, 2009; RAZAVI *et al.*, 2021). Dentre as diversas fontes de incertezas desse tipo de estudo, destacam-se as incertezas relacionadas à estimativa dos parâmetros de brechas, etapa fundamental para a análise, explorada por autores como WAHL (2004) e FROEHLICH (2016), e indicada por WURBS (1987), MORRIS *et al.* (2008) e WU *et al.* (2011) como a etapa com maior nível de incerteza em estudos de ruptura hipotética de barragens.

As incertezas relacionadas à modelagem computacional podem ser avaliadas de diferentes maneiras. No trabalho clássico de PATÉ-CORNELL (1996), o tratamento das incertezas em análises de risco é classificado em seis níveis, sendo eles: nível 0) detecção da ameaça e identificação dos modos de falha; nível 1) abordagem do “pior-cenário”; nível 2) quase-pior cenário e envoltórias superiores plausíveis; nível 3) melhores estimativas e valores centrais; nível 4) avaliação de risco probabilística (curva de risco única); nível 5) avaliação de risco probabilística (múltiplas curvas de risco). Segundo a autora, a análise de risco probabilístico é um dos métodos mais robustos para o tratamento das incertezas

1) Aluno de Mestrado no Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG, alexandreangelo89@yahoo.com.br

2) Aluno de Mestrado no Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG, rodrigo.pgb@gmail.com

3) Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG, julian.eleuterio@gmail.com

em modelagens. Pesquisas recentes têm explorado o tema, como LARA (2016) e FROEHLICH (2016), que realizaram análises de incertezas relacionadas aos parâmetros de brecha probabilísticas baseadas no método Monte Carlo em associação com o modelo HEC-RAS, por meio do *software* McBreach.

Apesar desses estudos apresentarem um avanço em relação às avaliações clássicas determinísticas, eles ainda apresentam várias limitações. Para análise probabilística, devem ser pré-determinadas distribuições de probabilidade relacionadas aos parâmetros de brechas, que também são objeto de incertezas. Não é consenso quais distribuições melhor representam diferentes parâmetros. O McBreach disponibiliza quatro distribuições teóricas de probabilidade para a amostragem aleatória dos valores dos parâmetros de brecha, sendo elas *i*) Uniforme, *ii*) Triangular, *iii*) Normal e *iv*) Log-Normal. No entanto, GOODELL (2019) sugere que outras distribuições podem representar melhor a distribuição real dos parâmetros. Nesse sentido, o McBreach apresenta uma limitação à análise, restringindo apenas às quatro distribuições mencionadas. Outra restrição do programa corresponde ao método de avaliação dos resultados, onde as incertezas nos parâmetros de brecha são avaliadas apenas em relação a vazões de pico dos hidrogramas. Compreender as incertezas relacionadas a outras variáveis dos hidrogramas, como volume e forma (tempo de ascensão e recessão), pode ser de grande interesse sob a perspectiva de auxiliar o planejamento de ações emergenciais, fortemente relacionadas aos tempos de propagação da onda de cheia.

Com base nessas limitações atuais e, a fim de tornar a aplicação do Método de Monte Carlo em estudos de ruptura hipotética de barragens menos restritiva, apresenta-se no presente trabalho a automatização do modelo HEC-RAS para a geração probabilística de hidrogramas de ruptura de barragens que permite a utilização de qualquer modelo de distribuição de probabilidade para os parâmetros de brecha, possibilita a avaliação dos resultados em função de diferentes características dos hidrogramas resultantes, além de proporcionar a aplicação de uma etapa de validação dos parâmetros e pós-tratamento das amostras. São aqui apresentadas as etapas de desenvolvimento do algoritmo em linguagem Python e uma aplicação em estudo de caso.

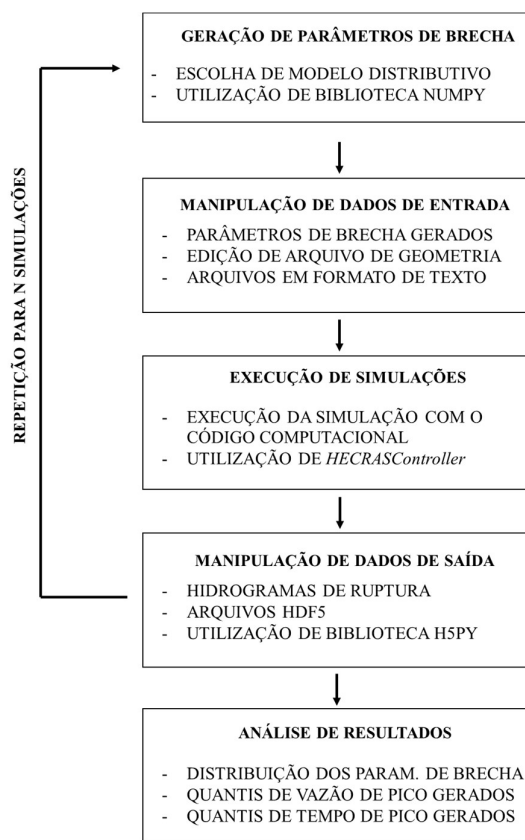
2. ETAPAS DA AUTOMATIZAÇÃO

O modelo computacional HEC-RAS 5.0.7, desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica (HEC) do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE), foi utilizado para estimativa dos hidrogramas defluentes da ruptura a partir da simulação do esvaziamento do reservatório. O modelo é amplamente utilizado para essa finalidade, tendo sido objeto de algumas pesquisas para sua automatização (GOODELL, 2014; DYSARZ, 2018; HAMOUDA, 2018). Na presente pesquisa, foi adotado o módulo de simulação bidimensional do software em regime não permanente, no qual são solucionadas, por meio de um esquema implícito de diferenças finitas de volume, as Equações de Saint Venant bidimensionais. O cômputo do modelo foi realizado considerando todos os termos das equações da quantidade de movimento (*full momentum equation*). O esvaziamento do reservatório foi simulado pelo método de Puls modificado, considerando como estrutura de descarga, a brecha de ruptura. No modelo, a vazão defluente da brecha é estimada a partir equação de soleira, considerando eventuais restrições resultantes das condições de alagamento a jusante. A alteração do volume no reservatório, e consequente rebaixamento do nível de água, é promovida pela solução da equação da continuidade.

Para o modo de falha ocasionado pelo galgamento, objeto do estudo, é necessária a definição de oito parâmetros de entrada referentes à brecha, sendo eles: *i*) largura de fundo final; *ii*) cota de fundo, *iii*) declividade da parede lateral esquerda; *iv*) declividade da parede lateral direita; *v*) tempo de formação; *vi*) coeficiente de descarga; *vii*) posição central; *viii*) nível de água inicial. Dos oito parâmetros apresentados, apenas os cinco primeiros foram considerados como objetos aleatórios na

aplicação do Método de Monte Carlo, dado que a posição central, o coeficiente de descarga e o nível de água inicial, no contexto avaliado, são variáveis que não se alteram de maneira significativa. O gatilho para o início da abertura da brecha de ruptura também precisou ser definido, sendo possível defini-lo como um nível de água específico, um tempo de simulação ou um intervalo de tempo em um mesmo nível de água. Optou-se por iniciar, de maneira prática, o processo de formação de brecha 5 segundos após o início de cada simulação. A automatização do modelo HEC-RAS para definição probabilística de hidrogramas de ruptura consistiu em 5 etapas elaboradas: (1) Sorteio dos parâmetros de brecha com base nos modelos distributivos, (2) Manipulação de dados de entrada, (3) Execução de simulações, (4) Manipulação de dados de saída e (5) Análise de resultados (Figura 1).

Figura 1 - Esquema de metodologia utilizada.



O algoritmo foi desenvolvido em Python com base na biblioteca de funções *HEC-RASController* e em métodos de edição de arquivos de entrada (.TXT) e de saída HDF5. O *HEC-RASController* é parte da interface de programação de aplicações (API) do modelo HEC-RAS e é composto por uma série de classes que contém funções e sub-rotinas específicas do HEC-RAS (GOODELL, 2014). Ressalta-se, no entanto, que muitas das funções do *HEC-RASController* se limitavam ao modelo HEC-RAS 1D, não sendo aplicáveis ao modelo HEC-RAS 2D. Além disso, as primeiras aplicações da biblioteca foram feitas em linguagem computacional VBA que possui capacidade limitada de associação com outras ferramentas, como por exemplo, Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Para aperfeiçoar essa ferramenta, DYSARZ (2018) apresentou técnicas para controle e manipulação de simulações do HEC-RAS utilizando a linguagem Python. Essa linguagem possui grande potencial para aplicações envolvendo programas de geoprocessamento e edição de arquivos em formatos específicos como *eXtensible Markup Language (XML)* e *Hierarchical Data Format 5 (HDF5)* que são utilizados nos arquivos do HEC-RAS. No mesmo

sentido, HAMOUDA (2018) trouxe aplicações da linguagem Python para automatizar procedimentos do modelo HEC-RAS com uso do *HEC-RASController*.

O presente trabalho expandiu as aplicações de automatização do modelo HEC-RAS por meio da linguagem Python, seguindo as recomendações de GOODELL (2014) e DYSARZ (2018). Um código computacional capaz de editar os parâmetros de entrada do modelo dispostos em arquivos de texto e manipular as saídas do modelo dispostas em arquivos HDF foi estruturado com o intuito de elaborar uma abordagem probabilísticas dos hidrogramas de ruptura gerados por galgamento. Na primeira etapa da automatização (Figura 1), os cinco parâmetros de brecha considerados variáveis aleatórias são gerados a partir de qualquer um dos modelos distributivos incorporados na biblioteca de funções *numpy* que inclui as distribuições Normal, Log-Normal, Uniforme, Triangular, Gama, Exponencial, Gumbel, Pearson, Beta e outras. Nessa etapa o sorteio dos parâmetros de entrada do modelo é feito por meio das funções de geração de valores aleatórios implementadas na biblioteca *numpy* como *numpy.random.normal*, *numpy.random.uniform* e *numpy.random.gamma*. Para todas essas funções devem ser fornecidos como argumentos os parâmetros do modelo distributivo.

Na segunda etapa (Figura 1), para a manipulação dos dados de entrada foram utilizadas funções nativas da linguagem Python para alterar os valores dos parâmetros de brecha antes de cada simulação no modelo HEC-RAS, com base nos cálculos da etapa anterior. As variáveis dos parâmetros de brecha entradas no modelo modificadas são armazenadas nos arquivos de plano de simulação (.p01) com formato de texto. A Figura 2 apresenta o trecho do plano de simulação em que a geometria da brecha é armazenada, destacando a linha referente a geometria da brecha (retângulo vermelho).

Figura 2 – Identificação de arquivo de plano de simulação (.p01).

```

bench_usold_artigo - Bloco de Notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
HDF Write Warmup=0
HDF Write Time Slices=0
HDF Flush=0
HDF Face Node Velocities=0
HDF Compression= 1
HDF Chunk Size= 1
HDF Spatial Parts= 1
HDF Use Max Rows=0
HDF Fixed Rows= 1
Breach Loc=          ,          ,          ,True,barragem
Breach Method= 0
Breach Geom=180,79.03,236.51,0.77,0.77,False,,,1.21,1.7
Breach Start=False,272,01jan2000,0005,False,,,0
Breach Progression= 21
    0          0          .05          .006          .1          .024          .15          .054          .2          .095
    .25          .146          .3          .206          .35          .273          .4          .345          .45          .422
    .5          .5          .55          .578          .6          .655          .65          .727          .7          .794
    .75          .854          .8          .905          .85          .946          .9          .976          .95          .994
    1          1
Simplified Physical Breach Downcutting= 2

```

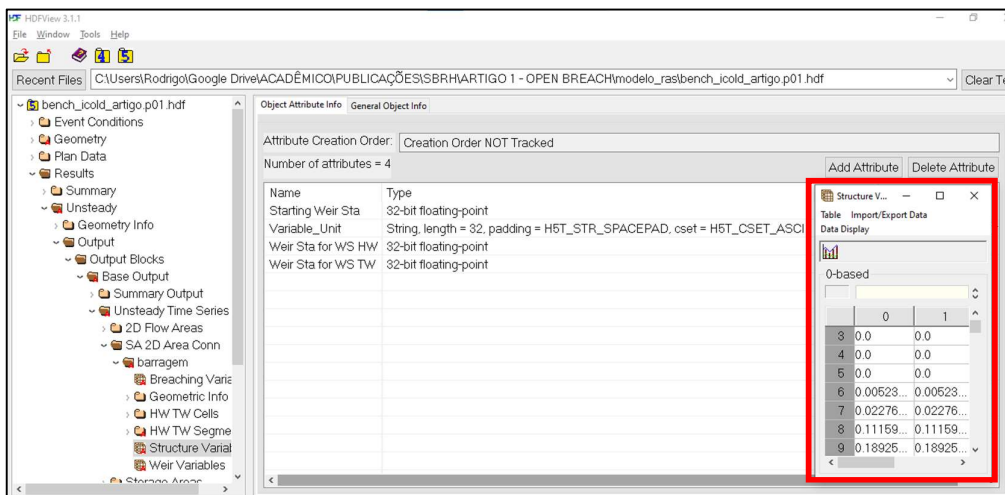
Na sequência, na terceira etapa (Figura 1), a execução automática da simulação é feita por meio da biblioteca de funções *HEC-RASController* cujos argumentos e definições estão detalhadamente descritos em GOODELL (2014). Foram utilizadas as funções da ferramenta para exibir a interface do modelo (*Show_RAS*), abrir o projeto desenvolvido (*Project_Open*), executar o plano de simulação (*Compute_CurrentPlan*), salvar o projeto (*Project_Save*), e após realização da etapa subsequente, a função para fechar a interface do modelo (*Quit_RAS*).

Como dado de saída do modelo manipulado, objeto da quarta etapa da automatização (Figura 1), são extraídos os hidrogramas de ruptura gerados a cada simulação. Os hidrogramas são armazenados em arquivos do plano de simulação em formato *HDF5*, trazendo informações a partir de uma estrutura hierárquica. Para facilitar a localização dos hidrogramas de ruptura gerados nos arquivos de plano de simulação (.p01.hdf), utilizou-se o programa *HDFView* que permite a exibição dos dados de forma intuitiva, como mostra a Figura 3. Observa-se na imagem a estrutura hierárquica do arquivo que

possui uma pasta exclusiva para os dados de saída do modelo e permite ao usuário acesso aos dados do hidrograma de ruptura da barragem salvos em um vetor de vazão ao longo dos intervalos de tempo.

A automatização da manipulação dos arquivos HDF5 gerados foi realizada com base na biblioteca *h5py*. Para cada simulação, são calculados os parâmetros de vazão de pico, tempo de pico e de base.

Figura 3 – Identificação de arquivo de saída do modelo (.p01.hdf).



3. ESTUDO DE CASO

O caso selecionado para a análise foi desenvolvido pelo ICOLD (ZENZ & GOLDGRUBER, 2013) e se refere a uma barragem projetada em um terreno virtual de teste. O caso foi apresentado no 12º *International Benchmark Workshop* sobre análises numéricas de barragens com objetivo de comparar diferentes técnicas aplicadas ao desenvolvimento de análises de risco de inundação associadas a rupturas de barragens. A barragem proposta para a análise no estudo de caso encontra-se projetada em uma região montanhosa, localizada 3,5 km a montante de uma área urbana. O galgamento foi o modo de falha proposto. As características da barragem associadas ao objetivo proposto estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características da barragem analisada no estudo de caso.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Comprimento da crista	360 m	Ângulo de atrito efetivo/drenado	14°
Largura da crista	24 m	Resistência não drenada	43,09 + 0,175σ _{mc} kPa
Cota de crista	272 m	Velocidade de propagação da onda	152,4 m/s
Cota de fundação	211 m	Máximo módulo de cisalhamento	46.443 kPa
Declividade talude	3H:1V	Peso específico saturado	2.002 kg/m³
Coesão efetiva/drenada	19,15 kPa	Permeabilidade	1,9 x 10 ⁻⁶ (cm/s)

A área a jusante da barragem, definida no modelo determinístico para o estudo de propagação da onda de ruptura, se caracteriza por um primeiro trecho de vale encaixado, com extensão aproximada de 3,5 km, seguido por uma região de planície. O modelo truncando, focado apenas em simular o

hidrograma probabilístico, sem foco na propagação a jusante, descreveu apenas os primeiros trechos a jusante da barragem, até a seção de controle hidráulica definida pela transição do vale encaixado para o vale aberto. A Tabela 2 apresenta uma síntese dos parâmetros do modelo truncado utilizado.

Tabela 2 – Resumos dos parâmetros do modelo hidráulico configurado

Parâmetro	Valor
Resolução modelo digital de elevação	9,5 m
Resolução malha computacional	50 m
Área computacional	1.988 células, representando uma área igual a 5km ² aproximadamente
Condição de contorno a montante	Área de armazenamento
Condição de contorno a jusante	Profundidade normal
Coefficiente de Manning	Valores médios adotados pelos autores convidados por ZENZ & GOLDGRUBER, 2013
Modelo matemático	Equações completas da quantidade de movimento (<i>full momentum method</i>)
Erro máximo admitido	0,06 m
fator de ponderação implícita (Coeficiente theta)	1,0
Intervalo de tempo de cálculo	Ajuste automático baseado no número de Courant, adotando os valores de 0,5 e 3,0 como limites do parâmetro. $\Delta t_{\max} = 64,0$ s e $\Delta t_{\min} = 1,0$ s.

De forma a validar a metodologia proposta, foram realizadas 2000 simulações (n = 2000 para simulação automática), utilizando como critério de convergência a estabilização da média acumulada dos valores de vazão de pico. Os modelos distributivos adotados nas simulações seguiram a recomendação de GOODELL *et al.* (2018). O autor sugere a utilização do modelo de distribuição Normal (μ , σ), no qual a relação $\mu \pm 3\sigma$ é igual aos valores mínimos e máximos dos parâmetros estimados pelas equações de previsão indicadas pelo guia de diretrizes de estudos de ruptura de barragens elaborado pelo FERC (*Federal Energy Regulatory Commission* dos Estados Unidos). Essa relação garante que 99,7% da amostra fique contida entre os valores extremos obtidos pelas equações empíricas. Os parâmetros para os modelos propostos apresentados na Tabela 33.

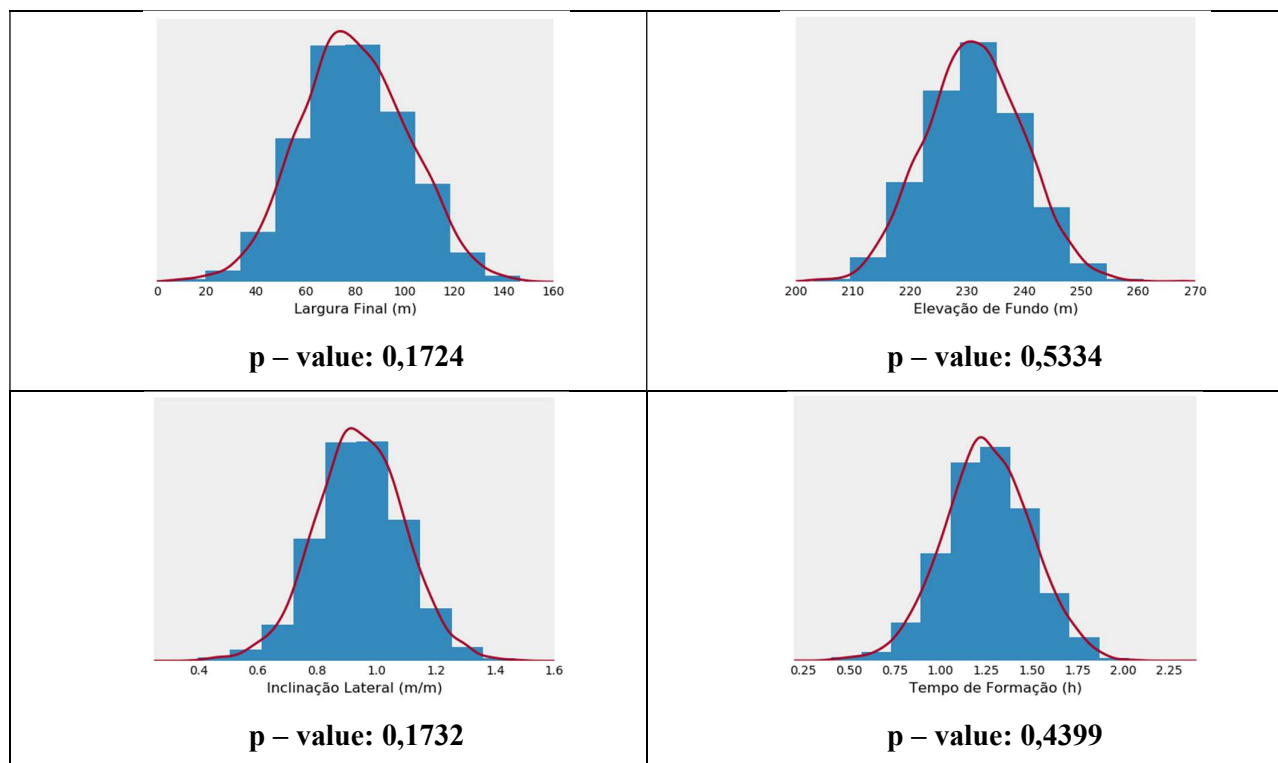
Tabela 3 - Média e desvio padrão determinados para os parâmetros de brecha.

Parâmetro	Unidades	Média (μ)	Desvio Padrão (σ)
Largura de fundo	m	78,98	22,47
Elevação de fundo	m	1,26	0,24
Inclinações laterais	m/m	0,95	0,15
Tempo de formação	h	231,39	8,45

3.1 Sorteio Aleatório dos parâmetros de brecha

Para avaliar os resultados obtidos na etapa de amostragem dos parâmetros de brecha, inicialmente analisou-se a distribuição dos parâmetros gerados por meio de histogramas e testes de aderência. A Figura 4 apresenta os gráficos obtidos bem como os p-valores determinados por meio do teste de normalidade de Shapiro-Wilk. Como pode ser observado, todos os parâmetros gerados possuíram distribuição semelhante à distribuição normal típica. Esse comportamento se confirma nos resultados dos testes de aderência tendo em vista que os p-valores acima de 0,05 não apresentam evidências de uma distribuição diferente da normal.

Figura 4 – Histogramas dos parâmetros de brecha gerados.



3.2 Resultados

Como resultados da modelagem probabilística dos hidrogramas de ruptura com base nas incertezas dos parâmetros de brecha, foram determinados os quantis de vazão e tempo de pico. Para ilustrar os resultados foram selecionadas diferentes probabilidades de excedência (5%, 10%, 50%, 90%, 95%, 99%) e os respectivos hidrogramas gerados.

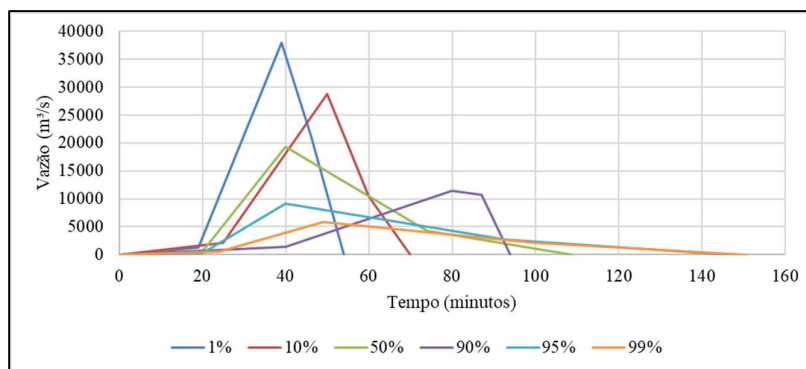
Quantis de vazão de pico

A partir da série de hidrogramas de ruptura gerada, pôde-se obter as vazões de pico referentes a essas diferentes probabilidades. A Tabela 4 e a Figura 5 apresentam os quantis de vazão de pico e seus respectivos hidrogramas de ruptura. Como pode ser observado, os hidrogramas de ruptura referentes a menores probabilidades de excedência em geral possuíram menores tempos de base ao passo que os hidrogramas de ruptura associados a maiores probabilidades de superação foram, em geral, caracterizados por maior tempo de base. O critério utilizado para definição do tempo de base do hidrograma foi o tempo em que o decréscimo de vazão foi inferior a $10 \text{ m}^3/\text{s}$, limiar definido com base na representatividade observada em análise gráfica de diferentes hidrogramas simulados.

Tabela 4 – Quantis calculados tendo como referência a vazão de pico do hidrograma de ruptura.

Probabilidade de excedência (%)	1	10	50	90	95	99
Vazão de pico (m^3/s)	37.987	28.729	19.343	19.343	9.193	5.917

Figura 5 – Hidrogramas de ruptura associados aos quantis de vazão de pico determinados.



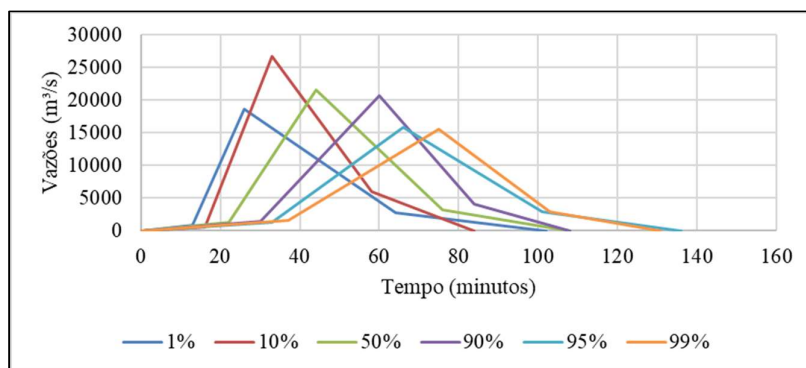
Quantis de tempo de pico

De forma análoga a etapa anterior, foram determinados os quantis de tempo de pico para diferentes probabilidades de excedência. A Tabela e a Figura 6 apresentam os resultados obtidos. Como pode ser observado, os hidrogramas de ruptura determinados possuem, em geral, vazões de pico e formatos semelhantes, porém se diferenciam em relação ao tempo de ascensão do hidrograma, variável importante para a análise do tempo de viagem da onda pelo vale a jusante.

Tabela 4 – Quantis calculados tendo como referência o tempo de pico do hidrograma de ruptura.

Probabilidade de excedência (%)	1	10	50	90	95	99
Tempo de pico (min)	26	33	44	60	66	75

Figura 6 – Hidrogramas de ruptura associados aos quantis de tempo de pico determinados.



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O algoritmo de automatização apresentado demonstrou como vantagem a possibilidade de realizar o sorteio aleatório dos parâmetros de brecha a partir de distribuições de probabilidade que não estão contidas em outros modelos, como o MCBreach. Esse aspecto é importante pois outras distribuições, que não aquelas apresentadas nesse modelo, podem representar melhor a variabilidade dos parâmetros de brecha. Além disso, o algoritmo permite considerar outros parâmetros de modelagem como variáveis aleatórias e também avaliar outros resultados como referência para a análise probabilística, como tempo de ascensão/de pico, volume, entre outros. A flexibilidade do algoritmo também permite ao analista desenvolver sua análise probabilística conforme seus objetivos.

No estudo de caso, a automatização da análise possibilitou a simulação de 2.000 cenários probabilísticos construídos com base no sorteio aleatório (Monte Carlo) de parâmetros de brecha fundamentados em distribuições probabilísticas pré-determinadas. Como resultado, foi observado a aplicabilidade do algoritmo, uma vez que foi observado uma grande aderência entre os modelos probabilísticos definidos para o sorteio aleatório e as respostas do processo de definição aleatória dos parâmetros. Além disso, o algoritmo permitiu verificar que as probabilidades de ocorrência relacionadas a picos e tempos de ascensão são diferentes, características que podem ter efeitos distintos em termos de propagação e risco para jusante.

O estudo de caso proposto se limitou a avaliar um caso de ruptura de uma barragem de água, no entanto, o algoritmo proposto pode também ser adaptado para automatização de simulações de rupturas de barragens de rejeitos. Nesse caso, uma perspectiva promissora consiste na incorporação ao algoritmo variáveis aleatórias referentes a características de escoamentos não newtonianos, ressaltando que esses foram recentemente incorporados em versões teste do software HEC-RAS.

O modelo de distribuição dos parâmetros de brecha também representa uma análise limitada. Entende-se que esse modelo afeta os resultados da análise e optou-se por adotar a referência indicada por GOODEL (2018). Outros modelos, baseados em observações de casos históricos de ruptura também podem ser definidos e futuramente adotados como referência para estudos complementares e similares ao aqui apresentado.

O algoritmo ainda indica grande aplicabilidade para análise de incertezas globais em estudos de ruptura hipotética de barragens. É perspectiva de trabalho expandir o algoritmo para também incorporar parâmetros referentes à modelagem hidrodinâmica, como o coeficiente de Manning. Com pequenas adaptações, o algoritmo ainda permite avaliar os resultados da análise e desenvolver ferramentas para a álgebra de *rasters* e elaboração de mapas de inundação probabilísticos. Pesquisas e desenvolvimentos nessas linhas estão sendo realizados pela equipe de trabalho e grupos de estudos da UFMG (SILVA, 2021; SILVA & ELEUTÉRIO, 2020; BEZERRA & ELEUTÉRIO, 2020).

REFERÊNCIAS

- BEVEN, K. (2009) *Environmental Modelling: An uncertain future?* 1. ed. [S.l.]: Routledge.
- DYSARZ, T. (2018) “Application of Python Scripting Techniques for Control and Automation of HEC-RAS Simulations”. Water.
- BEZERRA, R. P. G.; ELEUTÉRIO, J. C (2020). *Breve Revisão Sobre Aplicações e Desafios Relacionados ao Mapeamento Probabilístico de Inundações*. II Encontro Nacional de Desastres.
- FROEHLICH, D. C. (2016) Predicting Peak Discharge from Gradually Breached Embankment Dam. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 21, n. 11, p. 04016041, Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0001424>
- FROEHLICH, D.(2016) Empirical model of embankment dam breaching. 24 jun. 2016, Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press. p. 1821–1826. Disponível em: <<http://www.crcnetbase.com/doi/10.1201/9781315644479-285>>.
- GOODELL, C. (2014) *Breaking the HEC-RAS code*. Portland, Oregon. 264 p.
- GOODELL, C. *et al.* (2018) Probabilistic dam breach modeling using HEC-RAS and McBreach. Miami: United States Society on Dams. p. 11.

- GOODELL, C. (2019) *User's Manual McBreach by Kleinschmidt*. . Portland: [s.n.], 2019.
- HAMOUDA, T. (2018) “Impact of micro-topography and bathymetry modification on inundation modelling with different magnitudes based on SRTM data”.
- LARA, P., G. (2016) *Metodologia Probabilística de Previsão de Brecha de Ruptura de Barragens*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 181 p.
- MATOS, A. C. S; ELEUTÉRIO, J. C (2019). Análise de Perdas de Vidas Associadas a Ruptura Hipotética da Barragem de Fundão. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu.
- MORRIS, M.; GALLAND, J.-C.; BALABANIS, P.(1999) *Concerted action on dam-break modelling*. [S.l: s.n.].
- PATÉ-CORNELL, M. E. (1996.) Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 54, n. 2–3, p. 95–111. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951832096000671>>.
- RAZAVI, S. *et al.* (2021) The Future of Sensitivity Analysis: An essential discipline for systems modeling and policy support. *Environmental Modelling & Software*, v. 137, p. 104954.
- SILVA, A. A. C. L (2021). *Análise de Incertezas dos Parâmetros de Brecha Aplicada à Modelagem Probabilística do Hidrograma de Ruptura em Barragens de Terra*. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.
- SILVA, A. A. C. L; ELEUTÉRIO, J. C (2020). *Modelagem de Brechas de Ruptura em Barragens De Terra*. II Encontro Nacional de Desastres.
- SILVA, A. F. R; ELEUTÉRIO, J. C (2019). *Simulação de Perdas de Vidas Causadas por Inundações: Modelos Disponíveis e Aplicações Comparativas*. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu.
- WAHL, T. L. (2004) Uncertainty of Predictions of Embankment Dam Breach Parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 130, n. 5, p. 389–397.
- WURBS, R., A. (1987) *Dam-Breach Flood Wave Models*. Journal of Hydraulic Engineering (ASCE). v. 113 (1), p. 29-46.
- ZENZ, G., GOLDGRUBER, M. (2013) *Computational Challenges in Consequence Estimation for Risk Assessment: Numerical Modelling, Uncertainty Quantification, and Communication of Results*. In: 12th International benchmark workshop on numerical analysis of dams. ICOLD, Austrian National Commission on Large Dams (ATCOLD). Graz, Austria. p. 221-254.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, ao CNPq, à FAPEMIG, à PRPq/UFMG que contribuíram com as pesquisas por meio de apoio financeiro e/ou por meio da disponibilização de dados. Agradecimento especial se faz ao Professor Doutor Robert Michael Boes, do Departamento de Engenharia Civil, Ambiental e Geomática do Instituto Federal de Tecnologia de Zurique, na Suíça (ETH Zurich) pelo fornecimento da base de dados adotada no estudo de caso.