

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA BORDA LIVRE EM ESTUDO DE TRÂNSITO DE CHEIAS DE UMA BARRAGEM DE ÁGUA EM BACIA NÃO MONITORADA

Gabriel Fonseca Cunha¹; Mayara Marques Alves²

Abstract: The freeboard is a fundamental parameter for hydrological safety against dam overtopping. This study presents a sensitivity analysis of the freeboard in a flood routing study for a water storage dam located in an ungauged catchment. Hydrological modeling was performed using the HEC-HMS software, applying the Huff method for rainfall temporal distribution, the NRCS-CN model for effective rainfall estimation, and the NRCS unit hydrograph for rainfall-runoff transformation. Sensitivity analysis was conducted through Multiple Linear Regression and Analysis of Variance (ANOVA), considering systematic $\pm 15\%$ variations in the following input parameters: rainfall magnitude, Curve Number (CN), initial abstraction, Peak Rate Factor (PRF), lag time, reservoir storage volume (stage-storage curve), and discharge capacity (stage-discharge curve). Results indicated that the most influential factors on the freeboard were rainfall magnitude, Curve Number, and reservoir storage volume. Due to the high storage capacity of the case study dam, PRF and lag time exhibited very low sensitivity in the results, with effects much smaller than the residual variance.

Resumo: A borda livre é um parâmetro fundamental para a segurança hidrológica contra o galgamento de barragens. Este trabalho apresenta uma análise de sensibilidade para a borda livre em estudo de trânsito de cheias de uma barragem de água localizada em bacia não monitorada. A modelagem hidrológica foi realizada com o software HEC-HMS, utilizando o método de Huff para a distribuição temporal das chuvas, o modelo NRCS-CN para a estimativa da precipitação efetiva e o hidrograma unitário do NRCS para a transformação chuva-vazão. A análise de sensibilidade foi conduzida por meio de Regressão Linear Múltipla e Análise de Variância (ANOVA), considerando variações sistemáticas de $\pm 15\%$ nos seguintes parâmetros de entrada: precipitação incidente, Curve Number (CN), abstração inicial, Peak Rate Factor (PRF), lagtime, volume de espera (curva cota-volume) e capacidade de descarga (curva cota-descarga). Os resultados indicaram que os fatores com maior influência sobre a borda livre foram a magnitude da chuva, o Curve Number e o volume de espera do reservatório. Como o estudo de caso adotado envolve uma barragem com grande volume de espera, o PRF e o lagtime apresentaram baixíssima sensibilidade nos resultados, muito inferior aos resíduos.

Palavras-Chave – Trânsito de cheias; Borda livre; Análise de sensibilidade.

1) Pimenta de Ávila Consultoria; Eng. Civil (UFMG) e M.Sc. Recursos Hídricos (PPG-SMARH / UFMG). gabriel_fonseca_cunha@yahoo.com.br
2) Pimenta de Ávila Consultoria; graduanda em Eng. Civil (UFMG). maymaralves@gmail.com

INTRODUÇÃO

A segurança hidrológica contra o galgamento de barragens depende diretamente da borda livre remanescente no reservatório durante a ocorrência de eventos de cheia extrema. A borda livre é definida como o desnível entre o nível de água máximo atingido na barragem e sua cota de crista. Esse nível de água máximo é a maior cota atingida durante o amortecimento da cheia de projeto e é denominado “nível de água máximo maximorum”. O conhecimento sobre o nível de água máximo maximorum e a borda livre de uma barragem é fundamental para sua operação, e é requisito legal e/ou normativo em diversos contextos para barragens no Brasil.

A estimativa do nível de água (N.A.) máximo maximorum está associada à interação entre o hidrograma afluente, o volume de espera disponível no reservatório e a capacidade de descarga do sistema extravasor. Essa estimativa é obtida por meio de estudo de trânsito de cheias, com modelagem do escoamento não permanente do hidrograma afluente ao reservatório durante o evento de cheia (Tucci, 2002).

Dessa forma, a estimativa da borda livre está sujeita a incertezas paramétricas associadas a todos os dados de entrada, incluindo a modelagem do hidrograma afluente, a caracterização do volume de espera, e a modelagem da capacidade de descarga do sistema extravasor (Refsgaard *et al.*, 2007).

Neste trabalho, apresenta-se uma análise de sensibilidade aplicada ao cálculo de borda livre em estudo de trânsito de cheias de uma barragem em bacia hidrográfica não monitorada. Objetiva-se investigar a variação do resultado para borda livre em função da variação dos parâmetros de entrada dos modelos adotados, e identificar os parâmetros mais sensíveis.

Embora a calibração dos modelos de trânsito de cheias seja fundamental para a obtenção de resultados mais acurados, e seja requerimento legal em contextos específicos, como para barragens de mineração, conforme estabelece a Resolução ANM nº 95/2022 (Agência Nacional de Mineração, 2022), análises de sensibilidade permanecem essenciais na prática da engenharia hidrológica. A identificação dos parâmetros de entrada mais sensíveis e o conhecimento da variabilidade esperada da variável de resposta permitem aos profissionais realizar inferências preliminares sobre o comportamento do sistema, mesmo antes da execução de modelagem. Esse conhecimento contribui para decisões mais bem fundamentadas quanto à elaboração de modelos, definição de cenários de simulação e interpretação crítica dos resultados obtidos.

METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho foi concebida para possibilitar a análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada em estudo de trânsito de cheias desenvolvido conforme fluxo de trabalho comumente utilizado em meio técnico da engenharia hidrológica no Brasil. A aplicação foi realizada em estudo de caso referente a uma barragem de captação de água de um empreendimento de mineração. O fluxo de trabalho em questão compreende as seguintes etapas: 1) definição da precipitação incidente (hietogramas de projeto); 2) modelagem da precipitação efetiva; 3) modelagem de transformação chuva efetiva - vazão; 4) modelagem de trânsito de cheias no reservatório; 5) cálculo da borda livre. Foram desenvolvidas modelagens de trânsito de cheias segundo o fluxo de trabalho descrito, com variação de parâmetros de entrada. Por fim, foi desenvolvida a análise de sensibilidade a partir dos resultados obtidos.

Estudo de Caso

Foi selecionada para o estudo de caso uma barragem de armazenamento de água localizada em uma planta de mineração situada na região Norte do Brasil. Por questões de sigilo de dados, a estrutura não é identificada neste trabalho, e seus dados apresentados estão descaracterizados.

A barragem está inserida em região com predomínio do clima Tropical de Monção (Am), conforme a Classificação Climática de Köppen (Alvares *et al.*, 2013). A sub-bacia que contribui para a barragem possui área de drenagem de 17 km², com cobertura de solo majoritariamente composta por vegetação nativa. O reservatório ocupa cerca de 13% da área da sub-bacia.

A Figura 1 apresenta a curva cota-volume do reservatório, limitada ao volume de espera para o trânsito de cheias (volume compreendido entre a soleira do extravasor e a crista do barramento). A Figura 2 apresenta a curva cota-descarga do vertedouro da barragem. Ambas as curvas são tratadas como parâmetros de entrada para este estudo, e a metodologia adotada para sua elaboração não é objeto deste artigo.

Figura 1 – Curva cota-volume

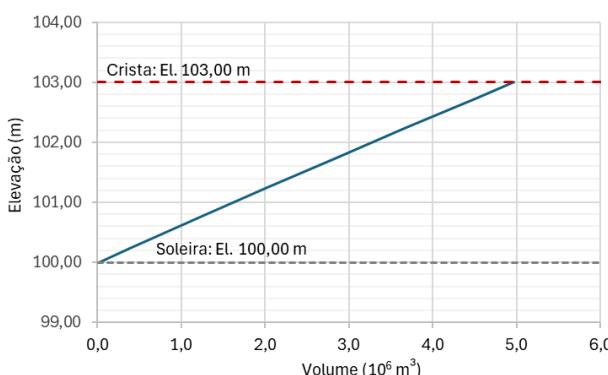
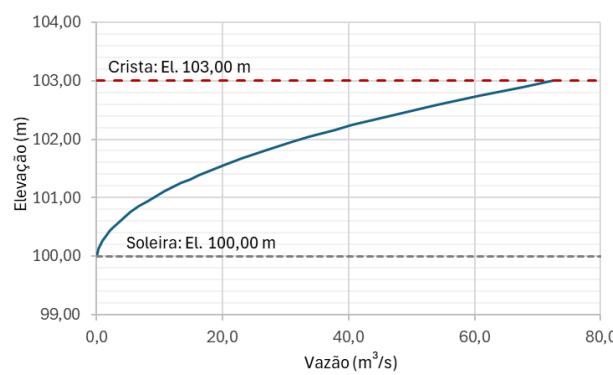


Figura 2 – Curva cota-descarga



Precipitação Incidente

Para a precipitação de projeto, foram adotados quantis de precipitação associados ao tempo de retorno de 1.000 anos, previamente calculados por meio de ajuste estatístico utilizando a distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV), no contexto de um estudo de chuvas intensas para a região. Foram estimados quantis para diferentes durações entre 10 minutos e 20 dias. A metodologia de cálculo desses quantis não é apresentada neste artigo, por não constituir o foco da presente pesquisa. A Tabela 1 apresenta os quantis de precipitação adotados.

Tabela 1 – Quantis de precipitação para diferentes durações de chuva (mm)

10 min	30min	1h	2h	4h	6h	8h	12h	24h	2 dias	3 dias	5 dias	7 dias	10dias	15dias	20dias
64,0	115	138	185	215	233	243	255	271	356	388	479	553	694	894	1020

Foi realizada discretização temporal dos quantis de precipitação conforme método de Huff (1967), com probabilidade acumulada de ocorrência de 50%. Foram adotados hietogramas com distribuição no 1º, 2º, 3º e 4º quartis, em função da duração da chuva:

- **1º quartil:** chuvas com durações de até 6 horas;
- **2º quartil:** chuvas com durações entre 6 e 12 horas;
- **3º quartil:** chuvas com durações entre 12 e 24 horas;
- **4º quartil:** chuvas com durações superiores a 24 horas.

Em todos os casos, foi adotada premissa de distribuição espacial uniforme da precipitação sobre toda a sub-bacia.

Essa metodologia é amplamente adotada no meio técnico da engenharia hidrológica aplicada à mineração no Brasil.

Modelagem de Precipitação Efetiva (Método NRCS-CN)

O método adotado para estimativa da precipitação efetiva foi o Curve Number, desenvolvido pelo Serviço de Conservação de Solos dos Estados Unidos (NRCS). O método NRCS-CN adota a premissa de que não há geração de escoamento até que a precipitação acumulada exceda a abstração inicial. Após esse ponto, há início do escoamento e assume-se que a proporção entre o volume infiltrado e a capacidade total de armazenamento no solo é a mesma proporção entre a precipitação efetiva e a precipitação total (Natural Resources Conservation Service, 2004; Tucci, 2002).

O método requer como dados de entrada o parâmetro CN e a abstração inicial (I_a). O parâmetro CN define a capacidade total de armazenamento no solo (S), enquanto a abstração inicial define a precipitação acumulada máxima sem ocorrência de escoamento superficial. A abstração inicial representa perdas por interceptação, infiltração inicial e armazenamento em depressões superficiais. Por sua difícil estimativa direta, é comum a adoção da hipótese de que I_a é proporcional a S , com constante de proporcionalidade λ (Natural Resources Conservation Service, 2004). As equações (1) e (2) apresentam o cálculo da capacidade total de armazenamento e da abstração inicial

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (1)$$

$$I_a = \lambda S \quad (2)$$

Em que S e I_a são expressos em milímetros, e CN e λ são adimensionais.

É muito comum a adoção de $\lambda = 0,2$, com base em pesquisas para o comportamento médio de bacias hidrográficas nos Estados Unidos (Natural Resources Conservation Service, 2004; Tucci, 2002). Apesar disso, Caletka et al. (2020) apontam que o parâmetro λ deve ser tratado como uma variável dependente das características específicas de cada sub-bacia. Diversos estudos têm proposto valores alternativos, geralmente inferiores a 0,2, como apresentado na revisão de Panigrahi e Ramadas (2025) e na avaliação em múltiplas bacias conduzida por Brandão et al. (2025).

O método NRCS-CN apresenta diversas limitações, principalmente relacionadas à ausência de representatividade física direta e à sua origem empírica, desenvolvida para condições específicas dos Estados Unidos, associados à rigidez para parametrização e as dificuldades para adaptação a condições locais distintas (Bartlett et al., 2016; Caletka et al., 2020; Shi e Wang, 2020). Apesar dessas limitações, o NRCS-CN ainda é o método mais amplamente utilizado para estimativa de precipitação efetiva (Brandão et al., 2025), sendo muito aplicado em contexto de engenharia hidrológica aplicada a estruturas de mineração no Brasil (Pinheiro, 2011).

Hidrograma Afluente ao Reservatório

A transformação da precipitação efetiva em vazão foi realizada com a utilização do Hidrograma Unitário Sintético do NRCS (HU NRCS), método amplamente empregado na engenharia hidrológica. Sua aplicação é particularmente comum em bacias não monitoradas, onde não há disponibilidade de registros observacionais que permitam a elaboração de hidrogramas unitários empíricos específicos (Collischonn e Dornelles, 2013; Natural Resources Conservation Service, 2004; Tucci, 2002).

Hidrogramas unitários sintéticos são representações simplificadas da resposta hidrológica de uma bacia a uma chuva efetiva de curta duração e volume unitário, assumindo uma forma pré-definida para o hidrograma de resposta e comportamento linear da bacia (Tucci, 2002). O hidrograma unitário do NRCS compreende uma família de curvas, cujo formato é controlado por um parâmetro de forma denominado “Peak Rate Factor” (PRF). Esse fator define a magnitude da vazão de pico em relação ao volume total de escoamento, influenciando diretamente a concentração temporal do escoamento próximo ao instante de pico (Natural Resources Conservation Service, 2004).

Além do PRF, o método usa como parâmetro de entrada o *lagtime*, definido como o intervalo de tempo entre o centro de massa do pulso de precipitação e o pico do hidrograma de resposta (Natural Resources Conservation Service, 2004). O *lagtime* é uma característica específica de cada sub-bacia, relacionado às suas propriedades geomorfológicas e de uso e ocupação do solo.

Trânsito de Cheias em Reservatórios

O objetivo da modelagem de trânsito de cheias em um reservatório é a estimativa do nível de água máximo durante a ocorrência de um evento de chuva extrema, que é diferente para diferentes durações da precipitação de projeto. Por isso, conforme indicado por Pinheiro (2011), é prática comum simular diferentes durações de precipitação, todas associadas ao tempo de retorno de projeto. Adota-se então a chamada “duração crítica”, definida como aquela que resulta no maior nível máximo dentre todas as durações de chuva testadas. Dessa forma, o N.A. máximo maximorum é definido como o nível máximo atingido durante a passagem da chuva de projeto com duração crítica, e a borda livre é a diferença de nível entre a crista do reservatório e esse N.A. máximo maximorum. Essa abordagem é comumente utilizada no meio técnico brasileiro, e a adoção da duração crítica para a chuva de projeto é referenciada na ABNT NBR 13.028:2024 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024) e Resolução ANM nº 95/2022 (Agência Nacional de Mineração, 2022).

Para a simulação computacional, foi utilizado o software HEC-HMS versão 4.12 (U.S. Army Corps of Engineers, 2000), desenvolvido pelo US Army Corps of Engineers. O HEC-HMS é um dos softwares mais utilizados para modelagem hidrológica, com capacidades e aplicação discutida por Sahu, Shwetha e Dwarakish (2023) e Odey e Cho (2025). O software permite a definição da precipitação incidente, cálculo da precipitação efetiva com utilização do método NRCS-CN e modelagem do hidrograma afluente com utilização do Hidrograma Unitário do NRCS, conforme descrito nas seções anteriores.

De forma acoplada, o HEC-HMS também permite a modelagem de trânsito de cheias por meio da simulação do escoamento não permanente no interior de reservatórios. Para isso, é utilizado o Método de Puls Modificado, baseado na solução numérica por diferenças finitas da equação da continuidade (Chow, 1694; Henderson, 1966 apud U.S. Army Corps of Engineers, 2000). O método utiliza como dados de entrada a curva cota-volume e cota-descarga do reservatório.

Cenários para Análise de Sensibilidade e Parâmetros Adotados

A pesquisa desenvolvida teve como objetivo avaliar a sensibilidade da borda livre em relação a seus parâmetros de entrada. Conforme o fluxo de trabalho apresentado nos itens anteriores, a modelagem hidrológica integrou diferentes procedimentos e modelos, abrangendo desde a definição da chuva incidente até a simulação do amortecimento da cheia no reservatório.

A análise de sensibilidade foi conduzida a partir da variação sistemática desses parâmetros de entrada. Para cada parâmetro, foram definidos três valores, correspondentes ao valor central originalmente adotado para o estudo de caso, e variações de $\pm 15\%$ em relação a esse valor. Essa abordagem permitiu avaliar a influência dos parâmetros sobre a resposta hidrológica do sistema. Não é objetivo deste trabalho detalhar a metodologia utilizada para a definição dos valores centrais

adotados, uma vez que o foco da pesquisa está na avaliação da sensibilidade dos resultados frente às variações desses parâmetros.

A Tabela 2 apresenta uma síntese dos modelos adotados, seus parâmetros de entrada, e os valores adotados para análise de sensibilidade.

Tabela 2 – Parâmetros de entrada avaliados e faixas de variação utilizadas na análise de sensibilidade

Procedimento / Modelo	Parâmetro	Valores adotados		
		Inferior (-15%)	Central	Superior (+15%)
Chuva incidente	Fator multiplicador (Ver Tabela 3)	0,85	1,0	1,15
NRCS CN	CN (adim.)	60	70	81
	λ (adim.)	0,17	0,20	0,23
Hidr. Unit. NRCS	PRF (adim.)	400	484	550
	Lagtime (min)	77	90	104
Curva cota-volume	Fator multiplicador (Ver Figura 3)	0,85	1,0	1,15
Curva cota-descarga	Fator multiplicador (Ver Figura 4)	0,85	1,0	1,15

Para cada simulação, são avaliadas diferentes durações de chuva, a fim de verificar a duração crítica. Os valores centrais para os quantis de precipitação são os apresentados na Tabela 1. Os valores inferiores e superiores são os expostos na Tabela 1 multiplicados por 0,85 e por 1,15, respectivamente, para todas as durações. O parâmetro de entrada adotado para a análise de sensibilidade é o fator multiplicador dos quantis (0,85 para valor inferior; 1,0 para valor central; e 1,15 para valor superior). A Tabela 3 apresenta os quantis adotados, inferiores, centrais e superiores para todas as durações.

Tabela 3 – Quantis de precipitação adotados na análise de sensibilidade (mm)

Valores	10 min	30min	1h	2h	4h	6h	8h	12h	24h	2 dias	3 dias	5 dias	7 dias	10dias	15dias	20dias
Inferior (-15%)	54,4	97,8	117	157	183	198	207	217	230	303	330	407	470	590	760	867
Central	64,0	115	138	185	215	233	243	255	271	356	388	479	553	694	894	1020
Superior (+15%)	73,6	132	159	213	247	268	280	293	312	409	446	551	636	798	1028	1173

As curvas cota-volume e cota-descarga adotadas como valores centrais para a análise de sensibilidade são as apresentadas na Figura 1 e Figura 2. As curvas adotadas como valores inferiores e superiores são as curvas de valores centrais alteradas por um fator multiplicador global (0,85 para valor inferior; 1,0 para valor central; e 1,15 para valor superior). A Figura 3 apresenta as curvas cota-volume e a Figura 4 apresenta as curvas cota-descarga resultantes adotadas.

Figura 3 – Curvas cota-volume adotadas na análise de sensibilidade

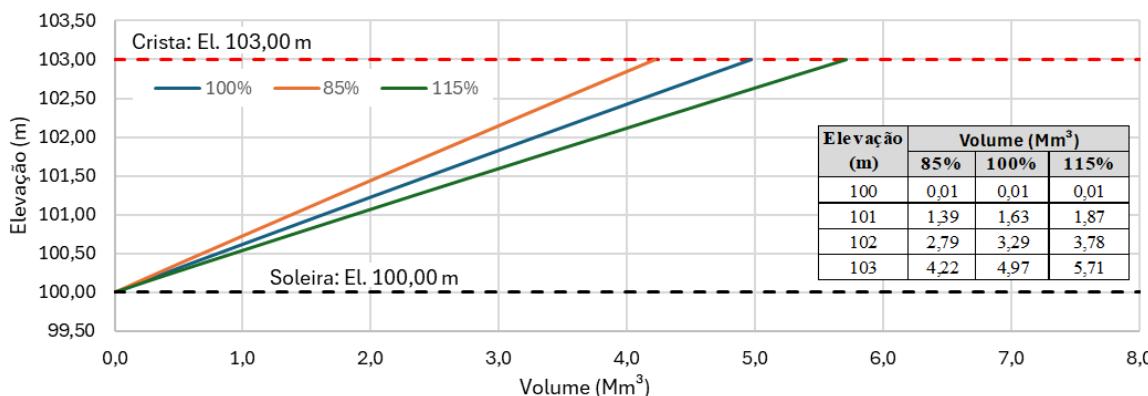
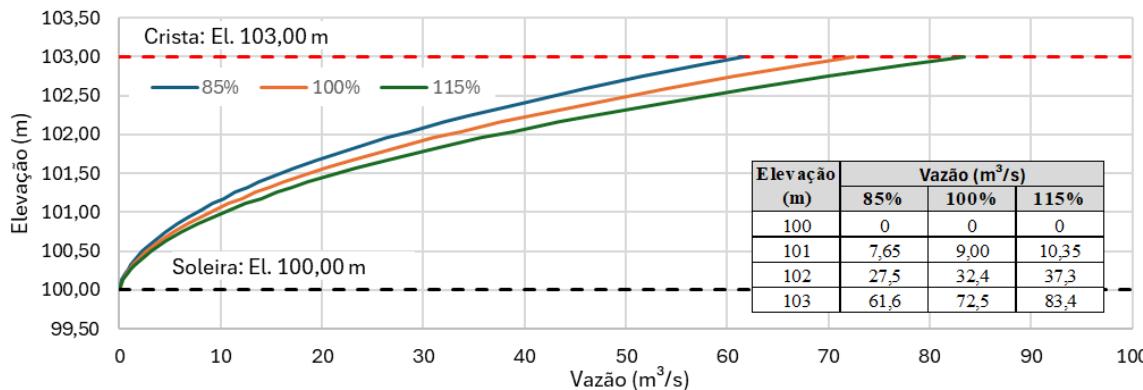


Figura 4 – Curvas cota-descarga adotadas na análise de sensibilidade



Cada um dos parâmetros foi considerado como independente na definição dos cenários, resultando em uma combinação total de 2.187 simulações, calculada pela combinação de três níveis para cada um dos sete parâmetros avaliados.

Análise de Resultados

A partir das modelagens no HEC-HMS, foram extraídos os resultados de interesse e foi construída uma base de dados com um registro para cada cenário de simulação, incluindo todos os parâmetros de entrada adotados e o N.A. máximo maximorum e borda livre obtidos. Com essa base de dados, a análise de sensibilidade da variável borda livre foi conduzida por meio de uma abordagem estatística baseada em regressão linear múltipla, com o objetivo de quantificar a influência individual de cada parâmetro de entrada sobre a resposta hidrológica do sistema.

O modelo foi formulado considerando a borda livre (*BL*) como variável dependente, e como variáveis independentes os seguintes parâmetros: fator multiplicador da chuva (*P*), Curve Number (*CN*), razão entre abstração inicial e capacidade de armazenamento do solo (*λ*), Peak Rate Factor (PRF), lagtime (*l*), fator multiplicador da curva cota-volume (*CV*) e fator multiplicador da curva cota-descarga (*CD*). A equação da regressão linear múltipla desenvolvida está apresentada na equação (3).

$$BL_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot P_i + \beta_2 \cdot CN_i + \beta_3 \cdot \lambda_i + \beta_4 \cdot PRF_i + \beta_5 \cdot l_i + \beta_6 \cdot CV_i + \beta_7 \cdot CD_i + \epsilon_i \quad (3)$$

Em que *BL* é a variável de resposta, β_j são os coeficientes de regressão e ϵ é o erro aleatório.

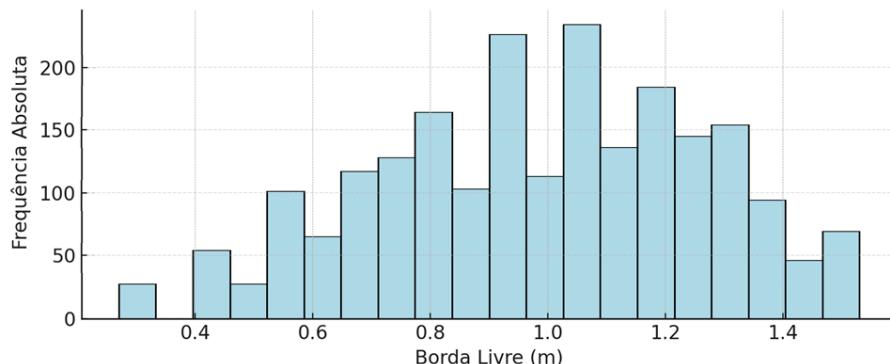
O ajuste do modelo foi feito por meio do método dos mínimos quadrados ordinários (Ordinary Least Squares - OLS), utilizando a função `ols` da biblioteca Python `statsmodels` (Seabold e Perktold, 2010). O ajuste com a função `ols` inclui também a realização de teste de significância individual para cada coeficiente foi realizado com base na estatística t de Student, considerando um teste bicaudal ao nível de significância de 5%.

Após o ajuste, foi desenvolvida análise de variância (ANOVA) do tipo II, com o objetivo de decompor a variância da variável de resposta entre os diferentes fatores explicativos, utilizando a função `anova_lm` da biblioteca `statsmodels`. Para verificação das premissas do modelo estatístico, foi verificada a normalidade e homoscedasticidade dos resíduos. A normalidade foi avaliada por meio do teste de Shapiro-Wilk, implementado pela função `shapiro` da biblioteca `scipy.stats` (Virtanen et al., 2020). A homoscedasticidade foi avaliada por meio do teste de Breusch-Pagan, calculado pela função `het_breuschnagan` da biblioteca `statsmodels`.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi plotado o histograma para os 2.187 resultados de borda livre, apresentado na Figura 5. Obteve-se média de 0,987 m, desvio padrão de 0,281 m e coeficiente de assimetria de -0,24, indicando assimetria à esquerda na distribuição dos resultados, conforme evidenciado no histograma.

Figura 5 – Histograma para resultados de borda livre



O modelo de regressão linear múltipla desenvolvido resultou em coeficiente de determinação (R^2) de 0,984, indicando ótimo ajuste do modelo aos dados. A Tabela 4 apresenta os coeficientes de regressão estimados para cada variável independente, acompanhados de seus respectivos erros padrão, valores-t, p-valores e intervalos de confiança.

Tabela 4 – Coeficientes estimados da regressão linear múltipla para a borda livre

Parâmetro	Coeficiente (β)	Erro padrão	Valor-t	p-valor	Intervalo de Confiança (95%)
Intercepto	2,15	0,0166	129	< 0,001	[2,12 ; 2,18]
Chuva (P)	-1,75	0,0063	-278	< 0,001	[-1,76 ; -1,74]
CN	-0,0137	0,00009	-152	< 0,001	[-0,0139 ; -0,0135]
λ	0,262	0,0315	8,33	< 0,001	[0,200 ; 0,324]
PRF	$-6,51 \times 10^{-5}$	$1,26 \times 10^{-5}$	-5,18	< 0,001	$[-8,97 \times 10^{-5} ; -4,04 \times 10^{-5}]$
lagtime (l)	0,000338	0,000077	4,38	< 0,001	[0,000186 ; 0,000491]
CV	0,908	0,0063	144	< 0,001	[0,896 ; 0,921]
CD	0,595	0,0063	94,5	< 0,001	[0,583 ; 0,607]

Para o número de graus de liberdade disponível ($n-k-1=2179$, sendo $n=2187$ observações e $k=7$ variáveis explicativas), o valor crítico da estatística t de Student é aproximadamente 1,96. Assim, os efeitos de todos os parâmetros de entrada sobre a borda livre foram estatisticamente significativos dentro da amostra analisada.

Destaca-se que os sinais dos coeficientes estão coerentes com o comportamento físico esperado. Foi obtida correlação positiva entre abstração inicial, lagtime, volume de espera (curva cota-volume) e capacidade de descarga (curva cota-descarga) com a borda livre. A correlação é negativa entre a borda livre e a magnitude da chuva, o CN e o Peak Rate Factor.

A decomposição da variância por meio da análise de variância (ANOVA) tipo II permitiu quantificar a contribuição relativa de cada parâmetro para a variabilidade total da borda livre. A Tabela 5 resume os resultados obtidos.

Para o número de graus de liberdade disponível ($n-k-1=2179$, sendo $n=2187$ observações e $k=7$ variáveis explicativas), o valor crítico da distribuição F é aproximadamente 3,84. Considera-se, portanto, que o efeito sobre a variável de resposta para todos os parâmetros é estatisticamente significativo.

Tabela 5 – Análise de variância para a borda livre (BL)

Parâmetro	Variância Explicada	Soma de Quadrados	Estatística F	p-valor
Chuva (P)	58,24%	100,31	77069	< 0,001
CN	17,57%	30,25	23244	< 0,001
λ	0,05%	0,09	69,33	< 0,001
PRF	0,02%	0,03	26,81	< 0,001
lagtime (l)	0,01%	0,02	19,15	< 0,001
CV	15,72%	27,07	20802	< 0,001
CD	6,74%	11,61	8921	< 0,001
Resíduo	1,65%	2,84	–	–

Observa-se que a magnitude da chuva, o CN e o volume de espera (curva cota-volume) foram responsáveis por 91,5% da variância explicada da borda livre, evidenciando a dominância desses parâmetros sobre a resposta hidrológica modelada. É notável a grande importância da magnitude da chuva, que explica sozinha mais da metade da variância dos resultados para borda livre.

O reservatório analisado apresenta grande inércia volumétrica, o que implica em expressivo efeito de amortecimento de cheias. Em função dessa característica, o formato do hidrograma afluente exerce influência relativamente pequena sobre a resposta do sistema, uma vez que as variações de pico e forma são muito atenuadas no reservatório. Por isso, foram obtidos baixos percentuais de variância explicada associados aos parâmetros lagtime e PRF, que influenciam o formato do hidrograma afluente. Além disso, obteve-se durações críticas longas para a precipitação projeto, o que resulta em precipitação total para o evento chuvoso de grande magnitude em relação à abstração inicial. Em consequência, a influência do parâmetro λ sobre a borda livre é pequena.

Os testes aplicados aos resíduos da regressão indicaram violação da premissa de normalidade no teste de Shapiro-Wilk e violação da premissa de homocedasticidade no teste de Breusch-Pagan. Como consequência, embora o modelo apresente elevado coeficiente de determinação e todos os parâmetros tenham se mostrado estatisticamente significativos, os resultados devem ser interpretados com cautela, reconhecendo-se que a presença dessas não conformidades pode limitar a validade inferencial dos coeficientes e das medidas de sensibilidade obtidas.

CONCLUSÃO

Este estudo apresentou uma análise de sensibilidade aplicada aos resultados para borda livre de uma barragem de água em estudo de trânsito de cheias, considerando variações sistemáticas nos parâmetros de entrada dos modelos hidrológicos utilizados. Os resultados demonstraram que a magnitude da precipitação foi o fator mais influente na borda livre. O CN e o volume de espera do reservatório também apresentaram importante influência no resultado. O lagtime e o PRF apresentaram baixíssima sensibilidade nos resultados, muito inferior aos resíduos. A elevada inércia volumétrica do reservatório avaliado é fator determinante para os resultados obtidos, que não devem ser generalizados para reservatórios com baixa inércia volumétrica.

Os resultados obtidos fornecem subsídios para a realização de inferências preliminares sobre o comportamento hidrológico da borda livre em estudos de trânsito de cheias para barragens com elevado volume de espera, mesmo antes da execução de modelagens detalhadas. Esse conhecimento contribui para decisões mais bem fundamentadas quanto à elaboração de modelos, definição de cenários de simulação e interpretação crítica dos resultados obtidos. Conclui-se que especial atenção deve ser dada à definição dos quantis de precipitação em estudos de trânsito de cheias, considerando sua sensibilidade muito superior à dos demais parâmetros avaliados.

Por fim, cabe ressaltar que os testes aplicados aos resíduos indicaram violação das premissas de normalidade e homocedasticidade. É necessário, portanto, cautela na interpretação dos resultados. Como recomendação para estudos futuros, indica-se o desenvolvimento de análises de sensibilidade similares às propostas nesse trabalho com utilização de outros modelos hidrológicos para cálculo de precipitação efetiva, e com estudos de caso para barragens de menor inércia volumétrica. Cabe também fazer análises semelhantes para as vazões de pico afluente e efluente ao reservatório.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Resolução ANM no 95BrasíliaDiário Oficial da União, Seção 1, 07/02/2022, p. 49, , 2022. . Acesso em: 11 jan. 2024
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13028: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reserva de água - Requisitos, 2024.
- BARTLETT, M. S. *et al.* Beyond the SCS-CN method: A theoretical framework for spatially lumped rainfall-runoff response. Water Resources Research, v. 52, n. 6, p. 4608–4627, 18 jun. 2016.
- BRANDÃO, A. R. A. *et al.* Toward a better understanding of curve number and initial abstraction ratio values from a large sample of watersheds perspective. Journal of Hydrology, v. 655, p. 132941, jul. 2025.
- CALETKA, M. *et al.* Improvement of SCS-CN Initial Abstraction Coefficient in the Czech Republic: A Study of Five Catchments. Water, v. 12, n. 7, p. 1964, 10 jul. 2020.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais. Porto Alegre: ABRH, 2013.
- HUFF, F. A. Time distribution of rainfall in heavy storms. Water Resources Research, v. 3, n. 4, p. 1007–1019, 9 dez. 1967.
- NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. Chapter 10: Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. *Em:* Part 630 – Hydrology: National Engineering Handbook. Washington, DC: USDA-NRCS, 2004. .
- ODEY, G.; CHO, Y. Event-Based vs. Continuous Hydrological Modeling with HEC-HMS: A Review of Use Cases, Methodologies, and Performance Metrics. Hydrology, v. 12, n. 2, p. 39, 17 fev. 2025.
- PANIGRAHI, A.; RAMADAS, M. Revisiting the Curve Number Approach for Improving Surface Runoff Estimation: A State-of-the-Art Review. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 151, n. 4, ago. 2025.
- PINHEIRO, M. C. Diretrizes para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamentos Hidráulicos em Obras de Mineração. [s.l.] ABRH, 2011.
- REFSGAARD, J. C. *et al.* Uncertainty in the environmental modelling process – A framework and guidance. Environmental Modelling & Software, v. 22, n. 11, p. 1543–1556, nov. 2007.
- SAHU, M. K.; SHWETHA, H. R.; DWARAKISH, G. S. State-of-the-art hydrological models and application of the HEC-HMS model: a review. Modeling Earth Systems and Environment, v. 9, n. 3, p. 3029–3051, 2 set. 2023.
- SEABOLD, S.; PERKTOLD, J. Statsmodels: Econometric and Statistical Modeling with Python2010
- SHI, W.; WANG, N. An Improved SCS-CN Method Incorporating Slope, Soil Moisture, and Storm Duration Factors for Runoff Prediction. Water, v. 12, n. 5, p. 1335, 8 maio 2020.
- TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 2a Edição ed. Porto Alegre: UFRGS, 2002.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC-HMSDavis, CA, 2000.
- VIRTANEN, P. *et al.* SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. Nature Methods, v. 17, n. 3, p. 261–272, 2 mar. 2020.