

## XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### **Modelo simplificado de atenuação de ondas de cheia**

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

**Abstract:** A simple analytical model was developed for evaluating the attenuation of flood wave peak discharge. The physically-based model represents the flood wave along its trajectory, based on the diffusive model. In the proposed flood attenuation model, relative peak discharge decreases along the downstream distance according to a power function. The distance is scaled by the attenuation factor related to river hydrodynamics (flow rating, hydraulic diffusivity, celerity, and floodplain storage) and input hydrograph (initial peak discharge, hydrograph volume, and its relative curvature). Sensitivity analyses indicate that initial peak discharge, volume, floodplain storage, and river slope are the governing factors of attenuation. The model validity and accuracy were demonstrated by reproducing data from (i) numerical solutions of the Saint-Venant equations covering a wide range of conditions, (ii) 29 observations from 11 historical dam breaks, and (iii) a detailed hydrodynamic model (see ii and iii in Lima and Paiva, 2023a). The model errors were generally lower than 10% and not larger than the typical uncertainty of flood observations. The accuracy is higher than simplified empirical models and analogous to a detailed hydrodynamic model that is representative of current practice. The proposed flood attenuation model can be easily applied using a few common parameters and a simple equation in a basic spreadsheet. It is suitable for practical applications such as first assessments of natural and dam-break floods, engineering design, and analyses of large river networks supported by remote sensing data.

**Resumo:** Desenvolveu-se um modelo analítico simples e de base física para estimar a atenuação da vazão de pico de cheias. A onda de cheia ao longo de sua trajetória é representada pelo modelo de onda difusiva. Conforme o modelo, a vazão de pico diminui com a distância a jusante com uma função potencial. O papel da distância é proporcional ao fator de atenuação definido pela hidrodinâmica (curva chave, difusividade hidráulica, celeridade e armazenamento na planície de inundação) e hidrograma de entrada (vazão de pico inicial, volume e curvatura relativa). Análises de sensibilidade demonstram que a vazão de pico inicial, volume, armazenamento na planície e declividade do rio são os fatores governantes da atenuação. A validade e acurácia do modelo foi demonstrada ao reproduzir soluções numéricas das equações de Saint-Venant para diversas condições de escoamento, além de observações de 11 rompimentos de barragens históricas, e resultados de um modelo hidrodinâmico detalhado (ver Lima e Paiva, 2023a). Os erros são em geral menores que 10% e que a incerteza típica de observações de vazões de cheias. A acurácia é maior que a de modelos empíricos simplificados e análoga a de modelos hidrodinâmicos detalhados normalmente utilizados em aplicações práticas. O modelo pode ser facilmente aplicado utilizando alguns parâmetros comuns e uma equação simples em planilha eletrônica básica. O novo método é apropriado para aplicações práticas como avaliações preliminares de cheias naturais e de rompimentos de barragens, dimensionamentos em engenharia, e análises em grandes redes de drenagem com apoio de sensoriamento remoto.

**Palavras-Chave** – Onda de cheia; Atenuação da vazão de pico; Modelo analítico de base física.

1) 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)

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

## INTRODUÇÃO

Inundações são o desastre natural mais frequente e danoso (Bloschl, 2022). Podem ser causadas por processos naturais como precipitações intensas, ou pela falha de estruturas hidráulicas como barragens (Merz et al., 2021; ICOLD 2022). Por outro lado, as cheias são o principal forçante de processos ecológicos de ecossistemas aquáticos como em rios e planícies de inundação. As cheias causam a elevação das vazões e níveis d'água nos rios, podendo atingir altos níveis, inundando áreas urbanas e rurais e causando danos a infraestrutura e a vidas humanas (Bloschl, 2022). Uma questão fundamental é como as cheias evoluem em termos de sua velocidade de propagação, forma, volume, e especialmente a magnitude em termos de valores máximos de vazão e elevação d'água (Chow et al., 1988; Ponce, 2014; Dingman, 2009). Embora as cheias possam se alterar devido a mudanças climáticas e do uso do solo, os processos de interação entre rio e planície de inundação e intervenções hidráulicas podem alterar significativamente as ondas de cheias (Bloschl, 2022; Brunner et al., 2021; Merz et al., 2021; Wong & Laurenson, 1983). Compreender esses processos é fundamental para estimar e gerenciar riscos associados a cheias naturais e causadas por rompimentos de barragens, para projetos de engenharia, operação de reservatórios e análises ambientais.

Ondas de cheia foram amplamente investigadas por décadas. Documentações passadas incluem o trabalho de Saint Venant em 1871 definindo as leis fundamentais de conservação de massa e quantidade de movimento, observações e definição da celeridade da onda de cheia de Seddon em 1900, sua difusão e atenuação por Hayami em 1951, e seu caráter cinemático definido por Lighthill e Whitham em 1955.

Dada a complexidade deste fenômeno natural e equações governantes, a área avançou com foco nos métodos numérico-computacionais para resolver as equações fundamentais do escoamento. Ondas de cheia podem ser simuladas por métodos simplificados e limitados como Muskingum e Muskingum-Cunge-Dooge (Koussis, 2009) que são introduzidos em inúmeros livros texto de hidrologia e utilizados em modelos hidrológicos distribuídos. Grandes esforços foram direcionados em hidráulica computacional desde a década de 50 (Cunge e Hager, 2015) e os modelos hidrodinâmicos atuais são capazes de resolver as equações completas de 1D Saint-Venant e 2D de águas rasas, fornecendo representação detalhada de cheias nas escalas local (USACE, 2020), regional/continental (Siqueira et al., 2018) e global. Entretanto, estes métodos podem apresentar erros numéricos não desprezíveis, sendo necessário conhecimento especializado além de dados de entrada e custos computacionais que podem limitar a sua aplicação em grande escala e para múltiplos cenários.

Por outro lado, soluções analíticas diretas de modelos de base física podem fornecer maior compreensão sobre os fatores governantes da atenuação de ondas de cheia e aproximações de primeira ordem para prática de engenharia. Também permitiriam análises robustas sobre mapas de extensas redes de drenagem nacionais e globais (BHO ANA, Hydrosheds) com informação de sensoriamento remoto, como do satélite SWOT que foi recentemente lançado.

Estudos passados propuseram soluções analíticas, semi-analíticas e empíricas para as leis fundamentais que descrevem as ondas de cheia, incluindo perfis de linha d'água simplificados de rompimentos de barragem, o hidrograma unitário das ondas dinâmica e difusiva acoplado ao procedimento de convolução numérica, ábacos adimensionais de soluções de onda de cheia de rompimento de barragem (Simplified Dam Break), e modelos empíricos para atenuação baseado apenas na distância.

Apesar dos esforços passados, ainda não havia se desenvolvido um modelo geral facilmente aplicável com uma equação simples e acurada, significativa e com parâmetros comuns, para responder à uma das questões mais fundamentais da hidrologia: Como ondas de cheia atenuam?

Este artigo apresenta um modelo analítico simples e de base física para a atenuação do pico de vazão de ondas de cheia. São apresentados o desenvolvimento do modelo e interpretações sobre os fatores governantes da atenuação de ondas de cheia. A validade e acurácia do modelo são avaliadas por meio de comparações com simulações numéricas de onda de cheia em uma ampla faixa de características de rios e condições de escoamento. Além disso, a utilidade e viabilidade do modelo em aplicações práticas também são analisadas e discutidas.

## MODELO DE ATENUAÇÃO DE ONDAS DE CHEIA

O resumo do modelo e principais equações são apresentadas na Figura 1 e discutidas abaixo. Maiores detalhes sobre o modelo são documentados em Paiva e Lima (2023).

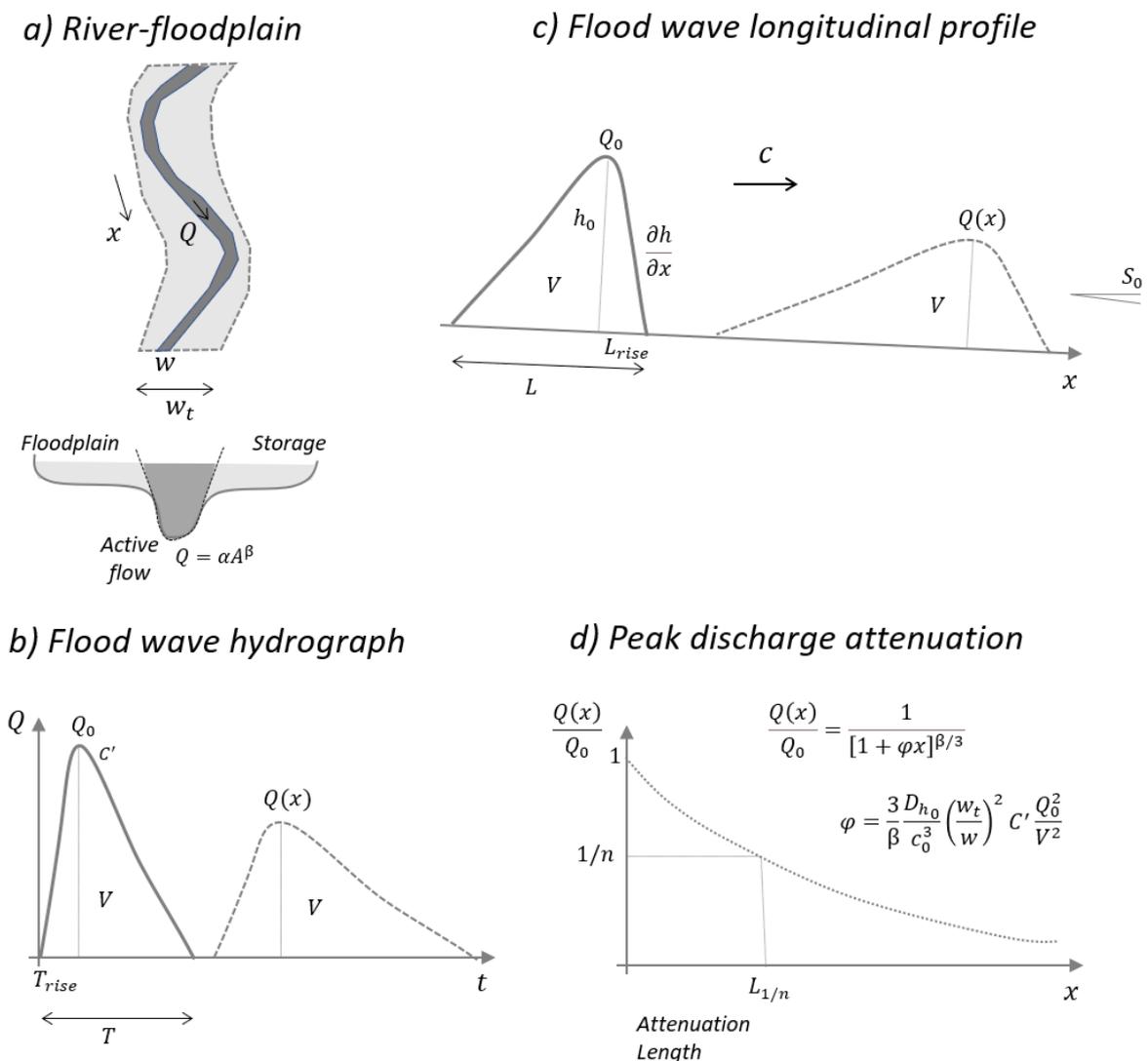


Figura 1. Representação da onda de cheia pelo modelo de atenuação da onda de cheia: a) Seção transversal ativa do rio com curva de descarga de parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  e armazenamento na planície de inundação como a razão entre a largura da planície e do rio  $\left(\frac{w_t}{w}\right)$ ; b) Hidrogramas de vazão a montante e jusante volume  $V$ , formato, e curvatura relativa  $C'$  no pico

constantes; c) Perfil longitudinal de vazões mostrando a onda de cheia se deslocando com celeridade  $c$  e difusividade hidráulica  $D_h$ ; d) O modelo de atenuação prevendo a redução da vazão de pico ao longo da distância  $x$  de  $Q_0$  para  $Q(x)$  em função do fator de atenuação  $\varphi$ .

O modelo de atenuação de ondas de cheia (Figura 1) foi desenvolvido para estimar a atenuação do pico de vazão da onda de cheia. O modelo é baseado em (i) princípios físicos e (ii) pode ser facilmente aplicado com uma equação simples (Figura 1d) e (iii) alguns parâmetros normalmente disponíveis relacionados as características do rio e hidrograma de entrada. O modelo representa (iv) a onda de cheia ao longo de sua trajetória (Figura 1c) com base no modelo de onda difusiva com efeitos inerciais. O modelo (v) considera que o perfil do hidrograma e da onda possuem formato e volume constantes (Figuras 1b e 1c), uma (vi) curva de descarga genérica, (vii) armazenamento na planície de inundação, (viii) efeitos de curva de descarga em laço e (ix) celeridade e difusividade hidráulicas variáveis.

O modelo de onda difusiva é uma simplificação das equações de Saint-Venant que representa a maioria dos escoamentos não permanentes e gradualmente variados, sendo descrito em diversas publicações (e.g., Dingman, 2009; Ponce, 2014). Ele prevê a propagação de vazões  $Q$  da onda de cheia ao longo do canal do rio  $x$  no tempo  $t$ :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = D_h \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (1)$$

O modelo considera a translação da onda de cheia com a velocidade chamada de celeridade cinemática  $c$  e sua difusão em função da curvatura do perfil longitudinal de vazões  $\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}$ . Esta curvatura é aproximada em função da vazão de pico e volume do hidrograma por  $-\frac{C' Q_p^3}{c v^2}$ , sendo  $C'$  a curvatura relativa do hidrograma, i.e. pico e volume unitários. Por exemplo,  $C' = 2\pi$  para uma curva gaussiana e  $C' \approx 5.78s^{-0.33}$  para o hidrograma sintético de NERC, onde o parâmetro de assimetria  $s$  é 1 para curva simétrica e se aproxima de zero para picos mais rápidos em relação ao tempo de base.

A difusividade hidráulica é causada por forças gravitacionais, de atrito e pressão, e incluindo efeitos inerciais é definida como:

$$D_h = \frac{Q}{2wS} (1 - v^2) \quad (2)$$

onde  $w$  é a largura superficial do rio, e  $S$  é a declividade de atrito, normalmente aproximada pela declividade da linha d'água. O número de Vedernikov  $v = (c - U)/c_d$  é a razão entre a celeridade cinemática relativa  $c - U$  e a celeridade dinâmica  $c_d = (gh)^{0.5}$ , sendo  $h$  a profundidade hidráulica e  $U = Q/A$  a velocidade do escoamento.

A celeridade cinemática  $c$  é dada pela razão entre a variação da vazão em relação ao armazenamento  $c = \frac{\partial Q}{\partial A}$ . A aproximação mais comum é o escoamento turbulento de água em rios naturais com grande largura usando a equação de Manning–Strickler:

$$c = \frac{5 Q^{0.4} S^{0.3}}{3 n^{0.6} w^{0.4}}, \quad h = \left( \frac{Qn}{wS^{0.5}} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (3)$$

Diversos estudos observaram como a celeridade é reduzida em rios com grandes planícies de inundação devido a efeitos de armazenamento (e.g. Wong e Laurenson, 1983). O parâmetro de armazenamento na planície de inundação é definido como a razão  $w_t/w$ , sendo  $w$  a largura da seção ativa de escoamento e a largura total do rio e planície  $w_t$  (Figura 1a). O armazenamento na planície reduz a celeridade e difusividade hidráulica pelo fator  $w_t/w$  que representa o tamanho relativo da área de armazenamento rio-planície em relação a área ativa de escoamento.

Em alguns casos, ondas dinâmicas com variações grandes e/ou rápidas nos níveis d'água em rios de baixa declividade ( $<1$  m/km) podem gerar curvas chave em laço. A declividade da linha d'água que normalmente é aproximada pela do terreno é impactada por variações na profundidade d'água  $S_0 + \frac{\partial h}{\partial x}$  (Figura 1c). Neste caso, a celeridade a frente da onda de cheia pode ser corrigida iterativamente por  $c^* = c \left( 1 + \frac{h_0}{c^* T_{rise} S_0} \right)^{0.5}$  onde  $T_{rise}$  é o tempo de ascensão do hidrograma.

Considerando as premissas acima, o modelo de onda difusiva pode ser escrito para a vazão de pico ao longo da trajetória da onda de cheia aplicando o conceito de derivada substancial  $\frac{DQ}{Dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x}$  nos termos da esquerda e resolvido analiticamente via integração em relação a  $x$ . Neste caso, a vazão de pico relativa  $\frac{Q(x)}{Q_0}$  ao longo da distância  $x$  é dada por:

$$\frac{Q(x)}{Q_0} = \frac{1}{[1 + \varphi x]^{\beta/3}} \quad (4)$$

Esta equação descreve a vazão de pico diminuindo ao longo da distância  $x$  conforme uma função potencial (Figura 1d), com expoente relacionado a curva chave  $\beta$  (Figura 1a) e distância multiplicada por  $\varphi$ , definido como fator de atenuação. Valores altos de  $\beta$  e  $\varphi$  causam maiores atenuações.

O fator de atenuação  $\varphi$  [ $L^{-1}$ ] é definido como:

$$\varphi = \frac{3 D_{h_0}}{\beta c_0^3} \left( \frac{w_t}{w} \right)^2 C' \frac{Q_0^2}{V^2} \quad (5)$$

A análise dos expoentes destes parâmetros indica que a atenuação aumenta principalmente com o maior armazenamento na planície de inundação  $\left( \frac{w_t}{w} \right)$  e vazão de pico inicial  $Q_0$ , seguido da difusividade hidráulica  $D_{h_0}$  e a curvatura relativa do hidrograma  $C'$ . E diminui principalmente para maiores celeridades  $c_0$  e volume do hidrograma  $V$ .

No caso de rios naturais ( $\beta = 5/3$ ), o fator de atenuação por ser expresso em função de parâmetros geométricos como:

$$\varphi = 0.1944 \frac{n^{1.8} w^{0.2} (1 - v^2)}{S^{1.9}} \left( \frac{w_t}{w} \right)^2 C' \frac{Q_0^{1.8}}{V^2} \quad (6)$$

onde o armazenamento na planície tem maior influência em relação a largura do canal ativo do rio  $w$  em aumentar a atenuação, seguido de aumentos no coeficiente de rugosidade de Manning  $n$  e menores declividades do rio  $S$ .

A primeira parte da expressão de  $\varphi$  (e.g.,  $\frac{3}{\beta} \frac{Dh_0}{c_0^3} \left(\frac{wt}{w}\right)^2$ ) representa as características hidrodinâmicas do escoamento, onde maior armazenamento na planície, difusividade e menor celeridade aumentam a atenuação. A segunda parte descreve o hidrograma de entrada ( $C' \frac{Q_0^2}{V^2}$ ), demonstrando que maior vazão de pico inicial, pequeno volume e maior curvatura relativa aumentam a atenuação.

O modelo de atenuação de ondas de cheia pode ser interpretado usando um indicador prático que informa a distância necessária para atenuar um hidrograma. O comprimento de atenuação  $L_{1/n}$  é definido como a distância ao longo da trajetória da onda de cheia em que a vazão de pico decresce a um fator  $1/n$ . Por exemplo, para rios naturais esta distância em km necessária para a vazão de pico reduzir à metade do valor inicial é

$$L_{1/2} = \frac{0.00248}{\varphi} \quad (7)$$

## ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E VALIDAÇÃO VERSUS MODELAGEM NUMÉRICA

O modelo de atenuação de ondas de cheia foi aplicado em 18 cenários distintos, cobrindo uma ampla gama de características de rios e condições comumente encontradas na natureza. Essa avaliação representa uma análise de sensibilidade dos fatores determinantes na atenuação do pico da cheia, bem como a validação do modelo. Por último, os resultados obtidos com o modelo foram confrontados com simulações numéricas resolvendo as equações completas de Saint-Venant.

### Métodos

Os cenários foram construídos a partir de um cenário referência (Ref), e cada um dos parâmetros de entrada do modelo foi reduzido e aumentado (indicado pelos símbolos '-' e '+', respectivamente) em um intervalo razoável. O cenário de referência (Ref) consiste em um rio de tamanho médio com largura  $w = 50 \text{ m}$ . Moody & Troutman (2002) estimaram que as larguras dos rios em todo o mundo variam cerca de 3x para uma mesma vazão, então foi assumido  $w- = 15 \text{ m}$  e  $w+ = 150 \text{ m}$ . De acordo com as mesmas estimativas, a vazão de cheia para um rio com largura de 50 m é de aproximadamente  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ . As curvas de crescimento de análises regionais de frequência de cheias (Smith et al., 2015) mostram que as vazões máximas para períodos de retorno de 10, 100 e 1.000 anos são aproximadamente 2x, 1,5-6x e 1,5-30x maiores do que a vazão de cheia média anual, respectivamente. Foram avaliadas as vazões de pico de cheia que são representativas de uma grande cheia ( $\sim 100$  anos,  $Q_0 = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ ), uma cheia extrema ( $> 1.000$  anos ou rompimento de barragem,  $Q_0+ = 5.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e uma inundação moderada ( $\sim 10$  anos,  $Q_0- = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ ). O volume do hidrograma foi selecionado assumindo tempos de base representativos de casos rápidos (2h e  $V- = 0,9 \text{ hm}^3$ ), moderados (12h,  $V = 5,4 \text{ hm}^3$ ) e lentos (1 semana,  $V- = 75,6 \text{ hm}^3$ ). Também foi avaliada a variação tanto da vazão de pico inicial quanto do volume, mas mantendo o tempo de base constante ( $Q_0 - V -$  e  $Q_0 + V +$ ). A declividade do rio foi assumida como  $S = 1 \text{ m/km}$  para declividades moderadas,  $S- = 10 \text{ cm/km}$  para declividades baixas e  $S+ = 50 \text{ m/km}$  para rios íngremes, o que está de acordo com as amplitudes mostradas por Frasson et al., (2019) para rios globais. O armazenamento da planície de inundação foi  $\left(\frac{wt}{w}\right) = 3$  para rios médios (Ref),  $\left(\frac{wt}{w}\right)- = 1$  para rios sem planícies de inundação e  $\left(\frac{wt}{w}\right)+ = 10$  para rios dominados por planície de inundação (semelhante ao Rio Amazonas). O coeficiente de Manning também pode variar, exibindo  $n = 0,035$  para rios naturais,  $n- = 0,015$  para canais construídos e  $n+ = 0,08$

para rios com alta rugosidade. O cenário de referência assumiu um hidrograma assimétrico com  $s = 0,4$  como uma aproximação de casos naturais, e um hidrograma com ascensão abrupta ( $s = 0,1$ ) e simétrico ( $s = 1$ ) também foi avaliado. O modelo foi aplicado assumindo um rio natural de seção transversal retangular. A curvatura relativa foi modelada como  $C' = 3\pi s^{-0,5}$  e  $C' = 5,78s^{-0,33}$  em um cenário adicional. Todos os cálculos foram desenvolvidos em planilha eletrônica (disponível nos anexos de Paiva e Lima, 2023)

Os cenários selecionados incluem uma ampla diversidade de características do escoamento e ondas de cheia. As celeridades variaram de 0,4 a 8 m<sup>3</sup>/s, de acordo com o encontrado na literatura (e.g. Wong e Laurenson, 1983). O número de Froude variou de 0,1 a 0,7, representando os escoamentos subcríticos normalmente encontrados em rios naturais. Os tipos de onda de cheia incluem a cinemática, difusiva e dinâmica. Os comprimentos de atenuação variaram de alguns até milhares de quilômetros.

No processo de simulação numérica, utilizou-se o *software* HEC-RAS 1D (USACE, 2020) com esquema de volume finito de Preissmann ( $\theta=1$ ), onde as seções transversais foram discretizadas em intervalos de 1 cm de altura. Para as áreas de várzea, foram considerados altos valores de coeficiente de Manning. As condições de contorno a montante foram definidas como hidrogramas triangulares e a profundidade normal foi estabelecida no limite de jusante. Com o objetivo de evitar instabilidades numéricas relacionadas ao leito seco, adotou-se uma vazão de base igual a 10% do pico da cheia. O comprimento do canal de 200 km foi discretizado a cada 100 m, com um número de Courant menor que 0,7 para evitar instabilidades numéricas. Em todos os casos, os erros de volume foram inferiores a 0,0028%.

## Resultados

A análise de sensibilidade (Figura ) demonstra que a atenuação do pico da vazão com a distância  $x$  é governada principalmente pela vazão inicial, volume do hidrograma, armazenamento na planície de inundação e declividade do rio. A vazão de pico relativa  $Q(x)/Q_0$  variou de menos de 0,2 a 1 onde  $Q(x)/Q_0$  é 0,5 para o cenário de referência. Por outro lado, a largura do rio apresentou menor influência sobre a atenuação, impactando  $Q(x)/Q_0$  em cerca de 0,1.

As previsões obtidas para o modelo de atenuação são semelhantes aos resultados obtidos através das simulações numéricas usando o modelo HEC-RAS 1D. As diferenças na vazão de pico relativa  $Q(x)/Q_0$  são geralmente menores que 0,1, portanto, muito menores que sua variabilidade ao longo da distância  $x$ . Além disso, essas diferenças são menores que erros típicos em observações de vazão de cheias (de 5% a mais de 40%).

A análise de sensibilidade revelou que o modelo é sensível à vazão de pico inicial quando o volume do hidrograma é constante e o período é variável, aumentando a atenuação (Figura 2a). No entanto, a sensibilidade é significativamente menor quando a vazão de pico inicial muda com o período constante e o volume variável (Figura 2b), e o resultado é oposto quando a celeridade aumenta com a vazão, reduzindo a atenuação. O aumento do volume e período do hidrograma têm impacto considerável na diminuição da atenuação da vazão de pico de cheia (Figura 2c). A largura do rio (Figura 2d) tem um efeito menor na atenuação em comparação com o tamanho relativo do armazenamento de planície (Figura 2e), que aumenta a atenuação. A atenuação do pico de cheia é largamente influenciada pela declividade do rio (Figura 2f), uma vez que esta governa a celeridade das ondas de cheia e a difusividade hidráulica. Baixas declividades do rio diminuem a celeridade e aumentam a difusividade hidráulica, aumentando assim a atenuação. No cenário S+, diferenças foram observadas em distâncias maiores. A maior atenuação da simulação numérica foi causada por um acentuado aumento da inclinação do hidrograma, muitas vezes referido como choque cinemático, que não é comumente encontrado na natureza. O aumento do coeficiente de rugosidade de Manning aumentou a atenuação (Figura 2g), enquanto a forma do hidrograma apresentou efeitos menores (Figura 2h). As diferenças entre as simulações HEC-RAS usando um hidrograma triangular e um hidrograma NERC mais suave foram pequenas.

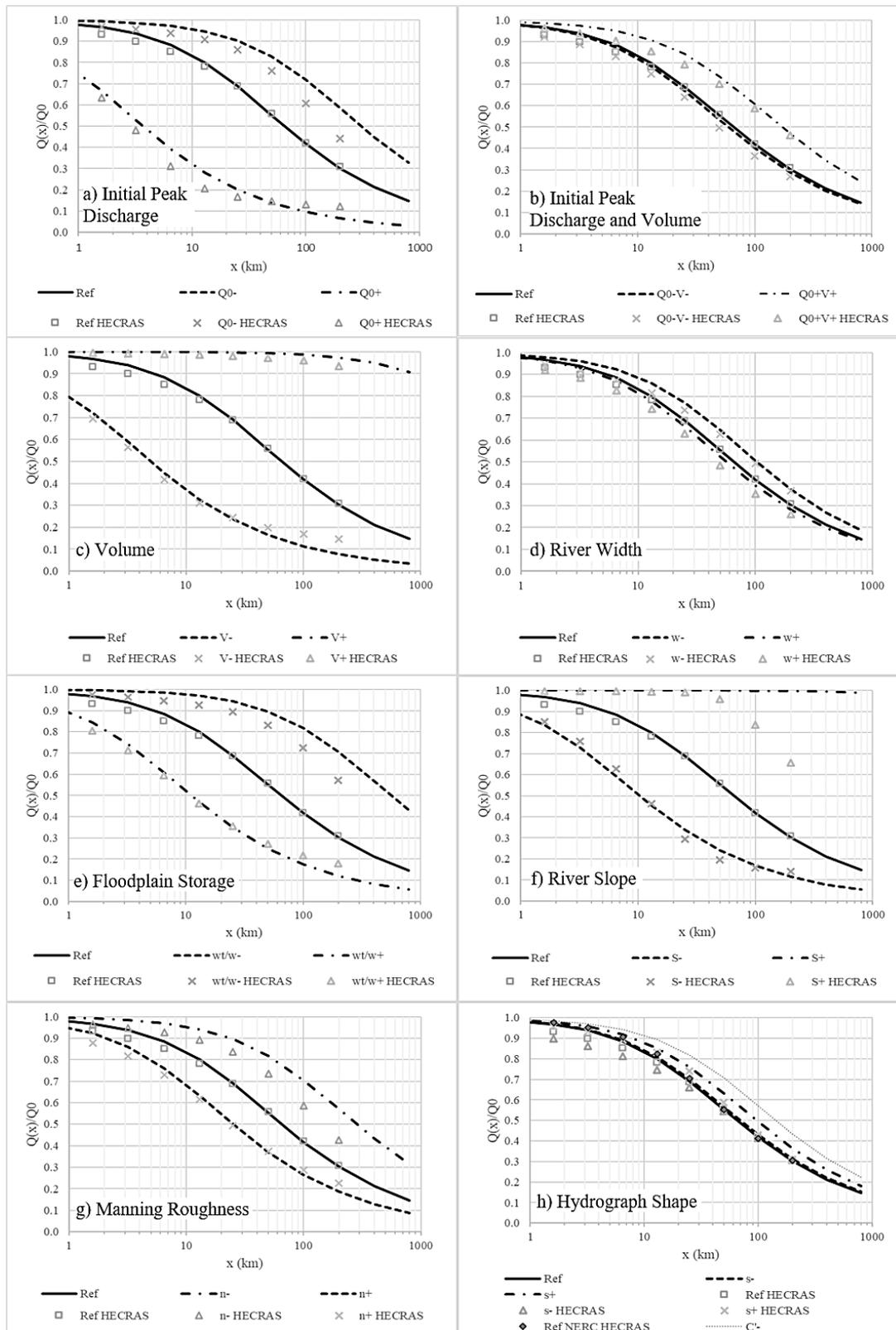


Figura 2 - Análises de sensibilidade e validação do modelo de atenuação de inundações (linhas) versus solução numérica das eqs. de Saint-Venant do modelo hidrodinâmico HEC-RAS (marcadores). Vazão de pico relativa  $Q(x)/Q_0$  ao longo da trajetória da onda de cheia  $x$  para o cenário de referência e (a) variando a vazão de pico inicial mantendo o volume constante, (b) variando a vazão de pico inicial mantendo o tempo de base constante, variando (c) o volume do hidrograma, (d) a largura do rio, (e) o armazenamento da planície de inundação, (f) a declividade do rio, (g) o coeficiente de rugosidade e (g) a forma do hidrograma em termos de assimetria e estimativa de curvatura relativa.

## CONCLUSÕES

Inundações são o desastre natural mais comum e danoso, e ondas de cheia vem sendo estudadas a décadas. Prever como a onda de cheia atenua à medida que se propaga a jusante é fundamental para compreender os riscos associados a cheias naturais e causas por rompimento de barragens, para projetos de engenharia, operação de reservatórios e análises ambientais. As ferramentas atuais de previsão envolvem o uso de simulações computacionais avançadas, não havendo um modelo simples e popular para a atenuação de vazões de pico de cheias. Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo analítico simples de base física para prever a atenuação da vazão de pico de ondas de cheia.

O modelo de atenuação de ondas de cheia representa a onda de cheia se deslocando no rio para jusante, com base no modelo de onda difusiva com efeitos inerciais, e assumindo que o volume e formato da onda e hidrograma são constantes. São considerados celeridade e difusividade variáveis, uma curva de descarga genérica (podendo ser aplicado a diferentes geometrias e fluídos), efeitos de armazenamento na planície de inundação e curva chave em laço.

De acordo com o modelo, a vazão de pico relativa diminui ao longo da trajetória da onda de cheia conforme uma função potencial  $\frac{Q(x)}{Q_0} = \frac{1}{[1+\varphi x]^{\beta/3}}$ , com expoente relacionado a curva de descarga  $\beta$ , e à distância  $x$  é aplicado o fator de escala equalizada definido como fator de atenuação  $\varphi = \frac{3}{\beta} \frac{D_{h_0}}{c_0^3} \left(\frac{w_t}{w}\right)^2 C' \frac{Q_0^2}{V^2}$ . Os parâmetros são relacionados a características hidrodinâmicas do rio e escoamento, como difusividade hidráulica  $D_{h_0}$ , celeridade cinemática  $c_0$ , e armazenamento na planície de inundação  $\left(\frac{w_t}{w}\right)$ , e também relacionadas ao hidrograma de entrada, como a vazão de pico inicial  $Q_0$ , o volume  $V$ , sua curvatura relativa  $C'$ . Além disso, o modelo apresenta um indicador prático chamado comprimento de atenuação que informa a distância percorrida a montante pela onda de cheia para que seu pico reduza a um determinado fator (e.g.,  $L_{1/2}[km] = 0.00248/\varphi$ ).

As análises de sensibilidade indicam que os principais fatores governantes da atenuação da onda de cheia são a vazão de pico inicial e armazenamento da planície de inundação, que aumentam a atenuação, e a declividade do rio e volume do hidrograma, que diminuem a atenuação.

A validade e acuraria do modelo foram demonstradas em 3 experimentos de validação. O modelo proposto reproduziu soluções numéricas das equações de Saint-Venant para uma ampla gama de características do rio e de escoamentos, conforme detalhado neste artigo. Lima e Paiva (2023) apresentam validações adicionais. O modelo foi acurado ao reproduzir 29 observações de vazões de pico atenuadas de cheias de 11 rompimentos de barragem históricos, sendo consideravelmente mais acurado em um modelo empírico simplificado. Além disso, o modelo forneceu previsões equivalentes às obtidas por um modelo hidrodinâmico detalhado representativo da prática atual de engenharia. Os erros do modelo proposto foram em geral menores que 10%, não sendo maiores que a incerteza típica de observações de vazões de cheias.

As validações do modelo proposto corroboram a representação da onda de cheia e solução das equações hidrodinâmicas. O modelo de atenuação de ondas de cheia pode ser facilmente aplicado usando planilhas eletrônicas básicas, por exemplo (ver material suplementar de Paiva e Lima, 2023) e alguns parâmetros obtidos com os métodos SIG atuais. Dado a sua simplicidade e acurácia, o modelo é apropriado para aplicações práticas como avaliações preliminares de cheias naturais e de rompimentos de barragens, dimensionamentos em engenharia, e análises em grandes redes de drenagem em SIG com apoio de dados de sensoriamento remoto.

## REFERÊNCIAS

- Blöschl, G. (2022). Three hypotheses on changing river flood hazards. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(19), 5015-5033. <https://doi.org/10.5194/hess-26-5015-2022>
- Brunner, M. I., Slater, L., Tallaksen, L. M., & Clark, M. (2021). Challenges in modeling and predicting floods and droughts: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(3), e1520. <https://doi.org/10.1002/wat2.1520>
- Chow, V. T., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1988) *Applied hydrology*. McGraw-Hill Book Company.
- Cunge, J. A., & Hager, W. H. (2015). Alexandre Preissmann: his scheme and his career. *Journal of Hydraulic research*, 53(4), 413-422. <https://doi.org/10.1080/00221686.2015.1076894>
- Dingman, S. L. (2009). *Fluvial hydraulics*. oxford university press. ISBN 978-0-19-517286-7.
- Frasson, R. P. D. M., Pavelsky, T. M., Fonstad, M. A., Durand, M. T., Allen, G. H., Schumann, G., ... & Yang, X. (2019). Global relationships between river width, slope, catchment area, meander wavelength, sinuosity, and discharge. *Geophysical Research Letters*, 46(6), 3252-3262. <https://doi.org/10.1029/2019GL082027>
- ICOLD, C. I. G. B. (2022). *Dam Surveillance-Lessons Learnt from Case Histories: Bulletin 180*. Taylor & Francis Group.
- Koussis, A. D. (2009). Assessment and review of the hydraulics of storage flood routing 70 years after the presentation of the Muskingum method. *Hydrological sciences journal*, 54(1), 43-61. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.1.43>
- Lima, S.G. e Paiva, R.C.D. (2023). Modelo simplificado de atenuação de ondas de cheia: validação para cheias naturais e rompimentos históricos de barragens. In: *XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- 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>
- Moody, J. A., & Troutman, B. M. (2002). Characterization of the spatial variability of channel morphology. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 27(12), 1251-1266. <https://doi.org/10.1002/esp.403>
- Paiva, R.C.D. e Lima, S.G. (2023). A Simple Model of Flood Peak Attenuation. *Em revisão na Water Resources Research*.
- Ponce, V. M (2014). *Engineering hydrology: Principles and praticies* (2nd ed. online). [Avaliable at <http://ponce.sdsu.edu/enghydro/index.html>]
- Siqueira, V. A., Paiva, R. C., Fleischmann, A. S., Fan, F. M., Ruhoff, A. L., Pontes, P. R., ... & Collischonn, W. (2018). Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(9), 4815-4842. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018>
- Smith, A., Sampson, C., & Bates, P. (2015). Regional flood frequency analysis at the global scale. *Water Resources Research*, 51(1), 539-553. <https://doi.org/10.1002/2014WR015814>
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2020), HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual, Version 6.0, Hydrol. Eng. Center, Davis, CA. [Available at [www.hec.usace.army.mil](http://www.hec.usace.army.mil)]
- Wong, T. H., & Laurenson, E. M. (1983). Wave speed–discharge relations in natural channels. *Water Resources Research*, 19(3), 701-706. <https://doi.org/10.1029/WR019i003p00701>