

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

O HYDROPEAKING E SUA REPRESENTAÇÃO EM UM MODELO DE PROPAGAÇÃO DE VAZÃO

Pedro Frediani Jardim¹; Walter Collischonn² & Rodrigo Cauduro Dias de Paiva³

RESUMO – Mesmo PCHs podem provocar alterações significativas sobre a fauna e flora por meio de operações para atender variação da demanda energética, conhecidas como *hydropeaking*. Para o estudo deste tipo de impacto, a modelagem hidráulica computacional surge como alternativa para quantificar os impactos em locais não monitorados. Desta maneira, é necessário que o modelo adotado represente corretamente a atenuação natural dos picos de vazão lançados pelas hidrelétricas, sem que ocorra excessiva difusão numérica. O presente trabalho buscou avaliar o impacto da utilização de diferentes discretizações espaciais para modelagem com o método inercial tal qual formulado atualmente no modelo MGB. Para isso, foram feitos testes de propagação de picos de vazão em rios hipotéticos, os quais foram comparados à solução analítica da equação de advecção-difusão, bem como a de um hidrograma real a jusante da barragem Salto Caxias, no Paraná. Os resultados demonstraram que quando adotados picos de longa duração a difusão foi significativa, sendo mais sensível à discretização em rios de alta declividade, sendo ideal a utilização de segmentos na ordem de 2 km ou menos no modelo inercial. Este uso de segmentos menores da rede de drenagem aproximou a vazão obtida com o modelo inercial daquela com a solução analítica.

ABSTRACT – Even small dams can cause significant changes in fauna and flora through operations to provide energy for a variable demand, known as *hydropeaking*. For the study of this type of impact, computational hydraulic modeling appears as an alternative to quantify impacts in ungauged locations. In this way, it is necessary that the adopted model correctly represents the natural attenuation of the discharge peaks launched by the hydropower plants, without excessive numerical diffusion. The present work sought to evaluate the impact of the use of different spatial discretizations for modeling with the inertial method as formulated currently in the MGB model. For this purpose, tests were carried out to propagate peak flows in hypothetical rivers, which were compared to the analytical solution of the advection-diffusion equation, as well as a real hydrograph downstream of the Salto Caxias dam in Paraná. The results showed that when the peaks of long duration were adopted the diffusion was significant, being more sensitive to the discretization in rivers of high slope, being ideal the use of segments of 2 km or less in the inertial model. This use of smaller segments approached the flow obtained with the inertial model of that with the analytical solution.

Palavras-Chave – Hydropeaking, modelo inercial, MGB

1) Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500 – Porto Alegre – RS – Brasil, (51) 3308-7511, pedro.fjar@gmail.com

2) Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500 – Porto Alegre – RS – Brasil, (51) 3308-6415, collischonn@iph.ufrgs.br

3) Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500 – Porto Alegre – RS – Brasil, (51) 3308-7511, rodrigo.paiva@ufrgs.br

INTRODUÇÃO

Hydropeaking é o nome dado, na literatura internacional, às operações de barragens e reservatórios que resultam em rápidas alterações da vazão de um rio (Moog, 1993; Bejarano, 2017). Estas alterações da vazão são, tipicamente, resultado de operações que visam atender o aumento e a redução da demanda de energia elétrica.

Pequenas ondas de cheia geradas por este tipo de operação podem propagar para jusante, ao longo de rios e canais. Dependendo das características físicas do rio, estas ondas de cheia podem propagar por dezenas ou centenas de km antes de se dissiparem completamente. Ao longo deste caminho, as alterações de vazão e nível da água podem ter impactos ambientais (Fantin-Cruz, 2016; Bejarano et al., 2017; Hall et al., 2015; Kjørstad et al., 2018; Kennedy et al., 2016; Casas-Mulet et al., 2015a; Finch et al., 2015; Lagarde et al., 2018; Ely, 2019) e causar conflitos com outros tipos de usos da água (DIPLA/DRH, 2019).

Para avaliar o hydropeaking, e procurar minimizar os seus efeitos, é fundamental calcular, de forma adequada, como ocorre a atenuação dos picos de vazão liberados por uma barragem ou reservatório. Isto pode ser feito utilizando modelos hidrodinâmicos e modelos hidrológicos (Casas-Mulet et al., 2015b; Juaréz et al., 2019). Entretanto, para que os resultados do modelo sejam confiáveis, é importante que a atenuação da onda de cheia seja calculada de forma realista. Mesmo quando é utilizado um modelo hidrodinâmico amplamente reconhecido na prática da engenharia, como o modelo HEC-RAS, por exemplo, nem sempre a atenuação da onda de cheia é adequadamente representada, sendo comum os erros de atenuação pelo efeito conhecido como difusão numérica (Castellarin et al., 2019).

Neste trabalho apresentamos uma análise da atenuação de ondas de cheia típicas de hydropeaking no modelo hidrodinâmico de inércia local, que atualmente é o módulo utilizado para propagação de vazões no modelo hidrológico MGB. São utilizadas diferentes discretizações espaciais para redução da atenuação numérica provocada pelo modelo, considerando diferentes situações físicas. Também é apresentado e simulado um estudo de caso real observado no rio Iguaçu.

METODOLOGIA

O modelo hidrodinâmico de inércia local é uma aproximação das equações de Saint-Venant, que despreza o termo de inércia advectiva, conforme apresentado nas equações 1 e 2.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{Q^2}{A} \right] + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gAS_0 - gAS_f \quad (2)$$

A versão atual do modelo MGB utiliza uma solução numérica destas equações no seu módulo de propagação de vazão, conforme descrito por Fan et al. (2014) e Pontes et al. (2015). Esta solução numérica está baseada na discretização do tempo (Δt) e do comprimento do rio (Δx).

Com base em estudos teóricos (Cunge et al., 1980) e em aplicações anteriores do modelo hidrodinâmico de inércia local, sabe-se que o valor adotado para a discretização espacial (Δx) pode afetar a atenuação das ondas de cheia, através de um tipo de erro conhecido como difusão numérica.

A fim de analisar a influência do tamanho do Δx utilizado na discretização de um trecho de rio na difusão numérica quando utilizado o método inercial, foram realizados testes de propagação de ondas de cheia em um trecho de rio hipotético de 200 km de extensão com uma calha retangular de 45 metros de largura, 2,5 metros de profundidade e coeficiente de manning de 0,03. As ondas de cheia testadas foram ondas típicas de hydropeaking, com uma ascensão brusca, seguida de um patamar durante algumas horas, seguido de uma redução brusca, voltando ao valor original. Os valores de vazão de base e vazão de pico foram, respectivamente, 27 e 40 m³/s. O tempo de duração da cheia variou entre 1, 4 e 12 horas.

Para analisar a influência do tamanho do Δx na difusão numérica foram adotados os valores de 0,5, 1, 2, 5, 10 e 20 km. Também neste trecho hipotético foram adotadas as declividades de 20 cm/km e 50 cm/km para verificar a influência da declividade na difusão numérica. Para isso, foi adotado o método de propagação inercial tal qual está programado atualmente no modelo MGB, sem a inclusão de contribuições laterais. A Figura 1 mostra um exemplo hidrograma de entrada e um exemplo de hidrograma de saída com pico atenuado.

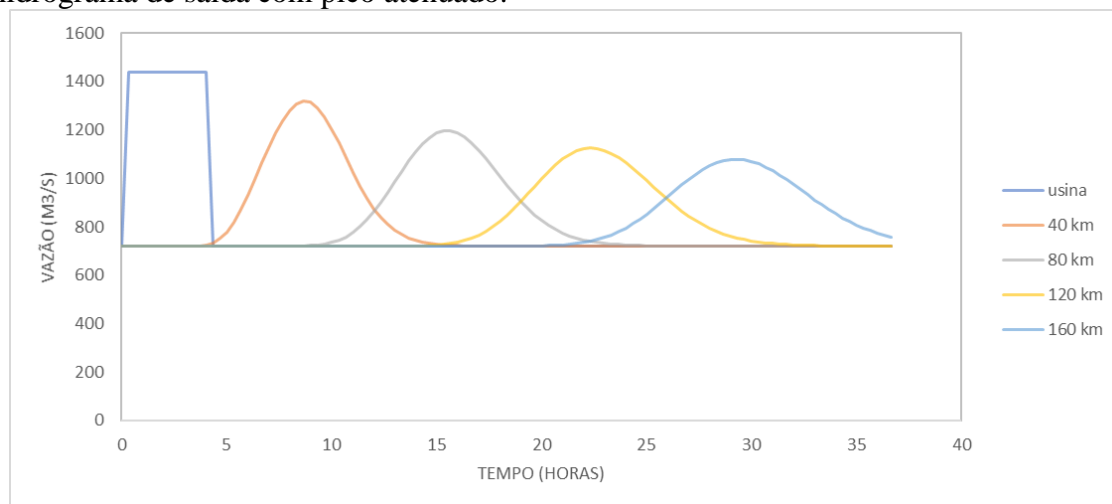


Figura 1 – Exemplo hipotético de uma operação de hydropeaking em que uma usina hidrelétrica lança um pico de vazão de 1400 m³/s e sua atenuação ao longo da rede de drenagem.

Como forma de comparação, foi obtida, também, a solução analítica da equação de advecção difusão (equação 3).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C \frac{\partial Q}{\partial x} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (3)$$

Um dos casos em que existe solução analítica para esta equação é a situação em que a vazão de um rio aumenta subitamente no contorno de montante de um longo trecho (Chanson, 2004). Também existe solução analítica no caso de um rio em que, no limite de montante, a vazão cresce de forma instantânea entre um valor inicial (Q_0) para um valor superior ($Q_0 + \Delta Q$), permanecendo com este valor superior ao longo de um período finito de tempo (T_d), e retornando para o valor original (Q_0) ao final deste período.

A solução analítica, neste caso, é dada pela equação 4 (Chanson, 2004; Chapra, 2008):

$$\Delta Q_x = \frac{\Delta Q_B}{2} \left\{ \begin{array}{l} \left[ERFC \left(\frac{x-C \cdot t}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}} \right) - ERFC \left(\frac{x-C \cdot (t-T_d)}{2 \cdot \sqrt{D \cdot (t-T_d)}} \right) \right] \\ + e^{\frac{C \cdot x}{D}} \cdot \left[ERFC \left(\frac{x+C \cdot t}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}} \right) - ERFC \left(\frac{x+C \cdot (t-T_d)}{2 \cdot \sqrt{D \cdot (t-T_d)}} \right) \right] \end{array} \right\} \quad (4)$$

Onde ΔQ_B é a alteração da vazão no local da barragem; ΔQ_x é a alteração de vazão em um ponto localizado a uma distância x da barragem; C é a celeridade cinemática; D é o coeficiente de difusão; e ERFC é a função erro complementar, definida por $ERFC=1-ERF$, onde ERF é a função erro, definida por:

$$ERF(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-w^2} dw \quad (5)$$

Em um segundo estudo, foram utilizados dados observados de vazão para a propagação conforme descrito a seguir.

Estudo de caso real

Para analisar o impacto da difusão numérico sobre um trecho real de rio foi estudado o segmento de 190 km de extensão do rio Iguazu localizado entre a Usina Hidrelétrica de Salto Caxias, a montante no par de coordenadas $53^{\circ}29'50''\text{O}/25^{\circ}32'36''\text{S}$, e a estação telemétrica Hotel Cataratas, localizada junto às Cataratas do Iguazu no par de coordenadas $54^{\circ}22'55''\text{O}/25^{\circ}42'58''\text{S}$. A localização destes pontos é mostrada na Figura 2.

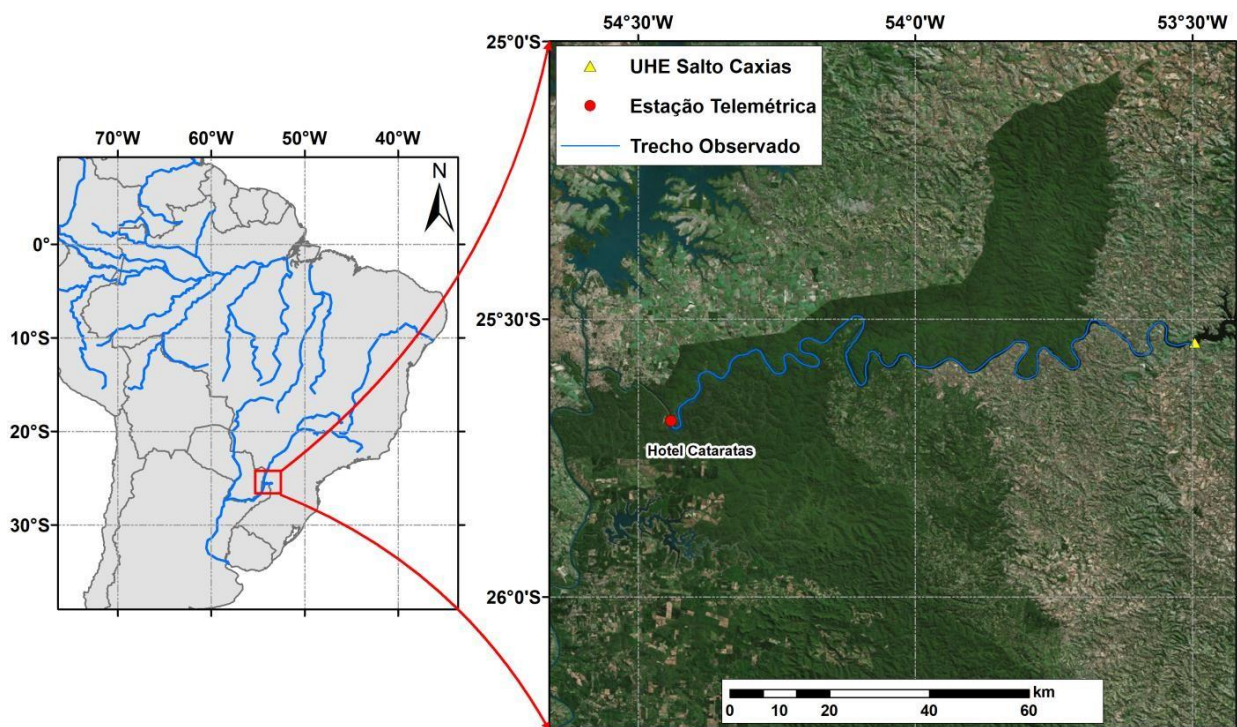


Figura 2 – Localização do rio Iguazu e do seu trecho estudado.

Este trecho foi escolhido por ser possível analisar a propagação e atenuação dos picos de vazão lançados pela UHE Salto Caxias ao longo do rio Iguazu. Esta possibilidade se dá devido à disponibilidade das vazões defluentes da usina que foram obtidas através do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) da Agência Nacional de Águas (ANA). A Figura 3 apresenta estes dados em comparação com as vazões observadas na estação telemétrica Hotel Cataratas no período entre 02 e 10 de setembro de 2014. Na Figura 3 é possível perceber o forte impacto que a operação da usina tem sobre o regime hidrológico do rio ao buscar atender os picos de demanda energética entre os horários das 10:00 às 22:00 horas e, também, a atenuação que estes picos de longas horas de duração sofrem ao longo dos 190 km entre os pontos.

Para verificar se o método inercial seria capaz de simular corretamente esta atenuação, foi propagado o hidrograma defluente da usina utilizando o método. Foram feitas duas simulações distintas ao longo dos 190 km, uma com segmentos de 2 km e outra com trechos de 10 km de extensão. A calha do rio foi considerada retangular com 16 metros de profundidade, que é o máximo valor observado no posto de descarga da estação Hotel Cataratas, largura igual à média de 670 metros observada no trecho, declividade constante equivalente à diferença de cotas dividida pela distância entre a UHE e o posto telemétrico. Foi adotado o coeficiente de manning da calha igual a 0,025.

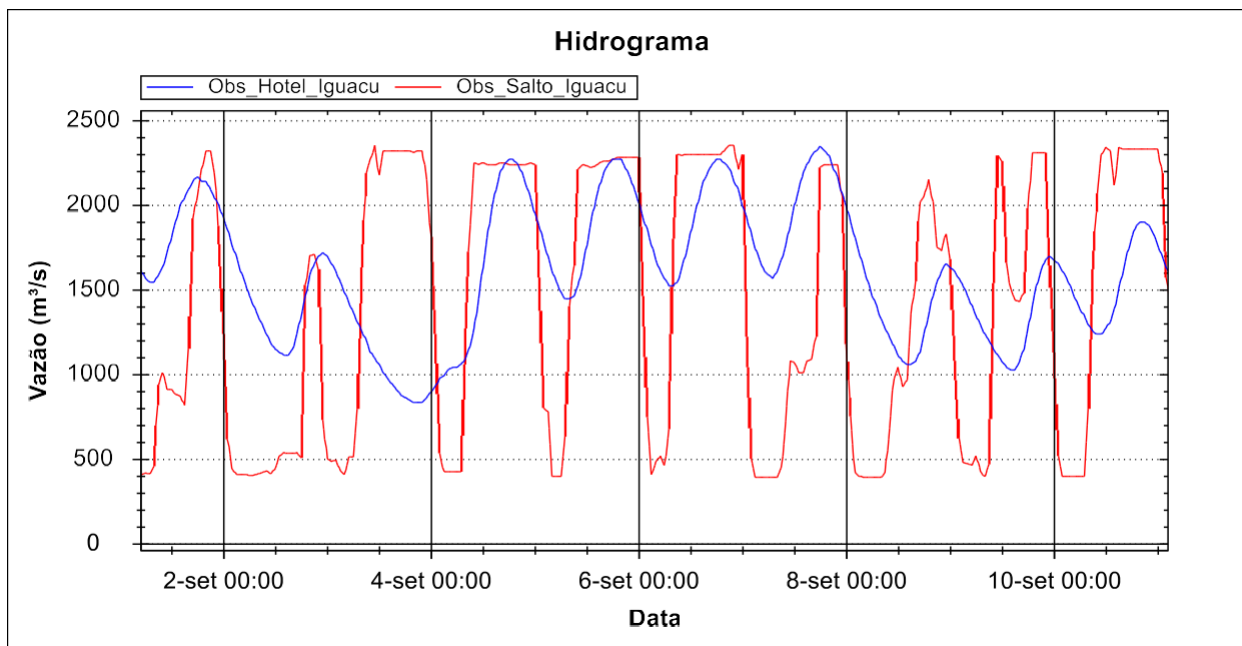


Figura 3 – Vazão defluente da UHE Salto Caxias e observada na estação Hotel Cataratas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados para as diferentes simulações realizadas.

Rio hipotético

A Figura 4 apresenta os picos de vazão que chegam ao final do trecho de 200 km para as diferentes discretizações e declividades adotadas quando o pico inicial teve a duração de 4 horas. Já as Tabelas 1 e 2 apresentam, para as declividades de 50 cm/km e 20 cm/km, respectivamente, as atenuações observadas por cada método aplicado e para as diferentes discretizações espaciais no caso do modelo inercial. Esta atenuação foi calculada dividindo-se a diferença entre o pico de entrada (Q_e) e o propagado (Q_p) pela diferença entre o pico de entrada e a vazão de base (Q_b), como mostra a equação 6.

$$\text{Atenuação} = \frac{Q_e - Q_p}{Q_e - Q_b} \quad (6)$$

Percebe-se que, para uma mesma duração do pico de entrada, as declividades de 20 cm/km provocaram as maiores atenuações nos picos de cheia se comparadas ao pico de 40 m³/s lançados inicialmente. Contudo, as maiores diferenças absolutas de atenuação em relação às discretizações espaciais foram observadas para a declividade de 50 cm/km, o que mostra que para declividades maiores a variação da discretização pode acarretar resultados mais diferentes entre si. Por exemplo, para o pico de 12 horas de duração, a diferença na atenuação entre a segmentação de 500 metros para a de 20 km foi de 53% no trecho de maior declividade enquanto no de menor declividade esta diferença foi de 25%. Ainda, o método analítico foi o que apresentou a menor atenuação para todos os casos, sendo aproximado pelo método inercial quando neste se fez uso de menores Δx .

Em relação à magnitude do pico ao fim da propagação, a simulação que resultou na maior atenuação absoluta ocorreu para a declividade de 20 cm/km com pico inicial de uma hora de

duração e segmentação de 20 km de extensão. Neste caso, a vazão praticamente retornou para a vazão de base de 27 m³/s.

De maneira geral, a maior diferença dentre todas as simulações em relação à mudança do Δx ocorreu para o pico inicial de 12 horas de duração e declividade de 50 cm/km, entre a discretização de 0,5 km e na com 20 km. Neste caso, a diferença de magnitude dos picos foi de 7,24 m³/s. As maiores diferenças de atenuação observadas a medida em que aumentou o tamanho da segmentação dos subtrechos em todos os picos de entrada foram obtidas quando alterados os trechos de 2km para 5km.

Estes resultados indicam que, para analisar a extensão dos efeitos da liberação de um pulso de cheia de longa duração sobre a rede de drenagem com uso do modelo MGB e propagação inercial, o ideal seria a utilização de uma discretização mais refinada da rede de drenagem, na ordem de 2 km ou menos, principalmente quando estudadas regiões de baixas ou baixíssimas declividades, nas quais a atenuação numérica é maior.

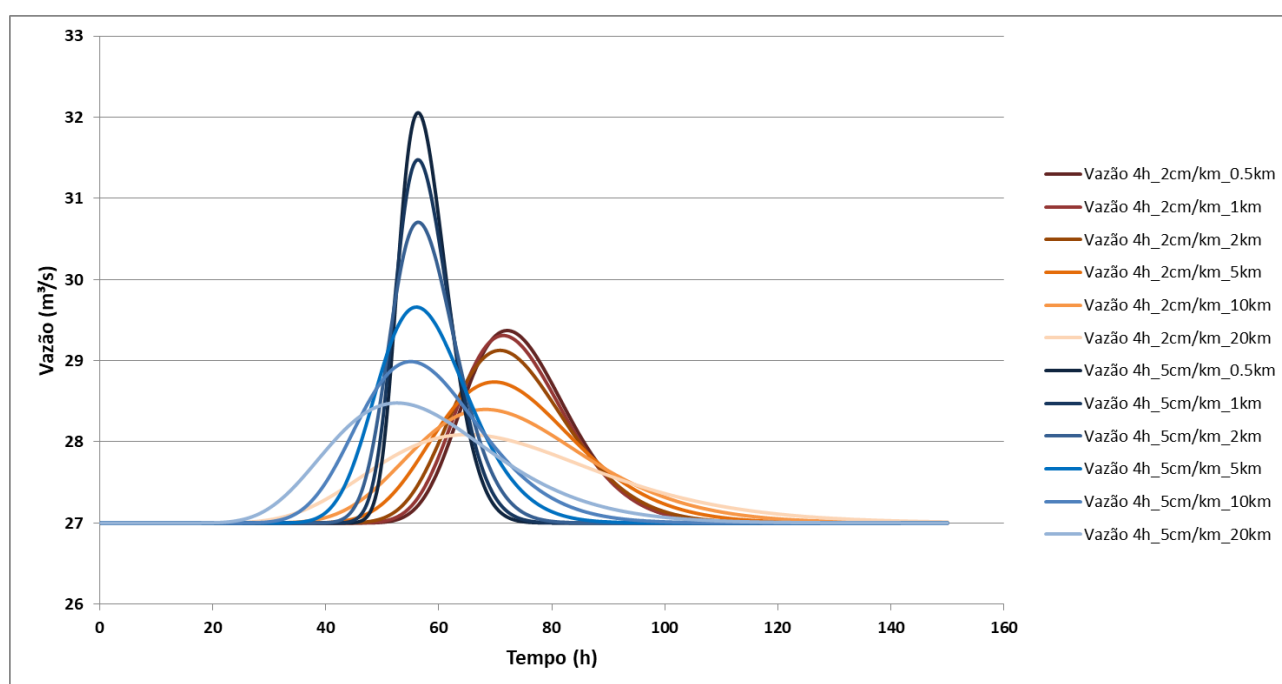


Figura 4 – Resultados da atenuação dos picos de cheia com 4 horas de duração para os diferentes Δx e declividades.

Tabela 1 – Atenuação com a solução analítica e pelo método inercial dos picos lançados de diferentes durações para o trecho de rio hipotético com declividade de 50 cm/km.

Declividade - 50cm/km	Atenuação			
	Solução	12h	4h	1h
Analítica		12%	58%	89%
Inercial - 0,5 km		14%	63%	90%
Inercial - 1 km		19%	67%	92%
Inercial - 2 km		28%	73%	93%
Inercial - 5 km		44%	80%	95%
Inercial - 10 km		57%	85%	96%
Inercial - 20 km		67%	89%	97%

Tabela 2 – Atenuação com a solução analítica e pelo método inercial dos picos lançados de diferentes durações para o trecho de rio hipotético com declividade de 20 cm/km.

Declividade - 20cm/km	Atenuação		
	Solução	12h	4h
Análítica	48%	81%	95%
Inercial - 0,5 km	51%	82%	96%
Inercial - 1 km	51%	83%	96%
Inercial - 2 km	55%	84%	96%
Inercial - 5 km	62%	87%	97%
Inercial - 10 km	69%	90%	97%
Inercial - 20 km	76%	92%	98%

Rio Iguaçu

A Figura 5 apresenta o hidrograma observado na estação telemétrica Hotel Cataratas e os resultados da propagação dos hidrogramas defluentes da UHE Salto Caxias por meio do método inercial tal qual este é formulado atualmente no modelo MGB para as discretizações de 2 e 10 km de extensão.

A comparação entre os resultados das propagações e o hidrograma observado permite constatar que houve atenuação demais dos picos de vazão quando adotados 10 km de discretização da rede de drenagem ao passo que, para 2 km de extensão, a magnitude dos picos ficou muito fiel aos observados, havendo apenas diferenças nos valores absolutos pela ausência de contribuições laterais ao longo da rede. Este resultado indica que uma discretização na ordem de 10 km não seria adequada para representar os efeitos da operação da UHE através do método inercial, sendo mais adequados valores próximos ou inferiores a 2 km.

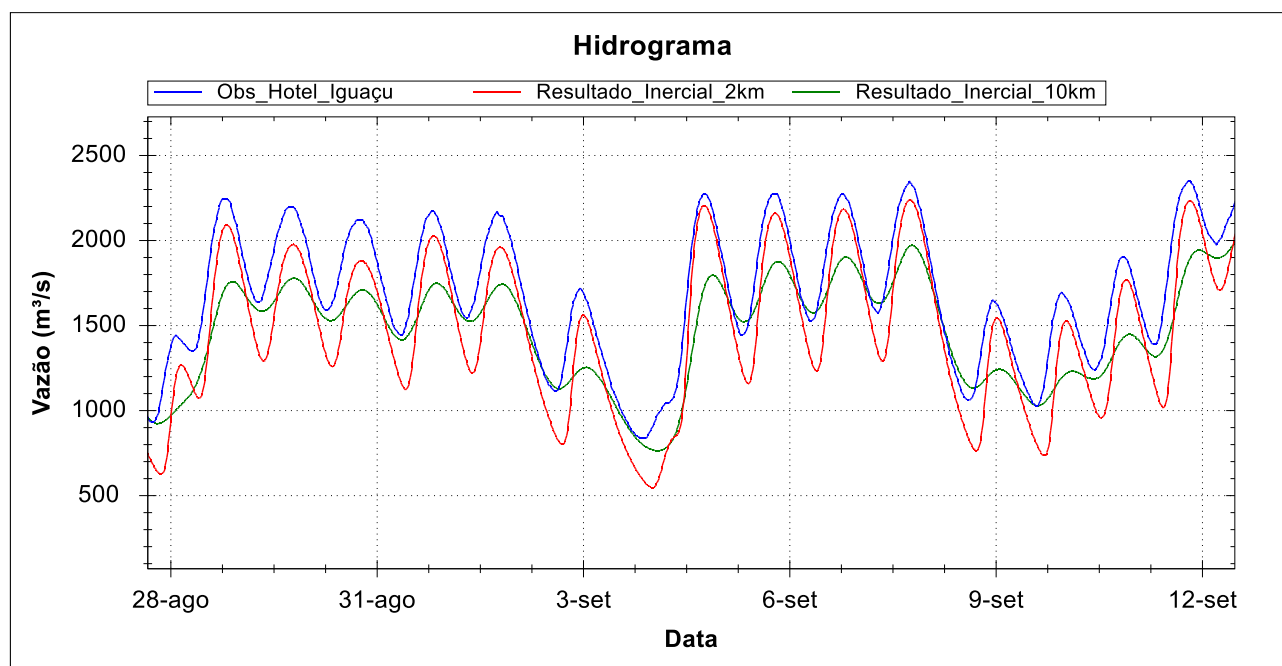


Figura 5 – Hidrogramas observado na estação Hotel Cataratas e simulados para as discretizações da rede de drenagem em 2 e 10km após a propagação da vazão defluente da UHE Salto Caxias.

CONCLUSÕES

Para realização de estudos de impactos de barragens por meio da utilização de modelos computacionais, é necessário que estes levem em consideração possíveis atenuações irreais dos picos de vazão em razão de difusões numéricas. Esta análise é particularmente importante quando estudados impactos de *hydropeaking* devido à forma e duração que estes possuem. Uma das maneiras de reduzir estas difusões é diminuir o intervalo de tempo entre os passos de simulação.

O presente trabalho buscou avaliar o impacto da utilização de diferentes discretizações espaciais para modelagem com o método inercial da forma como este está formulado atualmente no modelo MGB. Ainda, aplicou-se a solução analítica da equação de advecção difusão a fim de comparar os métodos.

Os resultados demonstraram que quanto menor a duração do pico a montante, maior a difusão numérica sobre os resultados simulados e que a difusão aumenta para declividades mais baixas. Contudo, as diferenças decorrentes da utilização de diferentes discretizações é maior para rios de maiores declividades, indicando que, para estes, pode ser necessária a utilização de segmentos de menores comprimentos, o que aproximou a solução do modelo inercial ao da solução analítica. Os resultados demonstraram que discretizações na ordem de 2 km ou menos seriam suficientes para representar a atenuação real, como corroboram os dados obtidos para a simulação no rio Iguaçu.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior –, ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – e ao IPH/UFRGS – Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS – pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BATES, P. D.; HORRITT, M. S.; FEWTRELL, T. J. (2010). “A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling”. *Journal of Hydrology*, 387(1), pp. 33-45.
- BEJARANO, M. D., JANSSON, R., NILSSON, C. (2017). *The effects of hydropeaking on riverine plants: a review*. *Biological Reviews*, 93(1), 658-673.
- CASAS-MULET, R., SALTVEIT, S.J., ALFREDSEN, K. (2015a). *The survival of Atlantic salmon (Salmo salar) eggs during dewatering in a river subjected to hydropeaking*. *River Res. Appl.* 31 (4), 433–446.
- CASAS-MULET, R. O. S. E. R., ALFREDSEN, K. N. U. T., BOISSY, T., SUNDT, H., & RÜTHER, N. (2015b). *Performance of a one-dimensional hydraulic model for the calculation of stranding areas in hydropeaking rivers*. *River research and applications*, 31(2), 143-155.
- CUNGE, J. A., HOLLY, F. M., & VERWEY, A. (1980). *Practical aspects of computational river hydraulics*.
- DIPLA/DRH (2019). *NOTA TÉCNICA nº 001/2019 - Visibilidade do Salto do Yucumã*. Porto Alegre – RS.
- ELY, P. M. (2019). *Avaliação da Alteração Hidrológica pela Implantação de Empreendimentos Hidrelétricos em Rios da Região Hidrográfica do Alto Paraguai*. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos), Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2019.

- FAN, F. M., PONTES, P. R. M., PAIVA, R. C. D., & COLLISCHONN, W. (2014). *Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 19(4), 137-147.
- FANTIN-CRUZ, I.; PEDROLLO, O.; GIRARD, P.; ZEILHOFER, P.; HAMILTON, S.K. (2016). *Changes in River Water Quality Caused by a Diversion Hydropower Dam Bordering the Pantanal Floodplain*. Hydrobiologia, v. 768, p. 223-236, Suíça,
- FINCH, C., PINE III, W.E., LIMBURG, K.E. (2015). *Do hydropеaking flows alter juvenile fish growth rates? A test with juvenile Humpback Chub in the Colorado River*. River Res. Appl. 31 (2), 156–164.
- HALL, R.O., YACKULIC, C.B., KENNEDY, T.A., YARD, M.D., ROSI-MARSHALL, E.J., VOICHICK, N., BEHN, K.E. (2015). *Turbidity, light, temperature, and hydropеaking control primary productivity in the Colorado River, Grand Canyon*. Limnol. Oceanogr. 60 (2), 512–526.
- JUÁREZ, A., ADEVA-BUSTOS, A., ALFREDSEN, K., & DØNNUM, B. O. (2019). *Performance of A Two-Dimensional Hydraulic Model for the Evaluation of Stranding Areas and Characterization of Rapid Fluctuations in Hydropеaking Rivers*. Water, 11(2), 201.
- KENNEDY, T. A., MUEHLBAUER, J. D., YACKULIC, C. B., LYTLE, D. A., MILLER, S. W., DIBBLE, K. L., ... & BAXTER, C. V. (2016). *Flow management for hydropower extirpates aquatic insects, undermining river food webs*. BioScience, 66(7), 561-575.
- KJÆRSTAD, G., ARNEKLEIV, J. V., SPEED, J. D. M., & HERLAND, A. K. (2018). *Effects of hydropеaking on benthic invertebrate community composition in two central Norwegian rivers*. River Research and Applications, 34(3), 218-231.
- LAGARDE, R., TEICHERT, N., FAIVRE, L., GRONDIN, H., MAGALON, H., PIROG, A., ... & PONTON, D. (2018). *Artificial daily fluctuations of river discharge affect the larval drift and survival of a tropical amphidromous goby*. Ecology of Freshwater Fish.
- MAGILLIGAN, F.J., NISLOW, K.H. (2005). *Changes in hydrologic regime by dams*, Geomorphology, Vol. 71, pp. 61-78.
- MOOG, O (1993). *“Quantification of daily peak hydropower effects on aquatic fauna and management to minimize environmental impacts”*. Regulated Rivers: Research & Management, v. 8, n. 1-2, p. 5-14.
- MOUSSA, R.; BOCQUILLON, C. (1996). *“Criteria for the choice of flood-routing methods in natural channels”*. Journal of Hydrology, 186(1-4), pp. 1-30.
- PONTES, P. R. M. ; COLLISCHONN, W. ; FAN, F. M. ; PAIVA, R. C. D. ; BUARQUE, D. C. (2015). *“Modelagem Hidrológica e Hidráulica de Grande Escala com Propagação Inercial de Vazões”*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 20, pp. 888-904.
- SANTOS, C. P., & SOUZA, C. F. (2015). *Efeitos da cascata de reservatórios sobre a variabilidade natural de vazões: o caso do rio Paraná em Porto Primavera*. RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 20(3), 698-707.