

Dossiê Parque Estadual do Turvo (PET) - Yucumã

Modelagem hidrodinâmica do Rio Uruguai no trecho do Parque Estadual do Turvo

Hydrodynamic modeling of the Uruguay River in the Turvo State Park stretches

Modelación hidrodinámica del Río Uruguay en el trecho del Parque Estatal del Turvo

Luiz Eduardo Cavallo Pfeil¹ , **Malva Andrea Mancuso¹** ,
Willian Fernando de Borba¹ 

¹ Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS

RESUMO

Os pulsos de vazão gerados pela operação de uma Usina Hidrelétrica (UHE) modificam o regime hídrico a jusante. O trecho do Rio Uruguai abordado nesse estudo se inicia após a UHE Foz do Chapecó e termina na estação fluviométrica Alto Uruguai, a jusante do Parque Estadual do Turvo (PET), localizado em Derrubadas/RS. O PET abriga o Salto do Yucumã, a maior queda d'água longitudinal do mundo, dotada de extraordinária beleza cênica, com grande relevância para o turismo e muito suscetível aos pulsos de vazão da UHE a montante. O trecho possui em estudo o projeto de uma UHE em Itapiranga (SC), com localização muito mais próxima ao PET. Foi estruturado no HEC RAS um modelo hidrodinâmico unidimensional para simular os pulsos de vazão das usinas no trecho. O modelo foi calibrado para um período de estiagem utilizando os dados das estações fluviométricas disponíveis. A Simulação 1 está relacionada aos pulsos de vazão da UHE Foz do Chapecó, e a Simulação 2 está relacionada a um regime hipotético de vazões, caso uma UHE seja construída em Itapiranga. A Simulação 1 (calibração) mostrou consistência frente aos dados observados, com coeficientes de determinação (R^2) entre 0,8562 e 0,9837, coeficientes Nash-Sutcliffe (NS) variando de 0,8515 a 0,9832 e, o coeficiente logarítmico de Nash-Sutcliffe (NSlog) na faixa de 0,8557 a 0,9716. A Simulação 2 mostrou que, considerando o cenário adotado de uma nova UHE em Itapiranga, as mudanças no regime hídrico do Rio Uruguai, no Salto do Yucumã, incluiriam um aumento de até 15,1% nas vazões máximas, uma redução de até 27,2% nas vazões mínimas, e um aumento de até 122,2% na amplitude das vazões estudadas.

Palavras-chave: Pulsos de vazão; UHE Foz do Chapecó; UHE Itapiranga; Salto do Yucumã

ABSTRACT

The flow pulses generated by the operation of a Hydroelectric Power Plant (HPP) modify the water regime downstream. The stretch of the Uruguay River covered in this study begins after the Foz do Chapecó HPP and ends at the Alto Uruguai fluviometric station, downstream of the Turvo State Park (TSP), located in Derrubadas/RS. The PET is home to the Yucumã Falls, the largest longitudinal waterfall in the world, with extraordinary scenic beauty, great relevance for tourism, and being very susceptible to flow pulses from the upstream HPP. The stretch has the Itapiranga HPP project under study, located much closer to the TSP. A one-dimensional hydrodynamic model was structured in HEC RAS to simulate the flow pulses of the plants in the stretch. The model was calibrated for a dry period using data from available fluviometric stations. Simulation 1 was related to the flow pulses of the Foz do Chapecó HPP, and Simulation 2 was related to a hypothetical flow regime if a HPP were built in Itapiranga. Simulation 1 (calibration) showed consistency compared to the observed data, with coefficients of determination (R^2) between 0.8562 and 0.9837, Nash-Sutcliffe coefficients (NS) varying from 0.8515 to 0.9832, and the logarithmic coefficient Nash-Sutcliffe (NSlog) in the range of 0.8557 to 0.9716. Simulation 2 showed that, considering the adopted scenario of a new HPP in Itapiranga, changes in the water regime of the Uruguay River in the Yucumã Falls would include an increase of up to 15.1% in maximum flows, a reduction of up to 27.2% in minimum flows, and an increase of up to 122.2% in the amplitude of the studied flows.

Keywords: Flow pulses; Foz do Chapecó HPP; Itapiranga HPP; Yucumã Falls

RESUMEN

Los pulsos de flujo generados por la operación de una central hidroeléctrica (CH) modifican el régimen hídrico aguas abajo. El tramo del Río Uruguay objeto de este estudio comienza después de la CH Foz do Chapecó y finaliza en la estación fluviométrica Alto Uruguai, aguas abajo del Parque Estadual del Turvo (PET), ubicado en Derrubadas/RS. El PET alberga los Saltos de Yucumã, el salto longitudinal más grande del mundo, de extraordinaria belleza escénica, de gran relevancia turística y muy susceptible a los pulsos de flujo de la UHE aguas arriba. El tramo tiene en estudio el proyecto de una CH en Itapiranga (SC), con ubicación mucho más cercana al PET. Se estructuró un modelo hidrodinámico unidimensional en HEC RAS para simular los pulsos de flujo de las CH en el tramo. El modelo fue calibrado para un período seco utilizando datos de estaciones fluviométricas disponibles. La Simulación 1 está relacionada con los pulsos de flujo de la CH Foz do Chapecó, y la Simulación 2 está relacionada con un régimen de flujo hipotético, si se construye una CH en Itapiranga. La Simulación 1 (calibración) mostró consistencia en comparación con los datos observados, con coeficientes de determinación (R^2) entre 0,8562 y 0,9837, coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS) que variaron de 0,8515 a 0,9832 y el coeficiente logarítmico de Nash-Sutcliffe (NSlog) entre 0,8557 y 0,9716. La simulación 2 mostró que, considerando el escenario adoptado de una nueva CH en Itapiranga, los cambios en el régimen hídrico del río Uruguay, en los Saltos de Yucumã, incluirían un aumento de hasta el 15,1% en los caudales máximos, una reducción de hasta el 27,2% en los caudales mínimos, y un aumento de hasta el 122,2% en la amplitud de los caudales estudiados.

Palabras-clave: Pulsos de flujo; CH Foz do Chapecó; CH Itapiranga; Saltos de Yucumã

1 INTRODUÇÃO

Na região Sul do Brasil, há a previsão de construção de mais 9 hidrelétricas (1.509,4 MW) até 2027, sendo duas delas no Rio Uruguai: Itapiranga, com capacidade

724MW e Santo Antônio com 84MW (Mancuso e Lamberty, 2018). Também instalada no Rio Uruguai, entre SC e RS, está a UHE Foz do Chapecó, com potência equivalente à 25 % do consumo de Santa Catarina (Pasini, 2019) e, não muito a jusante dela, se planeja construir a UHE Itapiranga, mas por pressão popular, vem sendo adiada há mais de 40 anos (MAB, 2019).

Nesse contexto, considerando que os impactos a jusante das barragens costumam ser menos investigados do que os impactos a montante (Manyari, 2007), existe na região o Parque Estadual do Turvo (PET), distante cerca de 150 km a jusante da UHE Foz do Chapecó e 30 km a jusante da barragem prevista em Itapiranga. O PET abriga o Salto do Yucumã, uma belíssima queda d'água longitudinal que é a principal atração turística do parque. O Salto do Yucumã é sensível ao regime de operação da hidrelétrica a montante e pode desaparecer em questão de horas, dependendo das vazões vertidas, ocasionando impactos ambientais e afetando o turismo (PET, 2019), o que pode se intensificar com a construção da nova UHE.

Uma opção para a avaliação do regime hídrico no trecho é a modelagem hidrodinâmica, que pode ser utilizada para simular muitos cenários, possibilitando diversas análises. Para essa finalidade destaca-se o software HEC-RAS (River Analysis System) desenvolvido pela engenharia do exército dos Estados Unidos (Usace, 2022). O HEC RAS foi utilizado, por exemplo, por Andrade (2017) para simular as ondas de enchentes do rio Xopotó, na cidade de Guidoal (MG), e por Lauriano (2009) no estudo de rompimento da barragem da Hidrelétrica de Funil, no Rio Paraíba do Sul, Estado do Rio de Janeiro.

O objetivo desse trabalho é estruturar um modelo no HEC-RAS, no trecho entre a UHE Foz do Chapecó e a estação fluviométrica Alto Uruguai, a jusante do PET, que possa ser utilizado para simular as variações no regime hídrico, decorrentes da instalação de uma UHE imediatamente a montante do PET, em Itapiranga (SC).

2 METODOLOGIA

O Rio Uruguai integra a bacia do Rio da Prata e tem grande importância em função da agroindústria e do potencial hidrelétrico. Sua bacia possui cerca de 274.300

km² em território brasileiro (3% do território nacional) e abrange grandes porções dos estados do RS e SC. O Rio Uruguai possui 2.200 km de extensão e se origina da confluência dos rios Pelotas e do Peixe. Após a sua confluência com o Rio Peperi Guaçu, passa a ser fronteira entre Brasil e Argentina (Ana, 2015).

O PET situa-se em Derrubadas (RS), fazendo fronteira com a Argentina. Possui 17.500 ha e é um dos últimos redutos de animais ameaçados de extinção, como a onça-pintada, a anta e a harpia. O PET, além da importância conservacional, também tem relevância para o turismo, sendo seu maior atrativo o Salto do Yucumã (Figura 1), que com 1.800 metros ao longo do Rio Uruguai, é a maior queda d'água longitudinal do mundo (PET, 2019).

Figura 1 – Vista do Salto do Yucumã durante um período de baixas vazões, evidenciando a formação geológica e a queda d'água longitudinal (registro do dia 15/03/2020)



Fonte: Organizado pelos autores (fev, 2023)

A montante do PET, sobre o Rio Uruguai, está localizada a Usina Hidrelétrica Foz do Chapecó, instalada entre os municípios Águas de Chapecó (SC) e Alpestre (RS). O barramento possui 598 m de comprimento e 48 m de altura. Os níveis mínimo e máximo do reservatório variam apenas 1m, com cotas de 264 m e 265 m. A hidrelétrica possui 855 MW de potência instalada. Em 2001 a empresa Foz do Chapecó Energia S.A.

tornou-se responsável pela UHE e em 2006 iniciou a implantação do canteiro de obras. Em 2010, foi emitida a licença de operação e a usina foi inaugurada (Pasini, 2019).

A jusante da UHE Foz do Chapecó e a montante do PET, vem sendo discutida nos últimos 40 anos a implantação da UHE de Itapiranga (Quadro 1). Os dados referentes à UHE de Itapiranga se encontram em dois processos na ANEEL, datados de 2004 e de 2017 (Aneel, 2004, 2017a e 2017b).

Quadro 1 – Dados básicos do projeto da UHE Itapiranga

Código Único de Empreendimentos de Geração (CEG)	Coordenadas do Eixo do Barramento	Nível de Montante (m)	Nível Médio de Jusante (m)	Área do Reservatório (km ²)	Potência (kW)
UHE.PH.SC. 037625-6.01	27°09'23" S 53°41'01" O	193,00	165,00	60,80	724.600

Fonte: Aneel (2017a)

O barramento da UHE de Itapiranga está projetado para se instalar poucos quilômetros a montante da área urbana do município de Itapiranga (SC). A área de influência direta delimitada pelo estudo da empresa DENSEVIX (Aneel, 2004) considera apenas o território dos municípios com áreas alagadas pelo reservatório (a montante do barramento). O PET não está contido, sequer na Área de Influência Indireta (AII), o que evidencia que as áreas a jusante estão sendo desconsideradas nos estudos de impactos de hidrelétricas.

2.1. Modelo hidrodinâmico

O HEC-RAS (Usace, 2022) é um modelo hidráulico desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* (HEC) do *U. S. Army Corps of Engineers* (USACE) (LAURIANO, 2009), que possibilita a modelagem unidimensional permanente e não-permanente, em canais naturais ou artificiais, além de ser gratuito. (Santos, 2013). O HEC RAS utiliza o método das diferenças finitas para solucionar as equações de Saint Venant (Brunner, 2016). Lauriano (2009) indica as informações necessárias, como, a condição de contorno de montante, a condição de contorno de jusante, as seções transversais ao longo do curso d'água e os coeficientes de rugosidade das seções.

2.2. Dados fluviométricos

Todos os dados fluviométricos foram obtidos a partir do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SINIRH) vinculado à ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Ana 2023a, 2023b e 2023c).

Além do Rio Uruguai, o modelo representou 15 afluentes (Figura 2) no trecho entre a UHE Foz do Chapecó (a montante do Rio do Mel) e a estação Alto Uruguai, (imediatamente a jusante do Lajeado São Francisco). O conjunto de bacias hidrográficas denominadas como “outras drenagens” não foi considerado para execução do modelo em função de apresentar um escoamento difuso de menor proporção. A área denominada como “Montante Rio Uruguai” representa a bacia hidrográfica contribuinte para a primeira estação fluviométrica do trecho.

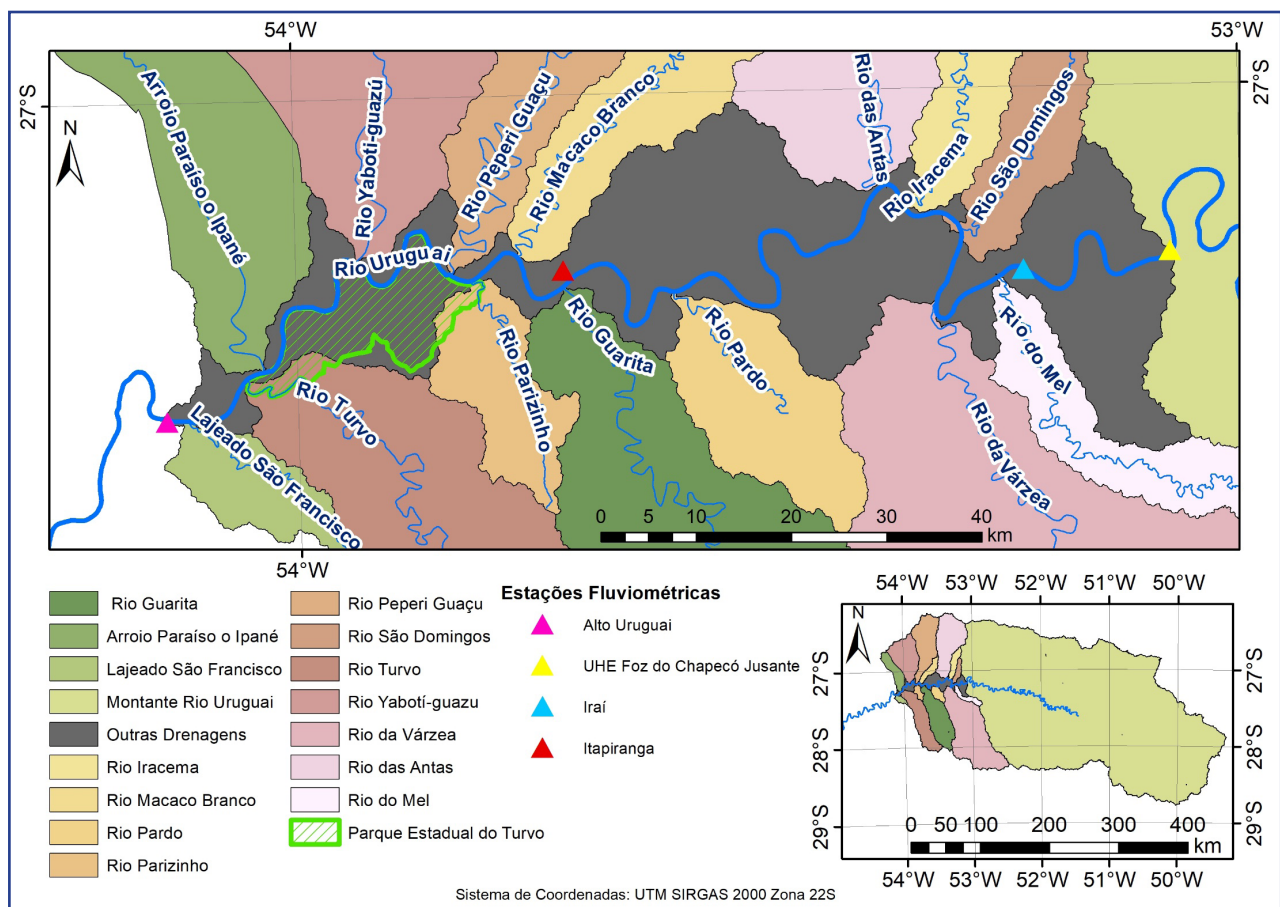
As estações fluviométricas convencionais possuem séries de médias diárias de medições às 7:00 h e às 17:00 h (Naguettini e Pinto, 2007; Azevedo Netto et al., 1998). Para o estudo fluviométrico do Rio Uruguai foram utilizadas séries históricas de estação telemétricas, que são mais detalhadas do que as séries das estações fluviométricas convencionais, com medições a cada 1 hora ou a cada 15 minutos, dependendo da estação. No trecho em estudo, estão disponíveis quatro estações telemétricas, sendo estas: UHE Foz do Chapecó Jusante (74050000); Iraí (74100000); Itapiranga (74329000); e Alto Uruguai (74500000).

Foram avaliadas as séries históricas dessas estações, no período entre 13/01/2022, às 12:00 h, e 13/02/2022, às 12:00 h para a simulação do regime hídrico atual do Rio Uruguai, sob influência dos pulsos de vazão ocasionados pela operação da UHE Foz do Chapecó.

Para os tributários do Rio Uruguai, além das estações telemétricas, também foram utilizados dados de estações fluviométricas convencionais. Apenas as estações mais próximas às confluências com o Rio Uruguai foram escolhidas, sendo elas: PCH Flor do Sertão Jusante (74324000) no Rio das Antas; Linha Jataí (74295000) no Rio Iracema; Palmitinho (74370000) no Rio Guarita; Passo Rio da Várzea (74270000) no Rio da Várzea; Raigão Alto (74424500) no Rio Peperi Guaçú; e Três Passos (74470000)

no Rio Turvo. No caso de tributários sem dados fluviométricos disponíveis, foram inseridas no modelo vazões com valores constantes, estimadas a partir do balanço das vazões médias disponíveis.

Figura 2 – Mapa hidrográfico do trecho entre a UHE Foz do Chapecó (a montante da confluência com o Rio do Mel) e a estação Alto Uruguai (imediatamente a jusante da confluência com o Lajeado São Francisco), com indicação do Rio Uruguai e seus principais afluentes, bem como a delimitação de cada uma das respectivas bacias hidrográficas



Fonte: Organizado pelos autores (nov, 2023)

2.3 Análise de continuidade das vazões do Rio Uruguai

A análise de continuidade se baseia no princípio de que a vazão em uma seção de um rio é sempre maior ou igual à soma das vazões dos cursos d'água contribuintes a montante. Collischonn, Sorribas e Paiva (2021) apresentam um exemplo hipotético onde a confluência dos rios A e B forma o rio C. Imagine que os rios A e B tiveram suas

vazões estimadas em 2,1 m³/s cada e, o rio C teve sua vazão estimada em 4,1 m³/s. Como a soma das vazões a montante da confluência (4,2 m³/s) é maior que a jusante (4,1 m³/s), se estabelece uma incompatibilidade com a continuidade de vazões, pois gera uma vazão incremental negativa (-0,1 m³/s) de montante para jusante.

Quadro 2 – Avaliação de continuidade das vazões observadas do Rio Uruguai

Estação	Área de Drenagem (km ²)	Vazão Média Observada (m ³ /s)	Análise de Continuidade - Incremento de Vazão (m ³ /s)	Vazão Média Estimada (m ³ /s)	Diferença entre Vazões Médias Estimadas e Observadas (m ³ /s)
UHE Foz do Chapecó	61600	533.62	----	----	0
Iraí	61900	527.97	-5.65	534.77	6.8
Itapiranga	72300	643.25	115.28	574.75	-68.5
Alto Uruguai	82300	613.18	-30.07	----	0

Fonte: Organizado pelos autores (fev, 2023)

Quando aplicada às vazões médias das estações do Rio Uruguai (Quadro 2), a análise demonstrou falhas nas condições de continuidade, gerando vazões incrementais negativas. A questão foi solucionada usando método da vazão incremental específica (Collischonn, Sorribas e Paiva, 2021), que consiste em tomar a região como homogênea, associando cada área de drenagem incremental a uma vazão específica incremental. As vazões de entrada (estação UHE Foz do Chapecó Jusante) e saída (estação Alto Uruguai) foram tomadas como corretas e, foram estimadas novas vazões médias para as estações Iraí e Itapiranga. A diferença entre as vazões médias estimadas e observadas foram adicionados às séries dessas estações, validando a continuidade das vazões, sem causar deformações no hidrograma.

2.4 Informação georreferenciada

O modelo hidrodinâmico solicita a inserção de uma linha contínua georreferenciada que represente o canal principal do rio, o qual é utilizado para determinar distâncias percorridas no modelo hidrológico e outros parâmetros hidrodinâmicos da simulação do escoamento. O mapeamento foi realizado manualmente, sobre imagens de

satélite (Google Earth, 2023), buscando identificar um canal estreito e profundo no leito do Rio Uruguai conhecido localmente como “canalão” (Figura 3), que acompanha longitudinalmente o Rio Uruguai ao longo de toda a extensão da área de estudo, ora nas proximidades da margem direita, ora nas proximidades da margem esquerda.

Figura 3 – Imagens de satélite indicando o canal central mais profundo localizado no leito do Rio Uruguai, ora na margem direita, ora na margem esquerda



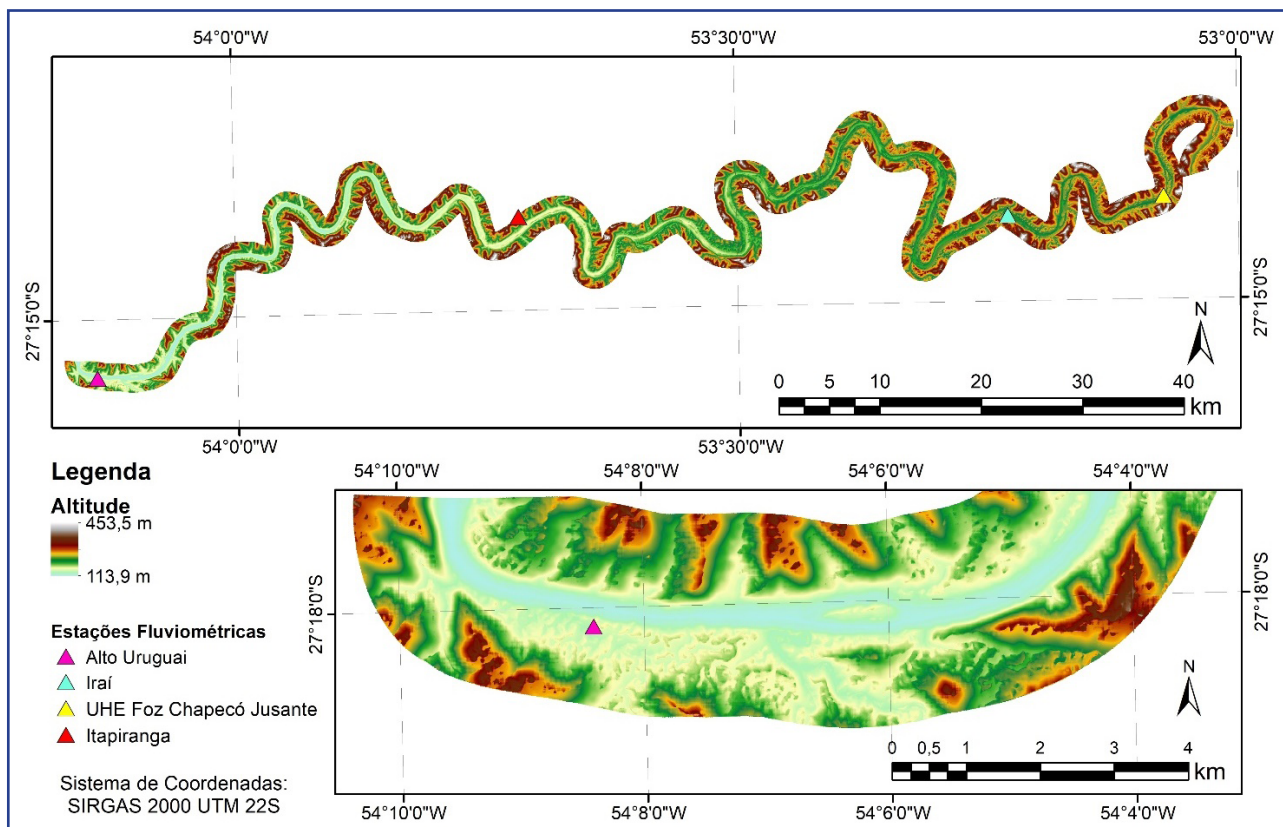
Fonte: Google Earth (2023)

Para representar o leito do Rio Uruguai nas simulações hidrológicas, foi criado um modelo topobatimétrico. Sua elaboração tomou por base o MDE (modelo digital de elevação) do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global, com resolução de 30 m, obtido no site do departamento de Pesquisas Geológicas dos Estados Unidos da América, U.S. Geological Survey, (USGS, 2023). Cabe ressaltar que, por não estar balisado por medições batimétricas, o modelo topobatimétrico não permite estabelecer, de forma acurada, uma relação cota-vazão para as seções transversais ao longo do trecho.

O MDE original passou por refinamentos sucessivos até a obtenção do resultado final, com resolução de 5 m. Em cada refinamento, foram geradas curvas de nível, que depois foram suavizadas, para então serem utilizadas na interpolação de um novo MDE. Foi utilizado o interpolador *Topo to Raster*, do software ArcGIS 10.8, que gera uma superfície hidrológicamente correta (ESRI, 2019). Nas curvas de nível do MDE original foi necessário retirar os trechos que atravessavam leito do Rio Uruguai, já

que representavam a superfície líquida. A Figura 4 ilustra o modelo topobatimétrico resultante, com destaque para o trecho próximo à estação fluviométrica Alto Uruguai.

Figura 4 – Modelo topobatimétrico do leito e margens do Rio Uruguai, obtido por interpolação partir dos dados dos MDE do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Em destaque, o final do trecho em estudo, nas proximidades da estação fluviométrica Alto Uruguai



Fonte: Organizado pelos autores (out, 2023)

2.5 Indicadores de performance do modelo

Para validar os resultados da simulação foram avaliados o Erro de Contabilidade dos Volumes (*Overall Volume Accounting Error*), o Coeficiente de Determinação (R^2), o Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) e sua versão logarítmica (NS_{\log}).

O Erro de Contabilidade dos Volumes é um indicador da qualidade do processamento de dados das simulações. De acordo com Acheampong, Gyamfi e Arthur (2023) a simulação é considerada muito acurada quando o erro é menor do que 1%.

O Coeficiente de Determinação (R^2) varia de 0 a 1, onde valores maiores significam que os dados simulados conseguem explicar e se ajustar linearmente melhor aos dados observados (Antunes, 2015).

O coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) é amplamente utilizado para avaliar simulações e é mais sensível aos erros nas vazões máximas do que nas vazões mínimas (Lindner, 2007). O coeficiente NS indica o ajuste entre os dados simulados e observados na reta 1:1, variando de 0 a 1 (Zhang et al., 2007 apud Viola, 2008). A versão logarítmica do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS_{\log}) verifica se o modelo está simulando adequadamente os períodos de vazões mínimas (Lindner, 2007 e Viola, 2008).

Gotschalk e Motovilic (2000 apud Viola, 2008) adotam a seguinte classificação: quando NS é igual a 1, ocorre um ajuste perfeito; quando NS é maior do que 0,75, o modelo é considerado adequado e bom; quando NS está entre 0,36 e 0,75 o modelo é considerado aceitável. Essa classificação também foi aplicada ao coeficiente NS_{\log} .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para caracterizar o regime hidrológico atual do Rio Uruguai, foi realizada a Simulação 1, utilizando o período entre 13/01/2022 às 12:00 h e 13/02/2022 às 12:00 h. A Simulação 1 teve por objetivo reproduzir o regime de vazões do Rio Uruguai durante um período de estiagem (baixas vazões), mostrando o comportamento hidrológico sob o efeito da operação da UHE Foz do Chapecó, de forma a representar a propagação dos pulsos de vazão entre as estações UHE Foz do Chapecó Jusante e Alto Uruguai, durante a operação regular da usina. Essa simulação também foi utilizada para a calibração do modelo, uma vez que os dados simulados puderam ser comparados aos dados observados nas estações de Iraí, Itapiranga e Alto Uruguai.

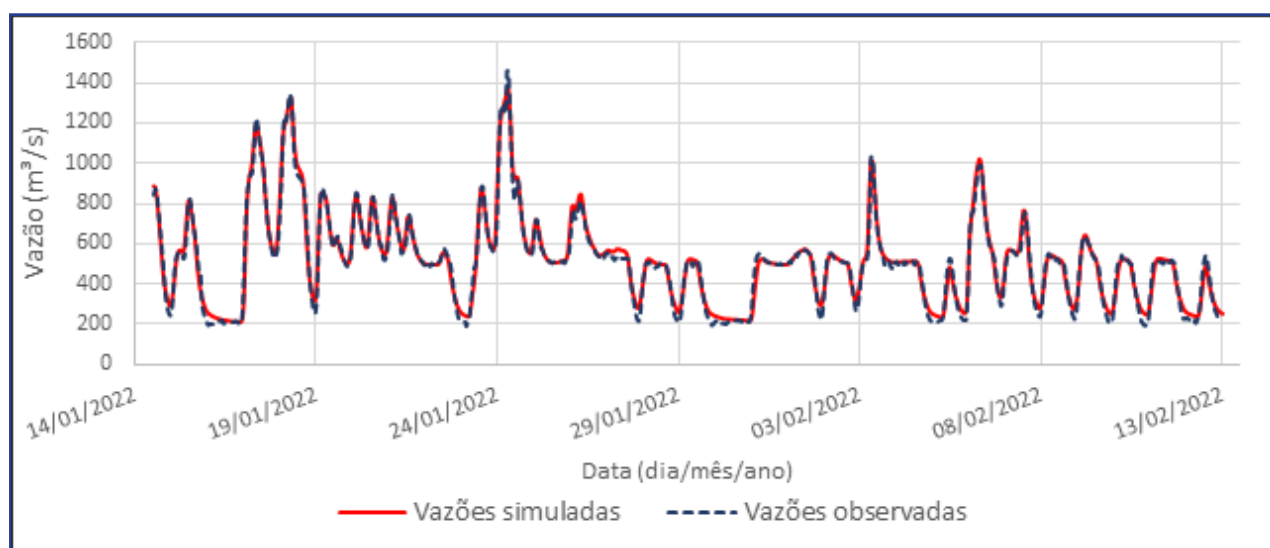
Os melhores resultados da calibração (Simulação 1) foram obtidos utilizando como coeficiente de Manning o valor de 0,085 nas zonas marginais e 0,027 no canal principal do rio. Os fatores de correção de n estão indicados na Tabela 1 e são compatíveis com os apresentados por Boldt, Lant e Kolarik (2018) e Davis (2010).

Tabela 1 – Fatores utilizados nas simulações para a correção do coeficiente de Manning (n) conforme variação da vazão no Rio Uruguai.

Vazão (m ³ /s)	Fator de Correção	Vazão (m ³ /s)	Fator de Correção
250	1,500	622,8	0,989
300	1,380	746,496	0,910
360	1,270	895,796	0,837
432	1,168	1074,955	0,770
518,4	1,075	7289,946	0,708

Fonte: Organizado pelos autores (fev, 2023)

Figura 5 – Hidrogramas de vazões do Rio Uruguai observadas e simuladas (Simulação 1, regime atual sob efeito dos pulsos de vazão provocados pela operação da UHE Foz do Chapecó) para a estação Iraí



Fonte: Organizado pelos autores (fev, 2023)

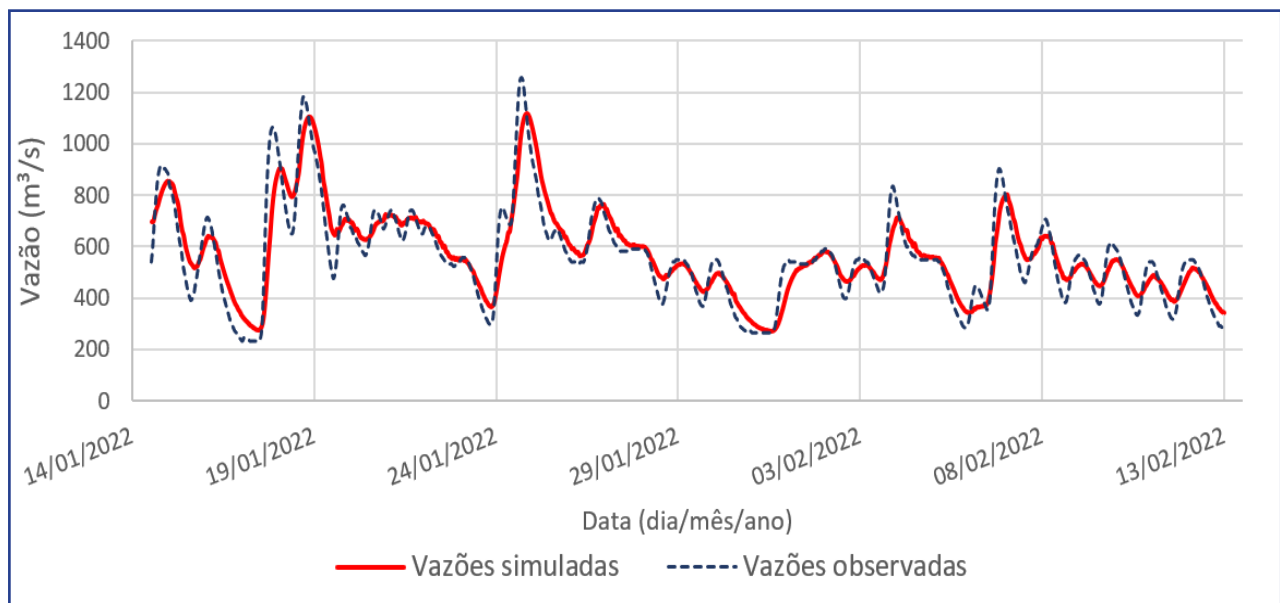
Embora o período de simulação seja de 31 dias, o modelo demonstrou instabilidades no período inicial das simulações e, por esse motivo, não foram consideradas as vazões que resultaram das primeiras 36 horas de simulação do modelo hidrológico.

Na estação Iraí, localizada a apenas 23 km a jusante da UHE Foz do Chapecó, os hidrogramas de vazões simuladas e observadas (Figura 5) obtiveram coeficiente de determinação (R^2) de 0,984. O coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) alcançou 0,983 e sua

versão logarítmica (NS_{\log}) obteve o valor de 0,972, indicando elevada acurácia das vazões simuladas pelo modelo em relação às vazões observadas nessa estação fluviométrica.

Na estação Itapiranga, 112 km a jusante da UHE Foz do Chapecó, os hidrogramas de vazões simuladas e observadas (Figura 6) alcançaram um R^2 igual a 0,8562. O coeficiente NS foi de 0,8515 e o coeficiente NS_{\log} alcançou 0,8557, demonstrando a adequação das vazões simuladas pelo modelo em relação às vazões observadas nessa estação fluviométrica, embora em menor escala que o obtido na estação Iraí.

Figura 6 – Hidrogramas de vazões do Rio Uruguai observadas e simuladas (Simulação 1, regime atual sob efeito dos pulsos de vazão provocados pela operação da UHE Foz do Chapecó) para a estação Itapiranga



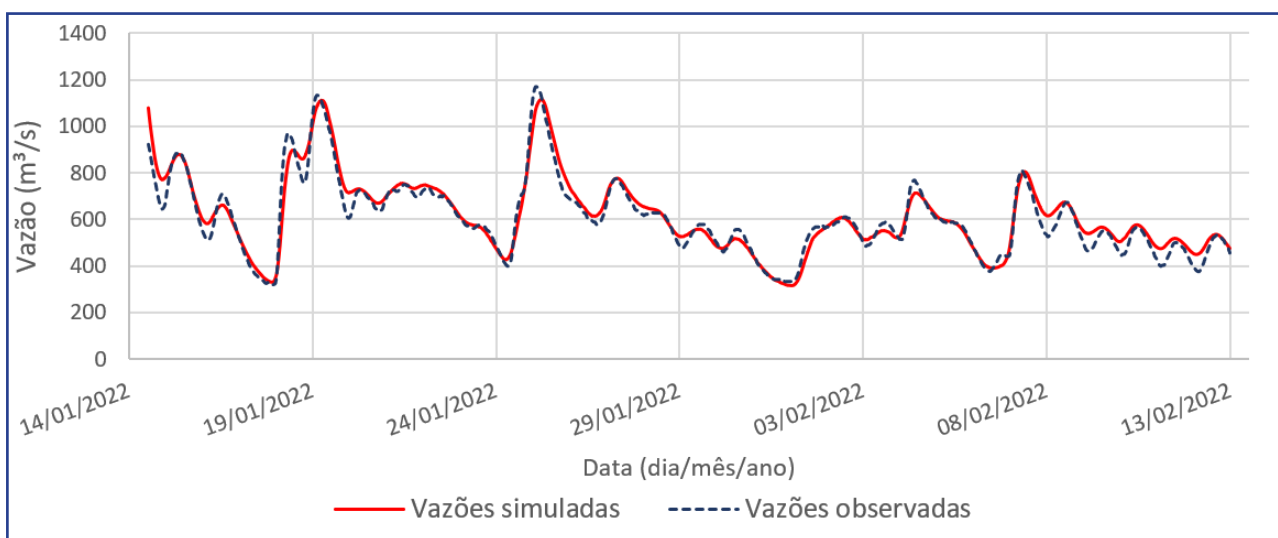
Fonte: Organizado pelos autores (fev, 2023)

Na estação Alto Uruguai, localizada a 180 km a jusante da UHE Foz do Chapecó, as vazões simuladas e observadas geraram um coeficiente R^2 de 0,940. O coeficiente NS foi de 0,931 e o NS_{\log} foi de 0,934 (Figura 7). Os resultados indicam melhor acurácia que em relação à estação Itapiranga, aproximando-se dos valores obtidos na estação Iraí.

A Simulação 1 gerou dados consistentes com os observados nas estações fluviométricas de Iraí, Itapiranga e Alto Uruguai, com coeficientes de determinação (R^2) entre 0,856 e 0,984, indicando um bom ajuste linear; coeficientes NS variando de

0,851 a 0,983, indicando a eficiência do modelo em simular as vazões mais elevadas; e coeficientes NS_{\log} de 0,856 a 0,972, o que aponta que o modelo é também adequado para simular as vazões mínimas. Essa simulação obteve um Erro de Contabilidade dos Volumes da ordem de 0,09215%, indicando uma um processamento de dados acurado do modelo.

Figura 7 – Hidrogramas de vazões do Rio Uruguai observadas e simuladas (Simulação 1, regime atual sob efeito dos pulsos de vazão provocados pela operação da UHE Foz do Chapecó) na estação Alto Uruguai



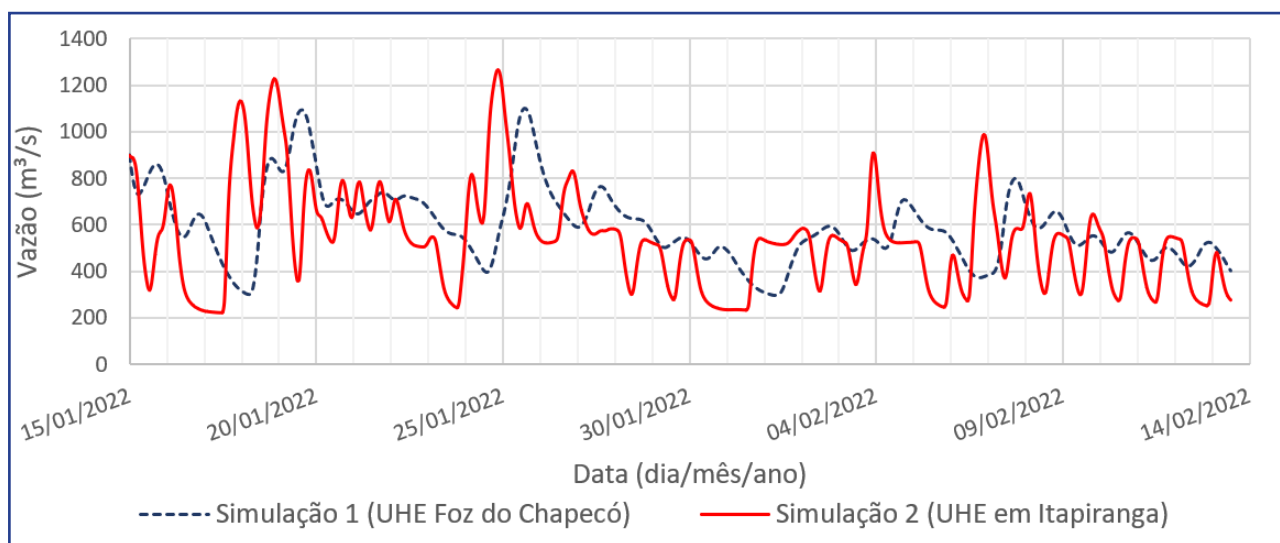
Fonte: Organizado pelos autores (fev, 2023)

Esses resultados foram considerados representativos para validar o modelo hidrodinâmico do rio, para o trecho e para o regime de vazões observados no período de estudo, à semelhança do modelo desenvolvido na bacia do Rio Grande (MG) por Viola (2008), que validou sua simulação de vazões obtendo R^2 acima de 0,9, NS acima de 0,815 e NS_{\log} acima de 0,823.

A partir da Simulação 1 (calibração do modelo), se procedeu com a execução da Simulação 2, no intuito de avaliar o efeito sobre o trecho do PET, considerando um regime hipotético de pulsos vazões semelhantes aos produzidos pela UHE de Foz do Chapecó e que resultem da operação de uma UHE a ser instalada em Itapiranga. Para a realização da Simulação 2 foi considerado que essa UHE teria um regime de operação

igual ao da UHE de Foz do Chapecó. Na Simulação 2, todos os elementos do modelo localizados a montante do local indicado como o barramento da UHE em Itapiranga foram removidos da simulação. A jusante do barramento previsto, foram mantidas rigorosamente as configurações da Simulação 1. A série de vazões da estação UHE Foz do Chapecó Jusante foi transposta diretamente para o local projetado para a UHE em Itapiranga. A simulação permitiu avaliar os efeitos da operação de uma possível UHE instalada em Itapiranga, sobre o regime de vazões observado (por meio da Simulação 1) nos Saltos do Yucumã (PET) (Figura 8).

Figura 8 – Hidrogramas simulados para o Salto do Yucumã demonstrando as vazões da Simulação 1, sob o efeito dos atuais pulsos gerados pela UHE Foz do Chapecó e, as vazões da Simulação 2, sob o efeito dos pulsos de uma UHE hipotética em Itapiranga, similar a UHE de Foz do Chapecó



Fonte: Organizado pelos autores (fev, 2023)

Os resultados da Simulação 2 indicam um Erro de Contabilidade dos Volumes de 0,005163%, indicando um excelente desempenho de processamento de dados do modelo. A referência indicada por Acheampong, Gyamfi e Arthur (2023) é a obtenção de valores que estejam abaixo de 1%.

Os resultados das simulações foram avaliados quantitativamente e comparados por meio das variáveis vazão máxima, vazão mínima, vazão média das máximas diárias e vazão média das mínimas diárias, assim como pelas amplitudes correspondentes (Tabela 2).

Tabela 2 – Comparação entre as vazões simuladas no Salto do Yucumã para o regime atual de vazões (Simulação 1), sob o efeito da UHE Foz do Chapecó e o regime hipotético de vazões (Simulação 2), sob o efeito dos pulsos de uma UHE em Itapiranga

Vazões Avaliadas	Simulação 1 (m³/s)	Simulação 2 (m³/s)	Variação (m³/s)	Variação (%)
Vazão Mínima	295,83	223.36	-72.47	-24.5%
Vazão Máxima	1101,19	1267.25	166,06	15.1%
Amplitude	805.36	1043.89	238.53	29.6%
Média das Mínimas Diárias	512.54	373.35	-139.18	-27.2%
Média das Máximas Diárias	696.11	781.21	85.10	12.2%
Amplitude das Médias Diárias	183.57	407.85	224.28	122.2%

Fonte: Organizado pelos autores (fev, 2023)

De acordo com os resultados, entre a Simulação 1 e a Simulação 2 houve uma redução de 72,47 m³/s (24,5%) na vazão mínima do período e uma redução de 139,18 m³/s (27,2%) na vazão média das mínimas diárias. Esses resultados apontam para a tendência de que a operação de uma hidrelétrica com vazões semelhantes aos da UHE Foz do Chapecó em Itapiranga reduzam as vazões mínimas atuais do Rio Uruguai no Parque Estadual do Turvo, e conseqüentemente os níveis d'água.

A comparação entre a vazão máximas do período nas Simulações 1 e 2 mostra um aumento de 166,06 m³/s (15,1%). Já a vazão média das máximas diárias aumentou 85,10 m³/s (12,2%). Esses valores indicam uma tendência à intensificação das vazões máximas na região do Salto do Yucumã, sobre o efeito da operação de uma UHE operando em Itapiranga, com pulsos de vazões semelhantes aos da UHE Foz de Chapecó.

Como consequência da redução das vazões mínimas e do aumento das vazões máximas, houve um aumento significativo das amplitudes. Foi obtido um aumento de 238,53 m³/s (29,6%) na amplitude entre as vazões mínimas e máximas de todo o período e, um aumento de 224,98 m³/s (122,2%) na amplitude entre a vazão média das mínimas diárias e a vazão média das máximas diárias.

Os efeitos da implantação da UHE Foz de Chapecó nos níveis d'água do Rio Uruguai, no trecho do Salto do Yucumã (RS), foram monitorados por Pasini (2019), que constatou fortes oscilações horárias no nível do rio na zona da fratura, ocasionando a cobertura parcial do Salto diariamente. Seu estudo também evidenciou um aumento expressivo da mediana das vazões máximas da ordem de 1015,5 m³/s, após o início da operação da UHE Foz do Chapecó. Mancuso, Mancuso e Nery (2022) calcularam em 7,15 km/h a velocidade média da corrente (avanço da onda) no Rio Uruguai entre a UHE Foz de Chapecó e o Salto do Yucumã e desenvolveram equações que permitem estimar os níveis de água do Rio Uruguai no trecho do Salto do Yucumã, a partir de dados da estação fluviométrica de Itapiranga, localizada a aproximadamente 28,4 km do Salto. No presente estudo, os resultados indicam que a implantação de uma UHE em Itapiranga, com operação semelhante à de Foz do Chapecó poderá intensificar o regime de vazões mínimas e máximas, gerando variações de níveis mais rápidas e de maior amplitude no Salto do Yucumã.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo indica que, caso seja construída uma hidrelétrica em Itapiranga com regime de operação semelhante ao da UHE Foz do Chapecó, os efeitos hidrológicos no trecho do Parque Estadual do Turvo serão sentidos em decorrência do aumento das vazões máximas, da diminuição das vazões mínimas e do conseqüente aumento das amplitudes entre vazões máximas e mínimas. Esse efeito refletirá diretamente sobre os níveis do Rio Uruguai no Salto do Yucumã e as oscilações sub-horárias que atualmente enfrenta.

Com relação aos dados fluviométricos utilizados no modelo, o Rio Uruguai dispunha dados detalhados (estações telemétricas), o que está alinhado com o nível de detalhe requerido para a análise feita no presente trabalho. Entretanto, em contraste com os dados detalhados das estações do Rio Uruguai, estão os tributários no trecho em estudo, cujos dados disponíveis eram, em sua maioria, pouco detalhados (estações convencionais) ou não existiam (tributários sem dados). Recomenda-se a

realização de estudos hidrológicos mais profundos que objetivem determinar dados mais detalhados de vazões desses afluentes para melhorar o ajuste entre os dados observados e simulados em futuras atualizações do modelo hidrodinâmico.

O fato da avaliação de continuidade de vazões ter falhado para as estações do Rio Uruguai sucinta uma análise mais criteriosa desses dados, em busca de falhas que possam ter impactos negativos na confiabilidade das medições.

O modelo topobatimétrico gerado por interpolação auxiliou na estruturação do modelo numérico, agregando detalhes da topografia no leito do Rio Uruguai ao longo do trecho em estudo. Entretanto, dados mais detalhados da batimetria do trecho poderiam auxiliar a aumentar a acurácia das simulações.

Como principal contribuição deste trabalho, destaca-se o próprio desenvolvimento do modelo hidrodinâmico, com calibração adequada, para realizar simulações de diferentes cenários, possibilitando a análise das alterações do regime hídrico atual no Rio Uruguai entre a UHE Foz de Chapecó e a estação fluviométrica do Alto Uruguai.

REFERÊNCIAS

ACHEAMPONG, J. N.; GYAMFI, C.; ARTHUR, E. Impacts of retention basins on downstream flood peak attenuation in the Odaw river basin, Ghana. **Journal of Hydrology: Regional Studies** **47**. Elsevier. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581823000514>. Acesso em: abr. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Catálogo de Metadados da ANA**. Brasília, 2023a. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>. Acesso em: fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras** – Edição Especial, Brasília: ANA, 2015. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/regioes-hidro-graficas2014.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Sistema de monitoramento hidrológico**: Hidroweb. Brasília, 2023b. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Sistema HIDRO - Telemetria**. Brasília, 2023c. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/EstacoesCadastro.aspx>. Acesso em: fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Despacho 1.667, de 12 de junho de 2017. Interessado: Múltipla Participações Ltda. **Diário Oficial da União**. Poder Executivo, Brasília, DF, sexta-feira, 16 jun. 2017a. seção 1, p. 40.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Processo nº 48500.002965/2017-89 (Volume 1)**. UHE Itapiranga - estudos de viabilidade. Interessado(s): Múltipla Participações Ltda. Procedência: Superintendência de Concessões e Autorizações de Geração – SCG. 2017b.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Processo nº 48500.001943/2004-98**. UHE Itapiranga - Viabilidade - 724.6 MW. Interessado(s): ANEEL/SPH e DESENVIX S/A. 2004.

ANDRADE, C. J. S. **Modelagem hidráulica e hidrológica para diagnóstico de áreas susceptíveis a inundações com limitações de dados fisiográficos e hidrometeorológicos: estudo de caso Guidoal-MG**. Dissertação (mestrado em engenharia ambiental) Universidade Federal de Ouro Preto: Ouro Preto. 2017. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/8869>. Acesso em: fev 2023.

ANTUNES, T. A. **Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do alto Canoas através do modelo SWAT**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Universidade do Estado de Santa Catarina: Lages. 2015. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/1482/Disserta_o_Thiago_Alves_Antunes_15683966069017_1482.pdf. Acesso em: fev. 2023.

AZEVEDO NETTO, J. M. et al. **Manual de hidráulica**. 8. ed. 1998. 10. reimpressão, São Paulo: Edgard Blücher, p. 669, 2012.

BOLDT J. A., LANT J. G., KOLARIK N. E. **Flood-Inundation Maps for the North Fork Kentucky River at Hazard, Kentucky**. Scientific Investigations Report 2018–5122. U.S. Geological Survey: Reston, Virginia. 2018. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/publication/sir20185122>. Acesso em: fev. 2023.

BRUNNER, G. W. **HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual**. Davis, California, USA: U.S. Army Corps of Engineers, 2016. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation.aspx>. Acesso em: 27 dez. 2019.

COLLISCHONN, W.; SORRIBAS, M. V.; PAIVA, R. C. D. **Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional. Relatório técnico: Avaliação do método de estimativa de vazão de referência em locais sem dados a partir da vazão específica incremental**. IPH-ANA-HGE-SR-R7. UFRGS e IPH: Porto Alegre. ANA: Brasília, 2021. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/253833>. Acesso em: fev. 2023.

DAVIS M. **Numerical Simulation of Unsteady Hydrodynamics in the Lower Mississippi River**. Thesis (Master of Science in Civil & Environmental Engineering, Hydraulic Engineering) University of New Orleans: New Orleans. 2010. Disponível em: <https://scholarworks.uno.edu/td/1126/>. Acesso em: fev. 2023.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). **ArcGIS Desktop 10.8**. Software, versão 10.7.0.10450. 2019.

GOOGLE EARTH. **Google Earth Pro**. Software, 2023. Disponível em: <https://www.google.com/intl/pt-BR/earth/about/versions/>. Acesso em: fev. 2023.

LAURIANO, A. W. **Estudo de ruptura da Barragem de Funil: comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte. 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/REPA-82THXE>. Acesso em: fev. 2023.

LINDNER, E. A. **Estudo de eventos hidrológicos extremos na Bacia do Rio do Peixe – SC com aplicação de índice de umidade desenvolvido a partir do Tank Model**. Tese (Doutorado em Engenharia ambiental) Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis. 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/89589>. Acesso em: fev. 2023.

MANCUSO M.A.; MANCUSO, S.; NERY, J.B. Estimativa dos níveis do rio Uruguai no Salto do Yucumã (PET), sob o efeito de pulsos de vazão provocados pela UHE foz do Chapecó. **Engenharia e Tecnologia ambiental**. Org. Passini, A.F.C. Munaretto L.F, Mancuso, M.A. Soares, M.B., Camargo, M. 2.ed. Frederico Westphalen, RS: FACOS-UFSM, p.144-161. 2022.

MANCUSO, M.; LAMBERTY, D. Desafios e demandas em geologia de engenharia e ambiental na região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, Vol. 8, nº 1 e 2, 2018. Disponível em: V. 8, n. 01 e 02 (2018) | ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia Ambiental. Acesso em: fev. 2023.

MANYARI, W. V. **Impactos ambientais a jusante de hidrelétricas o caso da usina de Tucuruí, PA**. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético e Ambiental) Universidade Federal do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro. 2007. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/index.php/pt/publicacoes/teses-e-dissertacoes/2007/1036-impactos-ambientais-a-jusante-de-hidreletricas-o-caso-da-usina-de-tucuru-i-pa>. Acesso em: fev. 2023.

MOVIMENTO DOS ATINGIDOS POR BARRAGENS (MAB). Comemoração de 7 de setembro reacende luta contra barragem de Itapiranga. **Portal de notícias do MAB**. 06 set. 2019. Disponível em: <https://www.mabnacional.org.br/noticia/comemora-7-setembro-reacende-luta-contra-barragem-itapiranga>. Acesso em: 14 dez. 2019.

NAGUETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM. 552 p. 2007. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Livro-%22Hidrologia-Estatistica%22-981.html>. Acesso em: 15 dez. 2019.

PARQUE ESTADUAL DO TURVO (PET). **Portal do Parque Estadual do Turvo**. 2019. Disponível em: <https://parquedoturvo.wordpress.com/>. Acesso em: 14 dez. 2019.

PASINI, F. **Regime de escoamento do Rio Uruguai no trecho entre a hidrelétrica de Foz do Chapecó e o Salto do Yucumã**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS. p. 91, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/17376>. Acesso em: fev. 2023.

PINTO, A. C. B. **Modelo unidimensional para simulação de cheias em rios e áreas urbanas**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro. 2007. Disponível em: https://minerva.ufrj.br/F/?func=direct&doc_number=000687079&local_base=UFR01. Acesso em: fev. 2023.

SANTOS K. A. dos. **Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude: estudo de caso, bacia do Rio Mundaú.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Pernambuco: Recife. 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/11624> . Acesso em: fev. 2023.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). **HEC-RAS:** River Analysis System. Software, versão 6.3.1. 2022. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/download.aspx>. Acesso em: nov. 2022.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Earth Explorer.** 2023. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 17 fev. 2023.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil. 1975.

VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica na região do alto Rio Grande a montante do reservatório de Camargos/CEMIG.** Dissertação de (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Lavras: Lavras. 2008. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/handle/1/3452>. Acesso em: fev. 2023.

Contribuições de autoria

1 – Luiz Eduardo Cavallo Pfeil

Universidade Federal de Santa Maria, Mestre em Engenharia Ambiental
<https://orcid.org/0009-0003-6542-6096> • lepfeil@hotmail.com
Contribuição: Escrita - primeira redação, investigação, metodologia

2 – Malva Andrea Mancuso

Universidade Federal de Santa Maria, Doutora em Geociências
<https://orcid.org/0000-0002-8252-534X> • malvamancuso@gmail.com
Contribuição: Supervisão

3 – Willian Fernando de Borba

Universidade Federal de Santa Maria, Doutor em Engenharia Civil
<https://orcid.org/0000-0001-5717-1378> • borbawf@gmail.com
Contribuição: Escrita - revisão e edição

Como citar este artigo

PFEIL, L. E. C.; MANCUSO, M. A.; BORBA, W F. de. Modelagem hidrodinâmica do Rio Uruguai no trecho do Parque Estadual do Turvo. **Geografia Ensino & Pesquisa**, Santa Maria, v. 28, e85561, 2024. Disponível em: 10.5902/2236499485561. Acesso em: dia mês abreviado. ano.