

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELO REDUZIDO E MODELOS COMPUTACIONAIS UNI E BIDIMENSIONAIS

Murilo de Oliveira Gonçalves¹; José Junji Ota²

RESUMO – Os modelos hidráulicos reduzidos são utilizados para complementar e/ou confirmar os cálculos realizados em projeto, além de possibilitar o estudo, em escala reduzida, dos fenômenos físicos. Mas devido ao elevado custo de investimento, os modelos reduzidos são executados apenas em grandes e complexas obras. Por conta disso, tem-se tornado cada vez mais frequente a utilização e aceitação de modelos computacionais, sejam eles, unidimensionais, bidimensionais ou, até mesmo, tridimensionais. Este é o resultado da crescente evolução da capacidade de processamento dos hardwares, que nos permitem o acesso a ferramentas tão poderosas. Diante dessa evolução, torna-se necessária a análise comparativa das grandezas entre modelo físico e o modelo computacional, confrontando a precisão dos resultados entre os modelos para que, assim, permita-se uma adequação do uso de modelos computacionais em diferentes etapas de complexos projetos hidráulicos, bem como cotejar a precisão dos resultados em cada modelagem computacional. Nesse sentido, este artigo trata de uma análise comparativa dos resultados obtidos das modelagens computacionais unidimensional e bidimensional, respectivamente, utilizando os softwares HEC-RAS (U. S. Army Corps of Engineers) e RiverFlow2D[®] (Hydronia LLC), com os dados observados em campo e os dados obtidos do modelo hidráulico reduzido realizado pelo Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR) da Universidade Federal do Paraná.

ABSTRACT – Reduced hydraulic models are used to complement and confirm the calculations carried out in the design, besides making it possible to study, in a reduced scale, the physical phenomena. Because of high cost of investment, the reduced models are only executed in large and complex works. For this reason, the use and acceptance of computational models, either unidimensional, two-dimensional or even three-dimensional, become increasingly frequent. This is the result of the increasing evolution of the hardware processing capacity, which currently allows us access to such powerful tools. In view of this evolution, it is necessary to compare the magnitudes between the physical model and the computational model, comparing the precision of the results between the models to allow an adequate use of computational models in different stages of complex projects, as well as to compare the accuracy of the results in each computational modeling. In this sense, this article will deal with a comparative analysis of the results obtained from one-dimensional and two-dimensional computational models, respectively, using the HEC-RAS (U. S. Army Corps of Engineers) and RiverFlow2D[®] (Hydronia LLC) software, with the data observed in the field and the data obtained from the reduced hydraulic model performed by the Hydraulic and Hydrology Center Professor Parigot de Souza (CEHPAR) of the Federal University of Paraná.

Palavras-Chave – Análise comparativa de modelos hidráulicos, modelo hidráulico reduzido, modelo hidráulico computacional.

1) Mestrando do PPGERHA - UFPR: Centro Politécnico, Setor de Tecnologia - Jardim das Américas, Curitiba - PR, murilo.goncalves@live.com
2) Professor adjunto do DHS - PPGERHA - UFPR: Centro Politécnico, Setor de Tecnologia - Jardim das Américas, Curitiba - PR, ota.dhs@ufpr.br

INTRODUÇÃO

Existem três maneiras de abordar a solução de um problema na engenharia hidráulica: por teoria e raciocínio; por experiência derivada de projetos semelhantes; ou investigando o problema e testando o projeto em um modelo, seja físico reduzido ou computacional.

Modelo hidráulico reduzido

Um modelo hidráulico reduzido é uma representação em escala de um escoamento hidráulico, onde as condições de contorno e o campo de fluxo devem ser dimensionados de maneira apropriada. Sendo comumente utilizado durante o estágio anterior ou inicial de projeto visando otimizar e garantir uma operação segura do estudo, apresentando um importante papel no processo de decisões e alterações necessárias para viabilização do projeto de engenharia em questão.

Modelo hidráulico computacional

Um modelo computacional é uma implementação de um modelo numérico em um sistema informático com os dados relevantes de um projeto específico. Os resultados do modelo computacional dependem de uma variedade de fatores, incluindo a qualidade dos dados do protótipo, detalhes do processamento de dados, possivelmente a organização interna dos cálculos e o tipo de computador usado.

As modelagens computacionais representam uma ferramenta moderna para determinar as profundidades e as velocidades de escoamento em rios e estruturas hidráulicas, assim como a duração das inundações em planícies. Basicamente, apresentam-se três diferentes modelos de simulação hidrodinâmica: (1) modelos computacionais unidimensionais, (2) bidimensionais e (3) tridimensionais. A escolha depende do problema particular, condições de contorno, quantidade de informações e levantamentos de campo disponibilizados.

MATERIAIS E MÉTODOS

Domínio estudado

O domínio estudado (Figura 1) compreende uma região de aproximadamente 13,0 km² e extensão de 5,5 km, iniciando-se a aproximadamente 1,0 km a montante da ilha, divisor físico das águas do rio com 3,5 km de extensão, até uma seção localizada a aproximadamente 1,0 km a jusante da ilha supracitada.

Figura 1 – Vista geral do domínio estudado.



Foram obtidos levantamentos topográfico e batimétrico para consolidação do modelo digital do terreno, informações do perfil da linha de água nos braços esquerdo e direito do rio, leituras das réguas ao longo do local de interesse e dados de medição de vazão realizadas no braço direito do rio.

Caracterização do trecho do rio

As margens são compostas por vegetação predominantemente rasa. Em alguns lugares percebe-se que o local é utilizado para pastagens e agricultura. Com menor frequência, pode ser observada ao longo do rio a ocorrência de uma vegetação mais densa, composta por árvores de 5 a 10 metros de altura.

Na região da ilha há predominância de vegetação rasa. Em alguns locais, com menor frequência, pode ser verificado o cultivo de hortaliças e a presença de regiões arborizadas com árvores de 5 a 10 metros de altura.

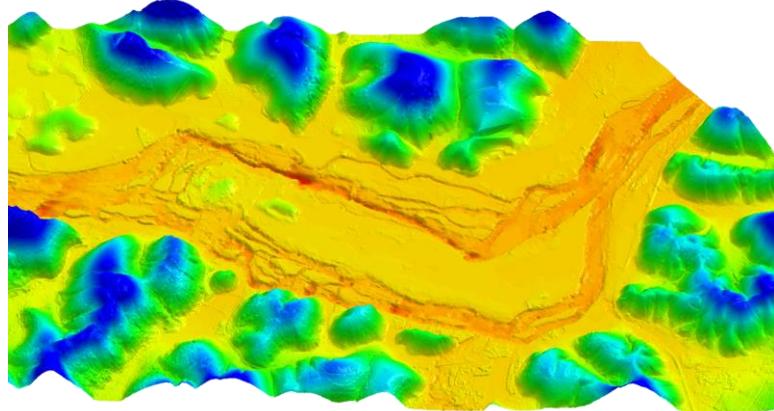
O trecho do rio a ser estudado possui leito rochoso, podendo ser visto diversos afloramentos rochosos. Detectou-se a presença de diversas corredeiras e controles hidráulicos ao longo do domínio estudado, dentre os observados, merecem destaque:

- Corredeiras formadas a montante da entrada do braço esquerdo e da ilha;
- No braço direito, logo após os afloramentos rochosos, foram identificadas diversas corredeiras formadas entre as pequenas ilhas existentes.

Modelo digital de terreno (MDT)

O modelo digital de terreno (Figura 2) utilizado neste estudo foi oriundo de levantamento topográfico a laser (LiDAR) consolidado com uma nuvem de pontos proveniente do levantamento batimétrico, assim, obtendo-se uma nuvem de pontos extremamente detalhada sobre a elevação do terreno.

Figura 2 – Modelo digital de terreno (MDT) consolidado com o levantamento batimétrico.



A nuvem de pontos resultante do levantamento topográfico a laser - LiDAR (*Light Detection And Ranging*) - classificada como terreno foi interpolada pelo método de triangulação de Delaunay, também utilizado para geração de curvas de nível. Face aos resultados apresentados e tendo em vista os critérios do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfico), pode-se afirmar que o modelo digital de terreno oriundo da nuvem de pontos LiDAR pode ser classificado com “Classe A” considerando curvas de nível equidistantes de metro em metro (recomendadas para representação cartográfica de mapas na escala 1:2.000).

A representação computacional da geometria da calha principal e das planícies do curso de água em análise se deu através da utilização de dados provenientes de levantamentos topográficos e batimétricos. Cabe lembrar que a qualidade dos levantamentos topobatimétricos, no que diz respeito à representação do leito do curso de água, sobretudo em uma região composta de diversos pontos de controle do escoamento e ilhas, facilmente detectáveis por meio de uma análise visual de imagens de satélite, está diretamente relacionada à precisão dos resultados da modelagem hidráulica.

Levantamentos de campo

Foram consideradas as leituras dos níveis de água ao longo do estirão fluvial (Tabela 1) e as vazões medidas com ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) a jusante da ilha.

Tabela 1 – Leituras dos níveis de água ao longo do estirão fluvial.

| Margem Esquerda | | Margem Direita | |
|-----------------|----------|----------------|----------|
| Ponto | N.A. (m) | Ponto | N.A. (m) |
| 20 | 63,251 | 42 | 63,276 |
| 19 | 63,205 | 41 | 63,369 |
| 18 | 63,178 | 39 | 63,107 |
| 17 | 62,603 | 38 | 63,105 |
| 16 | 62,446 | 37 | 61,379 |
| 15 | 62,077 | 36 | 61,306 |
| 14 | 61,703 | 35 | 61,250 |
| 13 | 61,701 | 34 | 61,035 |
| 12 | 61,669 | 33 | 60,850 |
| 11 | 61,424 | 32 | 60,717 |
| 10 | 61,389 | 31 | 60,720 |
| 9 | 61,240 | 30 | 60,639 |
| 8 | 60,705 | 29 | 60,597 |
| 7 | 60,466 | 28 | 60,562 |
| 6 | 60,434 | 27 | 60,524 |
| 5 | 60,398 | 26 | 60,538 |
| 4 | 60,677 | 25 | 60,515 |
| 3 | 60,235 | 24 | 60,501 |
| 2 | 60,104 | 23 | 60,405 |
| 1 | 60,095 | 22 | 60,248 |
| - | - | 21 | 60,135 |

A vazão total utilizada para calibração dos modelos reduzido e computacionais, foi estimada pela leitura de cotas a jusante da ilha no mesmo dia, que corresponde à 454 m³/s.

As leituras do ADCP foram realizadas somente no braço direito do rio, sendo adotado para a calibração a vazão de 82 m³/s, correspondente à média das medições realizadas no braço direito. Portanto, a divisão da vazão entre o braço esquerdo e braço direito, para aferição do leito do modelo, foi realizada pela simples subtração da vazão total (454 m³/s) obtida pela curva-chave e a vazão medida pelo ADCP no braço direito (82 m³/s), resultando em 372 m³/s no braço esquerdo.

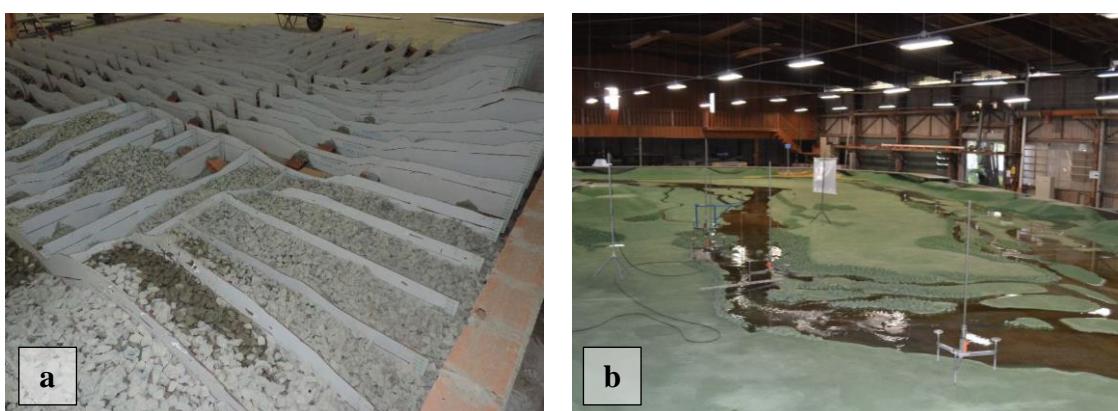
MODELOS HIDRÁULICOS

Modelo físico reduzido

O modelo físico reduzido foi desenvolvido no Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR, 2016), localizado no Centro Politécnico (Universidade Federal do Paraná). As características do trecho de rio permitiram a construção do modelo reduzido na escala geométrica 1:100, compatíveis com as necessidades do estudo. A área ocupada pelo modelo reduzido foi de 681,44 m², incluindo as áreas destinadas à alimentação e à restituição do escoamento.

O modelo reduzido (Figura 3-b) foi construído sobre uma laje de concreto armado, dentro das instalações do laboratório de hidráulica. Nessa laje foram demarcados, com uso de estação total, o sistema de coordenadas, limites do modelo e referências de nível. O relevo natural da região foi reproduzido a partir da implantação de seções transversais com espaçamento de 30 metros desenhadas e recortadas em chapas de fibra de madeira niveladas com nível ótico (Figura 3-a).

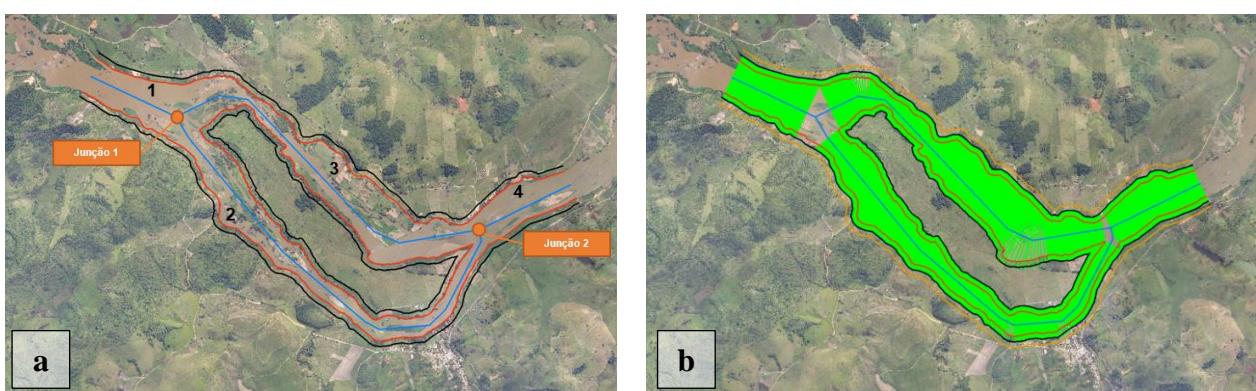
Figura 3 – Reprodução do relevo natural (a) e vista geral do modelo físico reduzido (b).



Modelo computacional unidimensional

O modelo computacional unidimensional foi desenvolvido no software HEC-RAS (USACE, 2021). Com o auxílio da ferramenta HEC-Geo-RAS, foram criadas seções distanciadas em 5 metros, totalizando-se 1.565 seções ao longo deste completo e refinado modelo unidimensional. As seções apresentam distância máxima de 5 metros em trechos retos e até 20 metros em trechos curvos, onde houve necessidade de congruência.

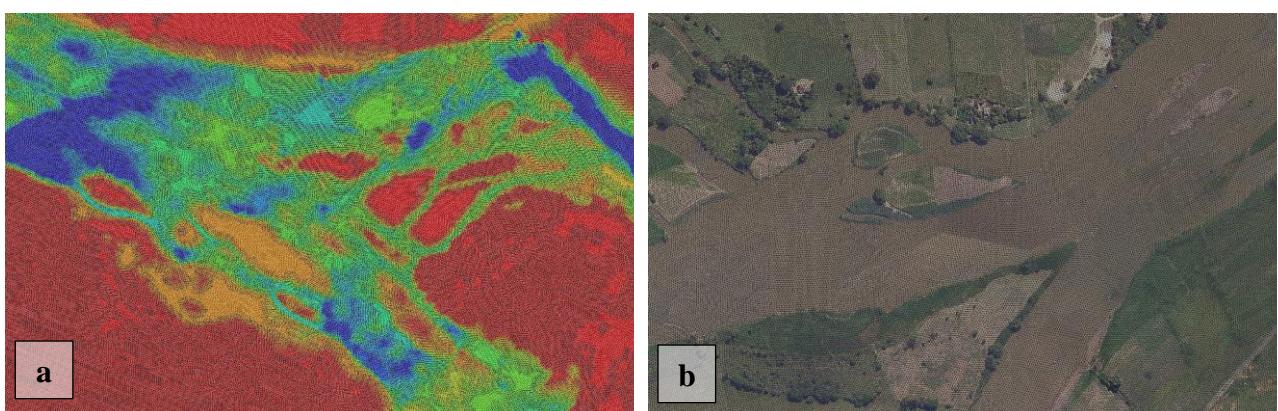
Figura 4 – Trechos definidos no modelo (a) e vista geral da disposição das seções (b).



Modelo computacional bidimensional

O modelo computacional bidimensional foi desenvolvido no software RiverFlow2D® (HYDRONIA, 2018). Com auxílio da ferramenta SMS, foi definido um domínio para geração de uma malha densa e flexível, com 1.940.892 elementos triangulares de apenas 4 metros.

Figura 5 – Trecho de montante com escala topográfica (a) e trecho de jusante com imagem de satélite (b).



RESULTADOS

Calibração dos modelos hidráulicos

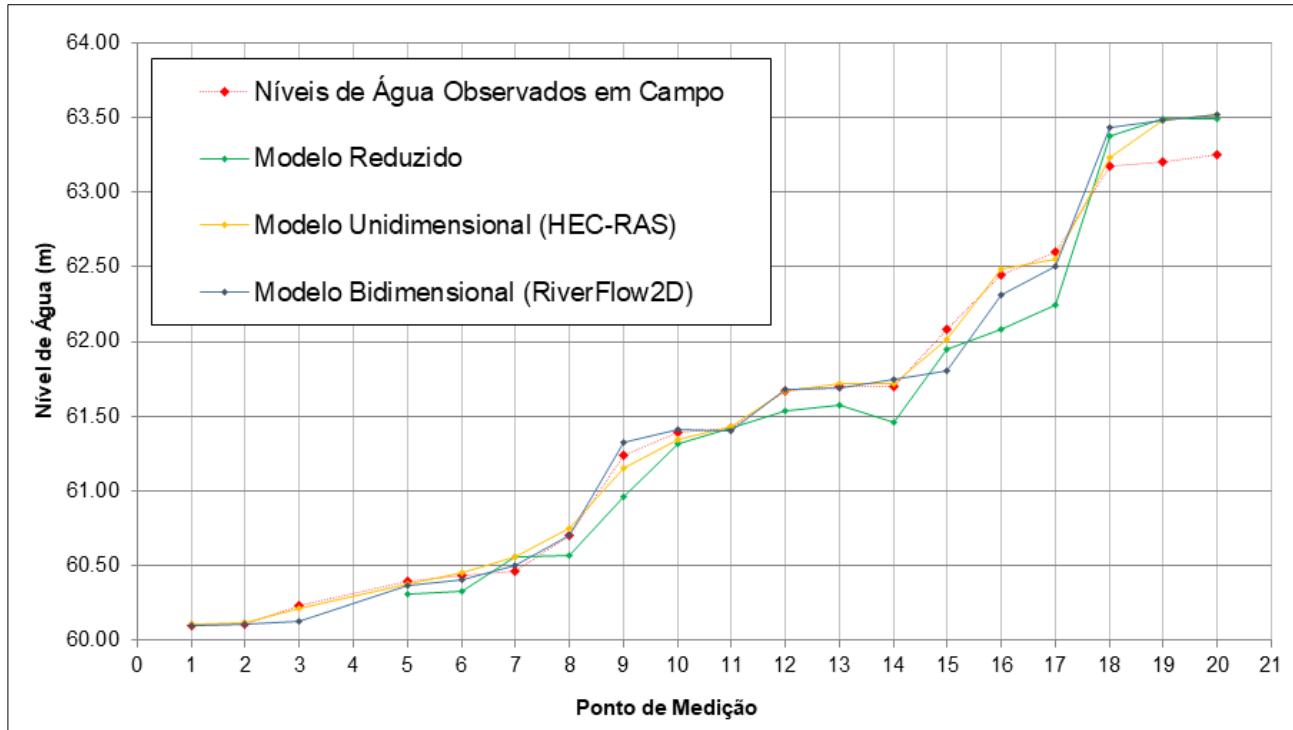
Após a realização de todas as devidas etapas de calibração dos modelos hidráulicos, foi verificada a raiz do erro quadrático médio (RMSE em inglês) em relação aos níveis observados em campo. Analisando-se as regiões da margem esquerda e direita do rio até a jusante da ilha, verifica-se que todos os modelos apresentaram resultados de níveis de água que aderem de forma muito satisfatória aos resultados das medições de campo.

Na Tabela 2 e Figura 6, apresentam-se os resultados da calibração dos modelos hidráulicos para a margem esquerda do rio.

Tabela 2 – Raiz do erro quadrático médio (RMSE) – Margem esquerda do rio.

| Modelo Reduzido CEHPAR | Modelo Unidimensional HEC-RAS | Modelo Bidimensional RiverFlow2D |
|---------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| RMSE = 0,2060 | RMSE = 0,0981 | RMSE = 0,1336 |

Figura 6 – Perfil da linha de água – Margem esquerda do rio.

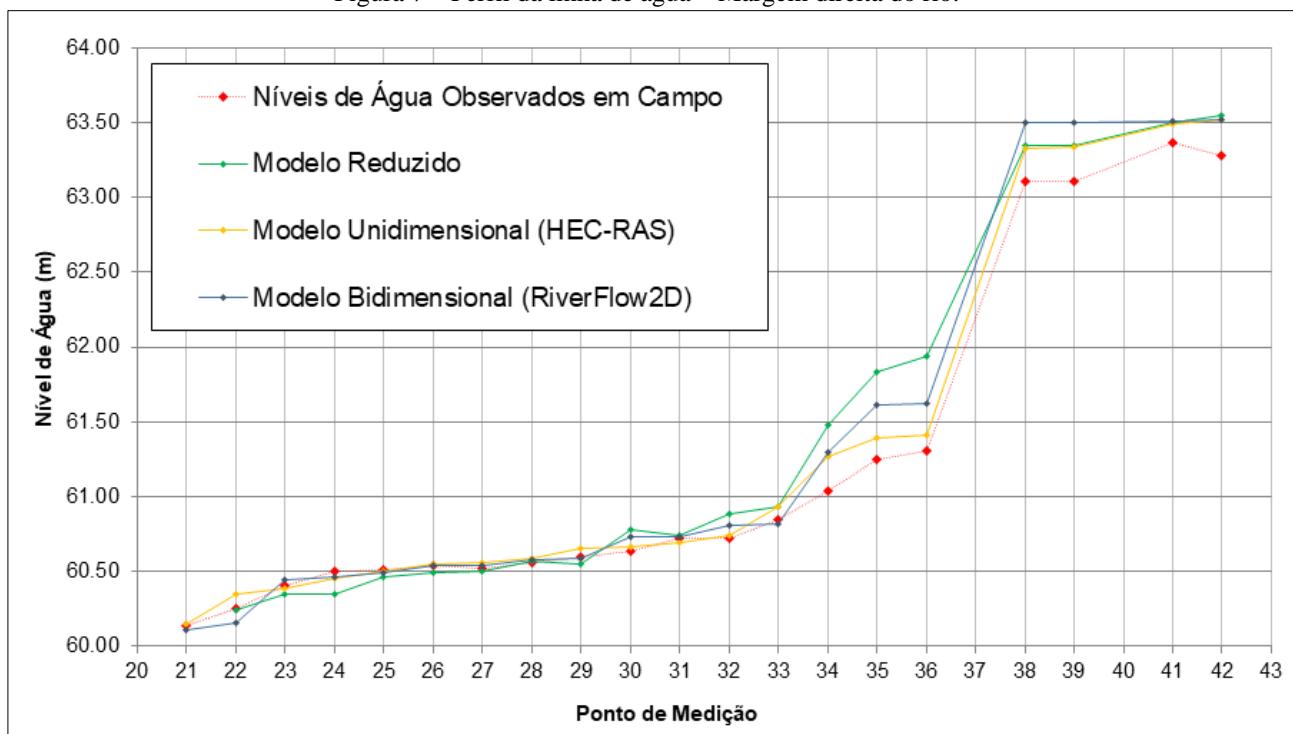


Na Tabela 3 e Figura 7, apresentam-se os resultados da calibração dos modelos hidráulicos para a margem direita do rio.

Tabela 3 – Raiz do erro quadrático médio (RMSE) – Margem direita do rio.

| Modelo Reduzido CEHPAR | Modelo Unidimensional HEC-RAS | Modelo Bidimensional RiverFlow2D |
|---------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| RMSE = 0,2533 | RMSE = 0,1188 | RMSE = 0,1871 |

Figura 7 – Perfil da linha de água – Margem direita do rio.



Em todos os modelos, tanto reduzido quanto computacionais, em relação aos níveis de água obtidos na região de montante (Pontos 19, 20 e 41, 42) é possível observar que são mais elevados do que os obtidos nas medições de campo.

Verificou-se nos modelos, tanto reduzido quanto computacionais, que os resultados de nível de água entre os Pontos 34 e 39 são mais elevados do que os obtidos nas medições de campo. Esse comportamento pode ser devido às características do leito do curso de água nesta região onde são evidenciadas diversas ilhas e afloramentos rochosos que podem não ter sido capturados de maneira satisfatória pelos levantamentos batimétricos e que prejudicam na representação matemática dos fenômenos do escoamento presentes nesta região.

Em geral, todos os resultados encontrados foram muito satisfatórios em relação às observações de campo, tanto o modelo hidráulico reduzido quanto os modelos computacionais unidimensional e bidimensional mostraram elevada precisão e confiabilidade nos resultados apresentados. Devendo-se valorizar a alta qualidade e precisão dos modelos computacionais que apresentaram valores de raiz do erro quadrático médio (RMSE), em ambas as margens do rio, inferiores ao modelo hidráulico reduzido.

Tabela 4 – Análise comparativa entre os modelos hidráulicos.

| Modelo Reduzido CEHPAR | Modelo Unidimensional HEC-RAS | Modelo Bidimensional RiverFlow2D |
|---------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| RMSE = 0,2338 | RMSE = 0,1103 | RMSE = 0,1643 |

Análise de sensibilidade dos modelos computacionais

O espaçamento entre as seções transversais para modelo unidimensional e a resolução da malha para o modelo bidimensional são os principais fatores que afetam a estabilidade e precisão numérica nas simulações hidráulicas. A combinação desses fatores, associados com um modelo digital de terreno que represente bem as feições morfológicas da área em estudo, são os elementos importantes para uma boa modelagem computacional.

Para obter respostas sobre o impacto desses fatores nos resultados de um modelo computacional, realizou-se uma análise de sensibilidade dos modelos computacionais, aumentando o espaçamento entre as seções transversais do modelo computacional unidimensional (Tabela 5) e aumentando a resolução dos elementos da malha do modelo computacional bidimensional (Tabela 6).

Tabela 5 – Análise de sensibilidade – Modelo computacional unidimensional (HEC-RAS).

| Seções de 5 em 5 metros | | Seções de 10 em 10 metros | | Seções de 20 em 20 metros | | Seções de 50 em 50 metros | |
|----------------------------|--------|------------------------------|--------|------------------------------|--------|------------------------------|--------|
| M.E | M.D | M.E | M.D | M.E | M.D | M.E | M.D |
| 0,0981 | 0,1188 | 0,1155 | 0,1350 | 0,1787 | 0,1275 | 0,3100 | 0,1496 |
| RMSE = 0,1103 | | RMSE = 0,1269 | | RMSE = 0,1553 | | RMSE = 0,2413 | |

Tabela 6 – Análise de sensibilidade – Modelo computacional bidimensional (RiverFlow2D).

| Elementos de 4 metros | | Elementos de 10 metros | | Elementos de 20 metros | | Elementos de 50 metros | |
|--------------------------|--------|---------------------------|--------|---------------------------|--------|---------------------------|--------|
| M.E | M.D | M.E | M.D | M.E | M.D | M.E | M.D |
| 0,1336 | 0,1871 | 0,2170 | 0,3292 | 0,1855 | 0,5175 | 0,4430 | 0,8299 |
| RMSE = 0,1643 | | RMSE = 0,2815 | | RMSE = 0,3937 | | RMSE = 0,6709 | |

Para o modelo computacional bidimensional, constatou-se que ao aumentar o tamanho dos elementos da malha, ocorre consequentemente uma redução brusca de interpolação das informações topográficas. Devido às interpolações equivocadas de elevações ao longo do modelo, dificilmente será possível manter a precisão apresentada com os elementos mais refinados. Enquanto no modelo computacional unidimensional, por mais que a distância entre as seções aumente, as informações necessárias e os detalhamentos das seções para entrada no modelo continuam sendo plenos e completos. Os valores de raiz do erro quadrático médio para espaçamento das seções em 20 metros (RMSE = 0,1553) ou em 50 metros (RMSE = 0,2413), foram próximos aos valores encontrados no modelo reduzido (RMSE = 0,2338) que foi montado utilizando-se seções transversais com espaçamento de 30 metros.

CONCLUSÕES

Ressalta-se a importância do investimento em técnicas cada vez mais avançadas e sofisticadas para medição e aquisição de dados. A qualidade dos resultados apresentados neste estudo está diretamente relacionada ao modelo digital de terreno utilizado, oriundo de detalhado levantamento topográfico a laser e de pontos provenientes do levantamento batimétrico.

Com os resultados apresentados, destaca-se ainda mais o grande crescimento na complementaridade entre as modelagens físicas e computacionais. Confirmou-se que a aplicação do modelo computacional unidimensional atende às necessidades de um projeto de trecho fluvial tão bem quanto uma aplicação de modelo computacional bidimensional.

A principal vantagem do modelo computacional está nos prazos e custos que são consideravelmente menores quando comparados aos do modelo hidráulico reduzido. Entretanto, recomenda-se sempre que possível a utilização de modelos físicos reduzidos, pois estes fornecem uma representação contínua do protótipo baseados na física do escoamento da água em uma escala geométrica reduzida, enquanto um modelo computacional está em uma escala de protótipo completa, mas incorpora apenas uma aproximação dimensional finita.

As modelagens físicas e computacionais não devem ser vistas como métodos conflitantes de investigação, análise e estudo hidráulico. Pois ambos os modelos possuem pontos fortes e fracos que servem de complementaridade em um problema de engenharia hidráulica, e em muitas vezes, exigirá uma combinação destes métodos, isto é, modelagem híbrida, para alcançar uma solução ótima.

REFERÊNCIAS

- BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. (2010). *Fundamentos de Engenharia Hidráulica*. 3^a edição revista e ampliada. Editora UFMG, Belo Horizonte/MG.
- CEHPAR (2016). *Estudos hidráulicos em modelo reduzido. Relatório nº 01 – Construção e Calibragem*. Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza, Curitiba/PR.
- CHOW, V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. Editora McGraw-Hill, Nova York/EUA.
- CIRILO, J. A.; COELHO, M. M. L. P. e BAPTISTA, M. B. (2003) *Hidráulica Aplicada*. 2^a edição revista e ampliada. Editora ABRH, Porto Alegre/RS.
- HYDRONIA, LLC. (2018). *RiverFlow2D, Two-Dimensional River Dynamics Model – Reference Manual*. Flórida/EUA.
- HYDRONIA, LLC. (2017). *RiverFlow2D, Two-Dimensional River Dynamics Model – Tutorials*. Flórida/EUA.
- USACE (U. S. Army Corps of Engineers). (2021). *HEC-RAS, River Analysis System – Applications Guide*. Hydrologic Engineering Center, EUA.
- USACE (U. S. Army Corps of Engineers). (2021) *HEC-RAS, River Analysis System – Hydraulic Reference Manual*. Hydrologic Engineering Center, EUA.
- USACE (U. S. Army Corps of Engineers). (2021). *HEC-RAS, River Analysis System – User's Manual*. Hydrologic Engineering Center, EUA.