

Artigo de Pesquisa

Modelagem Hidrodinâmica como Ferramenta para Gerenciamento de Riscos Hídricos no Rio Tapajós

Hydrodynamic Modeling as a Tool for Water Risk Management in Rio Tapajós

Eliézer Cláudio Ribeiro Silva ¹, Fiamma Buchinger Alves ², Marcelo José Raiol Souza ³, Mayke Feitosa Prognônio ⁴ e Carlos Eduardo Aguiar de Souza Costa ⁵

¹ Universidade do Estado do Pará, Belém, Brasil. eliezer_claudio@hotmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5500-0292>

² Universidade do Estado do Pará, Belém, Brasil. fbuchinger@hotmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4948-8540>

³ Universidade do Estado do Pará, Belém, Brasil. mrail@yahoo.com.br

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5998-5041>

⁴ Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil. maykefeitosa@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1547-7018>

⁵ Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil. eduardoaguiarsc@hotmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7238-6892>

Recebido: 03/07/2020; Aceito: 15/03/2021; Publicado: 10/04/2021

Resumo: As crescentes demandas pelo uso da água têm agravado a quantidade e qualidade desse recurso vital e, aliadas a eventos naturais extremos, podem intensificar a degradação dela. Diante disso, este estudo tem como objetivo analisar os eventos extremos máximos de vazões de um trecho do rio Tapajós, por meio do modelo hidrodinâmico HEC-RAS. Foram utilizadas quatro estações fluviométricas e suas respectivas séries históricas de cota e vazão, bem como o perfil transversal de cada estação. Os dados dos perfis transversais foram acoplados com um Modelo Digital de Elevação (MDE) originado de dados Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). As vazões foram extrapoladas para os Tempos de Retorno (TRs) de 10, 25, 50 e 100 anos, por meio da distribuição de frequência de Valor Extremo Generalizado (GEV), e as cotas foram calculadas pelo modelo hidrodinâmico. Na etapa de calibração, foi feito o ajuste do coeficiente de rugosidade Manning para as estações, os quais ficaram de 0,041 a 0,095. O coeficiente de Nash-Stucliffe e R^2 foram maiores que 0,99 em todas as estações. Nas simulações as cotas variaram entre 111,04 e 20,15 m. A calibração e validação do modelo hidrodinâmico apresentaram ajustes satisfatórios entre os dados simulados e observados.

Palavras-chave: HEC-RAS; Simulação; Recursos Hídricos.

Abstract: The growing demands for the use of water have aggravated the quantity and quality of this vital resource and, together with extreme natural events, can intensify its degradation. Therefore, this study aims to analyze the extreme maximum flow events of a stretch of the Tapajós river, using the hydrodynamic model HEC-RAS. Four fluvimetric stations and their respective historical series of elevation and flow were used, as well as the transversal profile of each station. The cross-sectional data were coupled with a Digital Elevation Model (MDE) originated from Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data. The flow rates were extrapolated to the 10, 25, 50 and 100 years Return Times (TRs), by means of the Generalized Extreme Value (GEV) frequency distribution, and the quotas were calculated using the hydrodynamic model. In the calibration step, the adjustment of the Manning roughness coefficient for the stations was made, which were from 0.041 to 0.095. The Nash-Stucliffe coefficient and R^2 were greater than 0.99 in all seasons. In the simulations, the dimensions varied between 111.04 and 20.15 m. The calibration and validation of the hydrodynamic model showed satisfactory adjustments between the simulated and observed data.

Keywords: HEC-RAS; Simulation; Water Resources.

1. Introdução

A água é o elemento essencial para as atividades da humanidade, bem como para o meio ambiente. A conservação dela torna-se cada vez mais vital, visto que ela tem múltiplos usos, como para os aproveitamentos hidrelétricos, abastecimento humano e industrial, piscicultura, hidrovia, depuração de efluentes líquidos, entre outros. A utilização de corpos d'água pode ser prejudicada por causa das alterações que contribuem para a degradação de corpos hídricos. Essas alterações têm se agravado por causa da proximidade aos grandes centros urbanos dos rios e lagos e também pela implantação de empreendimentos para geração de energia, além das práticas agrícolas e de criação de animais em áreas no entorno destes corpos hídricos. Essas alterações, aliadas aos eventos naturais extremos, intensificam os impactos sobre os corpos d'águas.

O entendimento sobre os processos hidrológicos é importante para o gerenciamento dos recursos hídricos, bem como para projetos de obras hidráulicas e estudos ambientais. Rennó e Soares (2000) afirmam que na natureza há um equilíbrio dinâmico natural (decorrentes de mecanismos de controle desenvolvidos no processo evolutivo da paisagem), onde ele vem sendo alterado pelas ações antrópicas que interferem nos ciclos biogeoquímicos e da água.

As modificações sofridas nos recursos hídricos demandam uma nova abordagem à água, passando a ser dotada de valor econômico e considerada finita, bem como requisitando novos modelos de gestão dela, para que se atenda aos diversos usos atuais e futuros (SOARES; SOARES; BARBOSA, 2019). Essa nova abordagem de gestão dos recursos hídricos deve considerar a bacia hidrográfica como unidade fundamental de planejamento e se utilizar de novas tecnologias disponíveis para alcançar seu objetivo.

Os modelos são ferramentas importantes para a tomada de decisões no gerenciamento de bacias hidrográficas. Eles podem ser utilizados em estudos ambientais para entender os impactos das ações antrópicas e prever alterações futuras nas bacias hidrográficas, pois são capazes de representar de forma simplificada a realidade, propiciando assim o entendimento da dinâmica dos processos que os envolvem, bem como prevendo situações que simulam cenários futuros (HOLANDA, 2010).

Do ponto de vista dos impactos antrópicos, a atual tendência de construção de grandes usinas hidrelétricas no Brasil, tem voltado as atenções para os estudos hidrológicos das grandes bacias, sobretudo na região amazônica. Lees et al. (2016) comentam que na bacia do Tapajós está previsto número expressivo de barragens; até 2022 são mais de 40 projetos, entre Pequenas Centrais Elétricas (PCHs) e grandes hidrelétricas, com estimativa de geração superior a 30 MW. Estas barragens podem ser as maiores causadoras de impactos socioambientais, podendo causar inundações nas cidades da região, terras indígenas ou unidades de conservação (FEARNSIDE, 2015). Outras obras de grande porte estão previstas na bacia para o futuro, como a construção de portos fluviais para escoamento de grãos, fazendo com que a população aumente nos próximos anos (MELO et al., 2017).

É perceptível que os eventos hidrológicos extremos na Amazônia vêm tornando-se mais recorrentes, deixando moradores de locais cada vez mais sujeitos à riscos hídricos como a escassez de água e inundações (PINHO; MARENGO; SMITH, 2015). Assim, faz-se necessário a compreensão dos processos dinâmicos que envolvem rios amazônicos, analisando sua sazonalidade, pulsos de inundação e simulando eventos extremos, principalmente o Rio Tapajós, dada sua importância estratégica para a região e para o país.

2. Materiais e Métodos

A Figura 1 apresenta o fluxograma dos procedimentos metodológicos desenvolvidos para a aplicação do modelo hidrodinâmico, que serão descritos detalhadamente nos próximos tópicos.

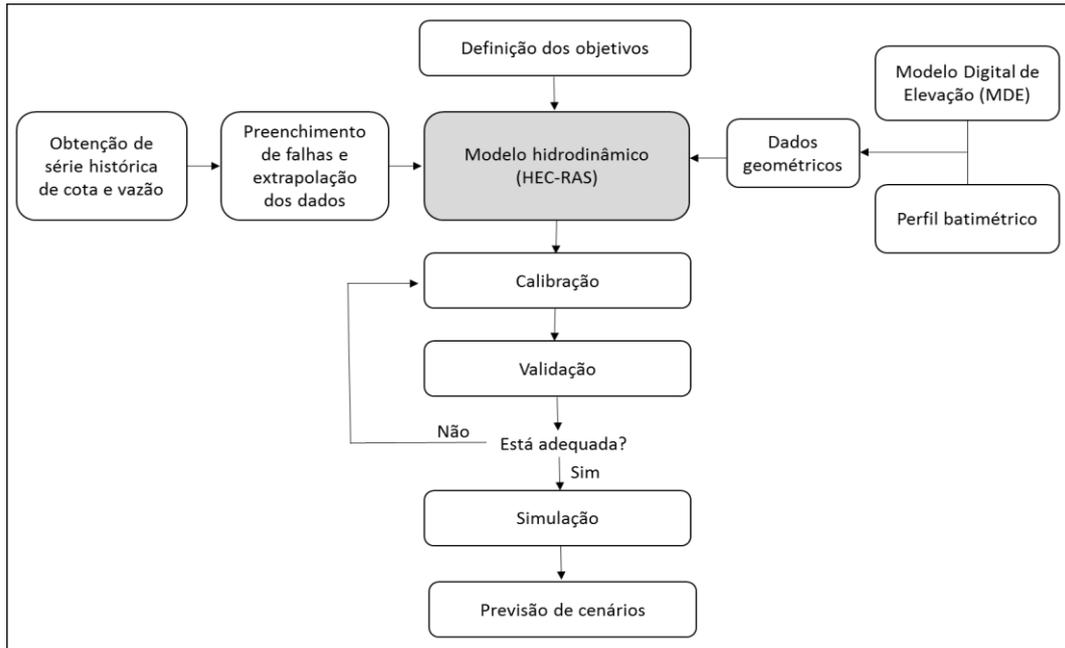


Figura 1. Fluxograma dos procedimentos metodológicos.

2.1. Área de estudo

O rio Tapajós é afluente da margem direita do rio Amazonas e faz parte de uma bacia federal (Bacia do Tapajós), por drenar mais de um Estado (Pará, Amazonas, Mato Grosso e Rondônia). Situa-se entre nas coordenadas de referência Universal Transversa de Mercator (UTM), Zona 21M, 750241.49 e 327129.84 E; e 9751113.14 e 9170668.72 S, conforme Figura 2. O estudo foi realizado em um trecho de 539,517 km, que vai desde a estação Barra do São Manoel até à estação Itaituba.

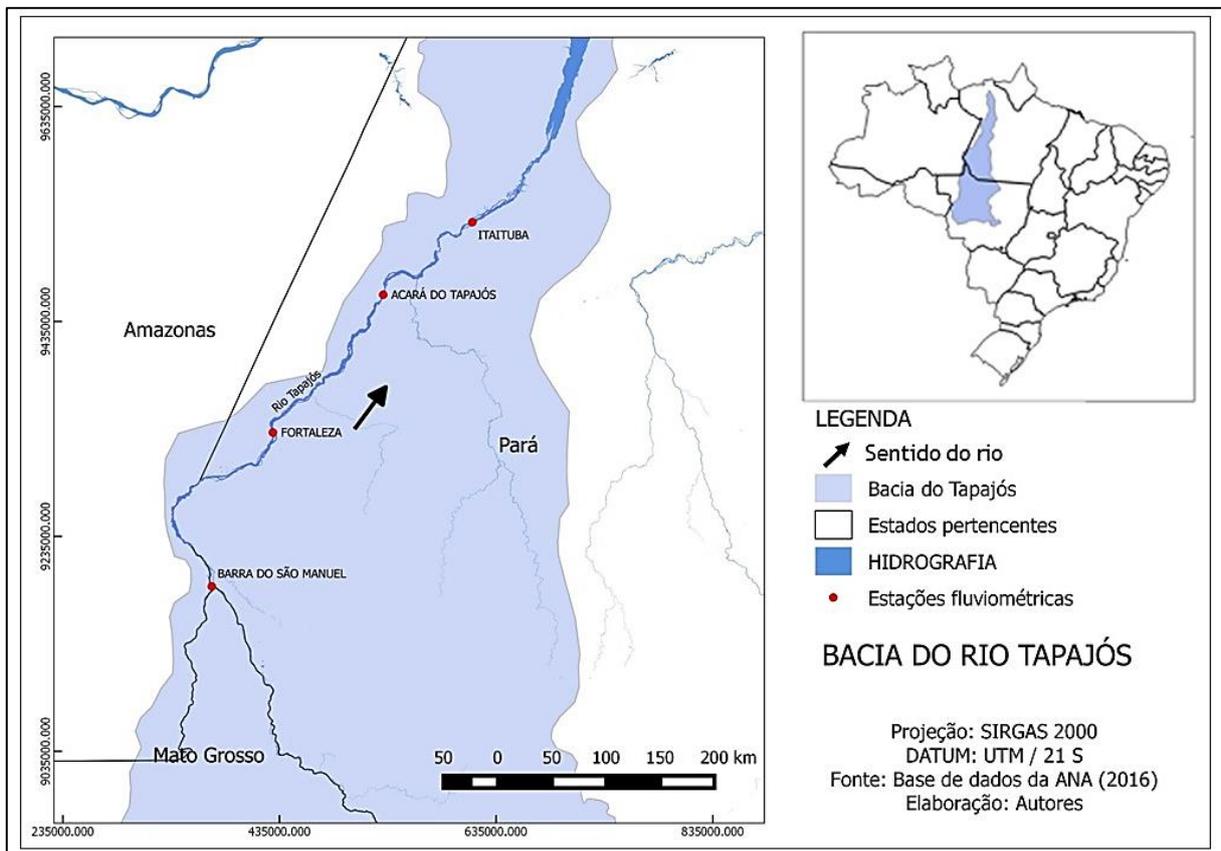


Figura 2. Mapa de localização do rio Tapajós.

2.2. Dados fluviométricos

Os dados utilizados para a modelagem hidrodinâmica foram: cota, vazão, perfil transversal, traçado do canal e áreas de inundação. Os três primeiros foram obtidos por meio do sistema HidroWeb/ANA (<http://hidroweb.ana.gov.br>), no qual os dados de cota e vazão são disponibilizados em período diário. Apenas quatro estações fluviométricas continham simultaneamente dados de vazão, cota e perfil transversal (Figura 2), sendo estas então selecionadas para compor o modelo e apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Estações fluviométricas utilizadas na análise e série histórica das cotas e vazões.

Código	Estação	Localização geográfica		Área de drenagem (km ²)	Período dos dados
		Sul	Oeste		
17430000	Barra do São Manuel	7°20'23"	58°9'19"	333.000	1976-1990 e 1994-2014
17500000	Fortaleza	6°2'43"	57°38'34"	363.000	1983-2009
17650002	Acará do Tapajós	4°53'11"	56°43'23"	390.000	1996-2008
17730000	Itaituba	4°16'32"	55°58'56"	458.000	1974-2013

O perfil transversal de um rio é a representação vertical de uma determinada seção traçada perpendicularmente ao sentido do escoamento entre as duas margens do canal (perfil batimétrico). Os perfis transversais do rio Tapajós utilizados na modelagem estão expressos graficamente na Figura 3. Devido à um número limitado de seções transversais disponibilizadas pela ANA, foi feita a interpolação entre as seções a cada 500 metros.

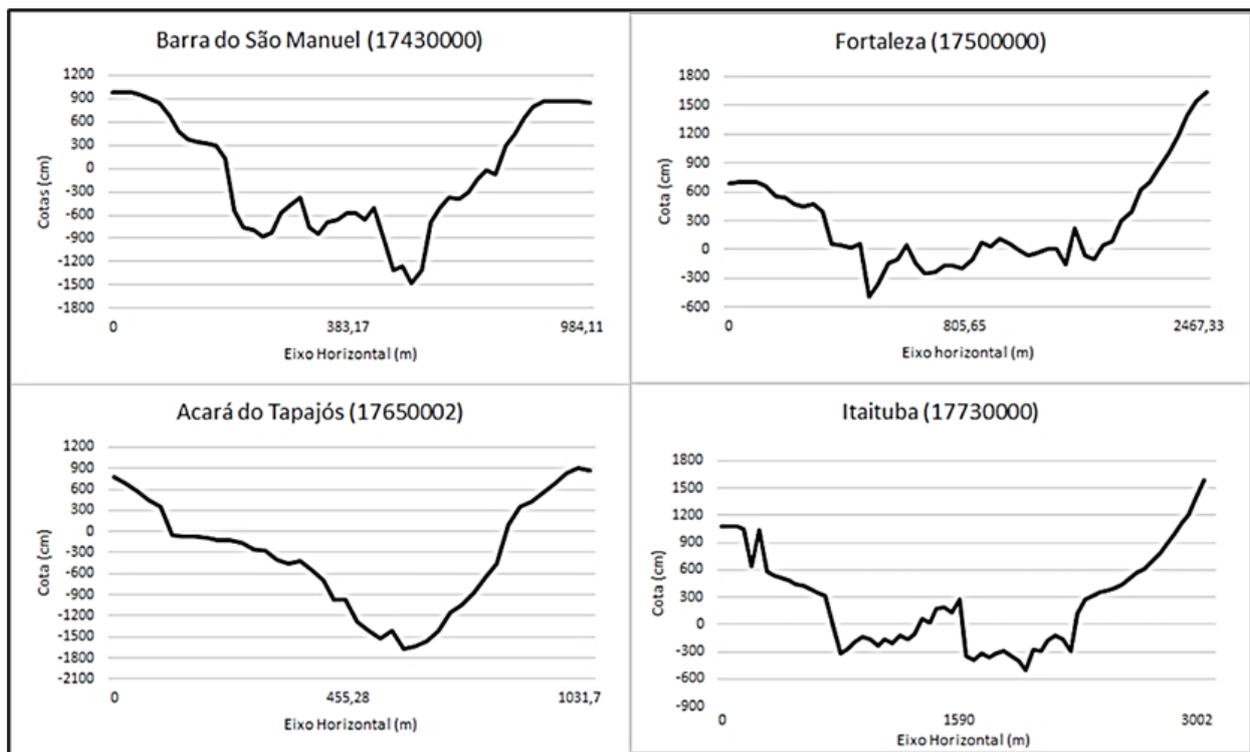


Figura 3. Perfis transversais utilizados no modelo hidrodinâmico.

2.3. Preenchimento de falhas

Devido aos dados brutos de vazão apresentarem falhas em suas séries históricas, foi necessário realizar o preenchimento delas. Para tal, utilizou-se o método da Regressão Linear Simples. As regressões foram realizadas em planilhas eletrônicas. As correlações devem obedecer ao coeficiente de correlação (r) maior ou igual a 0,9 e quando ocorrerem valores menores, é necessário que se realize regressões diferentes para períodos de estiagem e cheia. A Eq. (1) que representa esse método é demonstrada a seguir:

$$Y = b + aX \quad (1)$$

onde, Y é o valor conhecido da estação base, X é o valor da estação com falhas, a e b são coeficientes obtidos por meio da correlação e inclinação da reta entre os dados da estação base e da estação com falhas.

O único período no qual não foi realizado o preenchimento foi de 1991 a 1993 na estação Barra do São Manoel, devido nesse período não ter tido nenhuma medição registrada.

2.4. Distribuição de Probabilidade, Teste de aderência e Tempos de Retorno Preenchimento de falhas

Para a definição de cenários, é necessário estabelecer a Função de Distribuição de Probabilidade (FDP) com melhor aderência aos dados de vazões máximas anuais, após o preenchimento das falhas. Logo, utilizou-se o software EasyFit 5.6 (MATHWAVE, 2015), no qual foram testadas a distribuição de frequência de Valor Extremo Generalizado (GEV) e a distribuição de Gumbel. Ambas foram testadas pelo teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (K-S), a um nível de significância (α) de 5% e se escolheu a que melhor se ajustou aos dados das estações.

Após a escolha da distribuição, foram feitas as extrapolações dos dados fluviométricos, permitindo assim o estabelecimento do limite inferior da vazão máxima anual para os Tempos de Retorno (TRs) selecionados. Neste trabalho foram utilizados os TRs de 10, 25, 50 e 100 anos para as vazões das quatro estações fluviométricas, sendo as cotas da estação Itaituba utilizadas como condição de contorno.

2.5. Modelo Digital de Elevação

O Modelo Digital de Elevação (MDE) foi extraído da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) com 1 segundo de arco (~30 metros) de resolução espacial, as quais foram obtidas no ano de 2000 pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) e outras agências, entre 60º de latitude norte e 54º de latitude sul (GROHMANN; RICCOMINI; STEINER, 2008). Os dados SRTM podem ser obtidos gratuitamente pelo Earth Explorer do Serviço Geológico dos Estados Unidos. Além disso, foi realizado o processo de preenchimento das depressões espúrias do MDE SRTM, conforme recomendação de Planchon e Darboux (2002). Da mesma forma, Progenio et al. (2020) usaram o mesmo processo para remover os vazios no MDE.

Segundo Wolff (2013), os dados SRTM têm diversas aplicações em estudos ambientais, como: modelagem hidrológica, monitoramento ambiental, manejo de bacias hidrográficas, entre outros. O uso de dados SRTM para representar as planícies de inundações podem ser observados nos trabalhos de Monte et al. (2016), Paron e Baldassarre (2014), Quiroga et al. (2016), Bozza et al. (2016), Pramanik, Panda e Den (2010) entre outros. No que tange ao traçado do canal e das áreas de inundação, necessários ao modelo utilizado neste estudo, eles foram obtidos a partir de dados SRTM, com resolução espacial de 30 metros. Foram adquiridas 11 cenas que interceptavam toda a extensão do rio Tapajós.

As cenas foram inseridas no software ArcGIS ArcMap 10.3, no qual foi gerado um mosaico, tornando-as uma única imagem e, em seguida, gerou-se curvas de nível com espaçamento de 30 metros, em formato "shp". Essas curvas foram exportadas, onde foram gerados os dados de traçado do canal e margens de inundação. O MDE gerado também serviu para ajustar a elevação dos perfis transversais da ANA em relação ao nível do mar (LOITZENBAUER; MENDES, 2016), transformando as medições de cota da régua linimétrica em cota altimétrica.

2.6. O modelo hidrodinâmico

O modelo matemático utilizado para realizar a simulação hidrodinâmica do rio Tapajós foi o software HEC-RAS versão 4.1 (USACE, 2010), em regime de escoamento permanente. Os dados de entrada necessários são: geometria e escoamento. Os dados de geometria foram obtidos a partir de dados do sistema Hidroweb/ANA (2016) e dados SRTM, conforme explicado anteriormente.

Os dados de escoamento em regime permanente podem ser representados através de condições de contorno de diferentes formas de entrada, dependendo do nível de informações que o usuário possui, sendo elas: Curva-chave (Rating Curve), Nível de Água Conhecido (Known W. S.), Declividade da Linha de Energia (Normal Depth) e Profundidade Crítica (Critical Depth). Optou-se pelas condições de contorno de jusante (regime subcrítico) por meio do Nível Água Conhecido, com base na série histórica de cotas da ANA (2016).

O modelo possui incertezas, as quais estão relacionadas às estações utilizadas e ao coeficiente de Manning. As estações batimétricas utilizadas foram obtidas a partir de dados de perfil transversal do HidroWeb/ANA. Segundo Loitzenbauer e Mendes (2016), as medições feitas pelo Sistema Nacional de Informação de Recursos

Hídricas não são realizadas no mesmo período para todas as estações, o que pode levar a gerar imprecisões na representação do canal.

Ainda referente ao escoamento, também são necessários os dados do coeficiente de rugosidade de Manning (n), conforme Chow (1959), e de contração (0,1) e expansão (0,3). Para a calibração do modelo, foi feito o ajuste por tentativa, no qual os parâmetros que melhor representem os valores observados são obtidos por tentativas. Os parâmetros ajustados foram os coeficientes de rugosidade (n) para cada estação à montante. A validação dos parâmetros calibrados foi feita para um período de dados que não fez parte da calibração, verificando-se se estes parâmetros são adequados.

Os resultados para a etapa de validação foram avaliados segundo o coeficiente de determinação R² ou Nash-Sutcliffe – Eq. (2), que avaliam o desempenho dos resultados simulados.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Y_t - Y_s)^2}{\sum_{t=1}^n (Y_t - Y_m)^2} \tag{2}$$

onde: n é o número de observações; Y_t é a observação no instante t; Y_s é a observação simulada; e Y_m é a média das n observações.

Este valor varia de -∞ a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, significa que houve um ajuste ótimo entre os dados simulados e calculados. Por último fez-se a simulação dos cenários ambientais para os TR10, TR25, TR50 e TR100, analisando-se os resultados.

3. Resultados e Discussões

3.1. Análise de frequências

A função de distribuição que melhor se ajustou aos dados de vazão foi a distribuição GEV, em detrimento da distribuição de Gumbel, conforme o teste Kolmogorov-Smirnov. Portanto, esta foi a distribuição utilizada para estimar os dados de vazão e estes por sua vez foram utilizados para gerar a curva-chave visando a estimativa das cotas, o que permitiu a estimação do limite inferior do valor máximo da vazão correspondente aos Tempos de Retorno selecionados. Ressalta-se que somente para a estação de Itaituba foram extrapoladas as cotas, visto que esta estação foi utilizada como condição de contorno de jusante. Os coeficientes da distribuição GEV para cada estação, bem como as vazões estimadas para os TRs, podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados das vazões calculadas pela GEV para os Tempos de Retornos.

Estações	Parâmetros (GEV)			Tempo de Retorno (anos)	Vazão (m ³ /s)
	k	σ	μ		
Barra do São Manuel	-0,15209	2095,1	16131	10	20124
				25	21437
				50	22297
				100	23063
				10	24927
Fortaleza	-0,45677	3164,8	20477	25	25798
				50	26240
				100	26558
				10	23558
				25	24265
Acará do Tapajós	-0,51989	3041,1	19525	50	24605
				100	24839
				10	43882
				25	44877
				50	45260
Itaituba	-0,78122	8617,7	34753	100	45480

Os resultados da distribuição, verificados pelos testes de aderência, foram adequados ao propósito deste estudo, como pode ser observado na Figura 4. Ela apresenta os resultados por meio de gráficos Quantil-Quantil, possibilitando a verificação visual da validade de uma distribuição para um conjunto de dados e calculando o valor teoricamente esperado para cada ponto de dados com base na distribuição. Observa-se que houve um bom ajuste da distribuição GEV aos valores máximos das vazões (Observadas e Simuladas) do rio Tapajós nas estações analisadas.

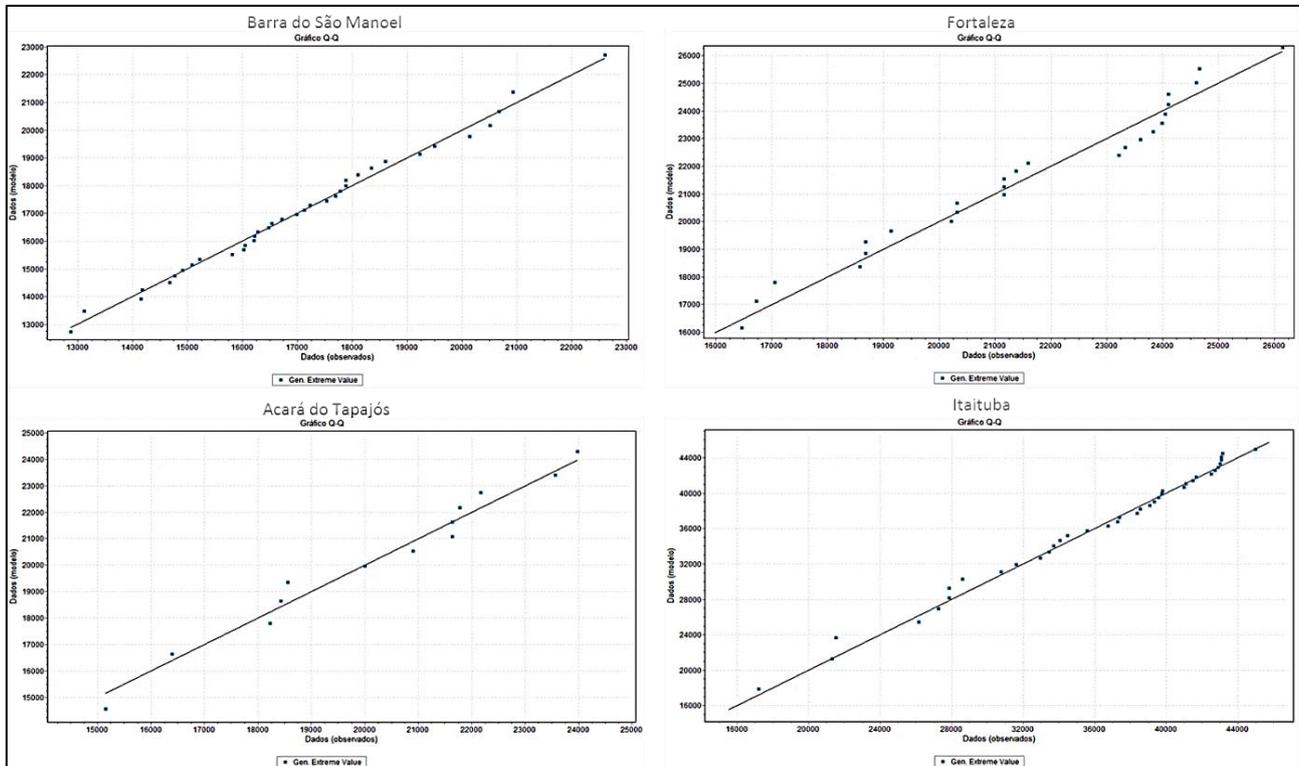


Figura 4. Gráficos Quantil-Quantil de aderência dos dados ao modelo de distribuição GEV, por estação fluviométrica.

3.2. Calibração e validação do modelo

A calibração é uma das etapas que demanda maior tempo no processo de construção de um modelo hidrodinâmico, visto que a validade do modelo depende de uma boa calibração. O que se busca é a minimização da diferença entre os valores de cotas observados e simulados para um mesmo evento em todas as seções.

O processo de calibração foi realizado para o dia 09/03/1988, o qual foi selecionado por ser o menor valor das vazões máximas anuais entre todas as estações, considerando o mesmo intervalo de dados em todas as estações fluviométricas. O ajuste do coeficiente de rugosidade Manning (n) procurou seguir os padrões para rios naturais estabelecidos por Chow (1959), que vai de 0,035 a 0,100, dependendo das condições que o rio apresenta (desvios, pedras, vegetação, bancos de areia, declive, seções irregulares e entre outros). Destaca-se que foram realizadas mais de 160 rodadas de ajuste dos parâmetros.

A etapa de validação foi realizada para o dia 07/03/2004 por ser o dia que apresentou a maior das vazões máximas anuais entre as estações. Assim, podendo ser verificado se o modelo calibrado para um evento de menor magnitude pode ser adequado para calcular os valores de um evento de maior magnitude, dentro da série histórica disponível. Ressalta-se que tanto a etapa de calibração quanto a de validação foram realizadas para eventos ocorridos durante o mês de maior vazão (março), que é o mês em que ocorrem os eventos extremos de vazão. A Tabela 3 apresenta os resultados da validação do modelo e os coeficientes de rugosidades calibrados para as margens e canal principal.

Tabela 3. Resultados da validação do modelo o evento do dia 07/03/2004.

Parâmetro	Barra do São Manoel (17430000)	Fortaleza (177500000)	Acará do Tapajós (17650002)	Itaituba* (17730000)
Q (m ³ /s)	19728	26094	23567	42392,5
Cota obs. (m)	112,63	83,26	60,40	18,74
Cota sim. (m)	112,41	83,17	60,57	18,74
Δ Cota (m)	-0,22	-0,09	0,17	0
R ²	0,9999	0,9982	0,9999	-
n Canal	0,057	0,041	0,09	0,060
n Margens	0,062	0,046	0,095	0,065

* Condição de contorno de jusante, por isso as cotas obs. e sim. são iguais.

Ressalta-se que os dados de cota e vazão da estação de Itaituba foram utilizados como condição de contorno de jusante, ou seja, os valores de nível de água conhecido e respectiva vazão, foram inseridos no modelo para que se pudesse simular os valores das outras estações à montante. Por isso a Tabela 3 não apresenta os resultados da validação para Itaituba.

Nessa etapa, o modelo subestimou as cotas observados para a estação Barra do São Manuel e Fortaleza (em 0,22 e 0,09 m, respectivamente) e superestimou a cota para a estação de Acará do Tapajós (em 0,17 m), mas apresentaram coeficientes de R² muito próximos de 1, o que demonstra um bom desempenho do modelo. No trabalho de Loitzenbauer e Mendes (2016), houve diferenças de níveis de água observados e simulados entre 0,01 e 0,62 m, tidos como satisfatórios para a simulação em regime não permanente dos rios Mampituba, Araranguá, Tubarão e Tijucas no estado de Santa Catarina.

Silva e Alves (2016), em um estudo das análises das vazões do rio Tapajós, destacou que a estação Itaituba apresenta uma brusca diminuição na tendência das vazões médias e ressaltou a necessidade de estudos de hidrogeologia para compreender melhor a relação entre as águas subterrâneas e superficiais nesta região, bem como os usos consultivos. Isso pode explicar o fato de que na estação de Acará do Tapajós se teve maior dificuldade para a calibração, já que o modelo propaga as vazões e níveis de água a partir de jusante (estação de Itaituba) para montante (estação de Barra do São Manuel).

Os valores do coeficiente η para o alto e médio rio Tapajós estão dentro dos padrões para canais naturais de Chow (1959), entre 0,041 e 0,095, sendo que apenas a estação Acará do Tapajós apresentou um valor elevado (0,09 e 0,095) em relação às outras. Isso pode ser justificado devido às incertezas quanto aos perfis transversais disponibilizados pelo Hidroweb/ANA, os quais não tem referência ao nível do mar. Logo, o acoplamento desses perfis baseou-se nos valores das margens do MDE com base em dados SRTM, que é limitado devido à baixa resolução. Portanto, pode ter ocorrido um erro na geometria para esta seção.

Para Grube, Reynaud e Araújo Filho (2015), a utilização de coeficientes de Manning obtidos diretamente das referências bibliográficas pode levar a estimativas equivocadas das perdas de carga. Portanto, são necessárias investidas à campo, para que se faça um levantamento mais preciso da altitude em que se encontram as estações fluviométricas da ANA, obtendo-se, assim, uma geometria e coeficientes de rugosidade mais apurados.

Pode-se notar que o modelo calibrado para uma vazão menor, foi validado com excelência para um evento com uma vazão maior. Isso comprova que o modelo teve uma boa calibração e está apto a realizar simulações com diversos Tempos de Retorno, tendo seus resultados confiáveis e corroborando para a sua utilização como apoio a tomada de decisão.

3.3. Simulação do modelo

Após a calibração e a validação do modelo, prosseguiu-se a modelagem com a simulação dos Tempos de Retornos para as vazões calculadas por meio da distribuição GEV. Os resultados da simulação gerados por meio do HEC-RAS podem ser visualizados em forma de gráficos e tabelas. A Figura 5 apresenta o alto-médio rio Tapajós, com as seções reais e interpoladas, totalizando 1082 seções, sendo quatro seções reais e 1078 interpoladas, percorrendo a uma extensão de 539.517 km.

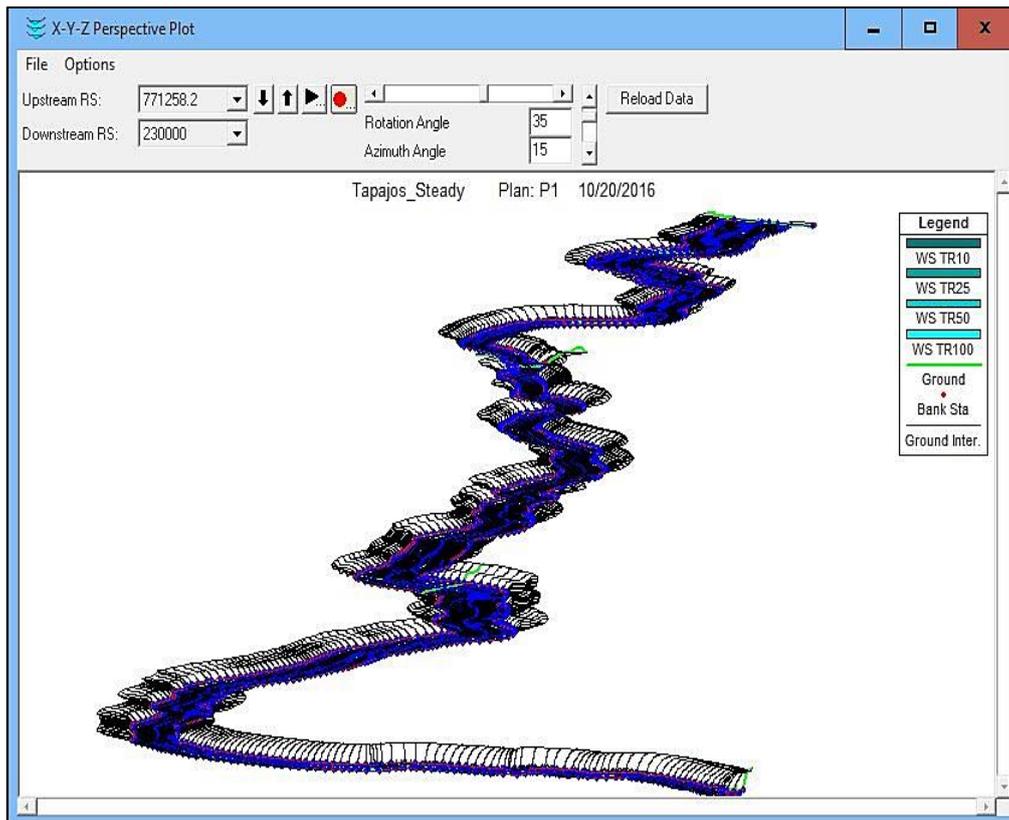


Figura 5. Perspectiva 3D das seções reais e interpoladas do alto-médio rio Tapajós.

Devido à grande escala abordada no presente estudo, a extensão das áreas inundáveis das vazões simuladas para cada TR não ficou evidente na Figura 5. Logo, os resultados da simulação para os TRs no HEC-RAS são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados da simulação das cotas para as vazões estimadas pelos Tempos de Retorno.

Estações	Tempo de Retorno (anos)	Probabilidade excedência	Vazão (m³/s)	Cota sim. (m)	Área molhada (m²)
Barra do São Manuel	10	10%	20124	111,04	14421,92
	25	4%	21437	111,58	14949,31
	50	2%	22297	111,92	15288,75
	100	1%	23063	112,22	15588,88
Fortaleza	10	10%	24927	82,87	21131,21
	25	4%	25798	83,09	21683,65
	50	2%	26240	83,21	21963,47
	100	1%	26558	83,29	22164,66
Acará do Tapajós	10	10%	23558	60,56	16169,41
	25	4%	24265	60,85	16644,68
	50	2%	24605	60,98	16869,26
	100	1%	24839	61,07	17024,15
Itaituba	10	10%	43882	19,75*	32929,93
	25	4%	44877	19,93*	33447,77
	50	2%	45260	20,01*	33693,08
	100	1%	45480	20,15*	34109,05

* Níveis de água calculados pela distribuição GEV para a condição de contorno de jusante.

A estação Barra do São Manuel, por estar localizada no Alto rio Tapajós, apresenta altitudes maiores que as outras estações, com cotas simuladas entre 111,04 e 112,22 metros, o que representa uma diferença de 1,18 metros entre os perfis de linha d'água dos TR10 a TR100 e de 1.166,97 m² entre as áreas molhadas deles TRs. Ainda no Alto rio Tapajós, a estação de Fortaleza apresentou os valores simulados com cota de 83,29 m, para o TR100, e 82,87 m para o TR10, apresentando variação de 0,42 m (ou 42 cm) e de 1.033,45 m² entre as áreas molhadas.

Já no médio rio Tapajós, os valores simulados para a estação do Acará do Tapajós ficaram entre 60,56 e 61,07 m para o TR10 e TR100, respectivamente, representando uma diferença de 0,51 m (ou 51 cm) e de 854,74 m² para as áreas molhadas. A diferença entre as cotas simuladas pela GEV para a estação de Itaituba, entre os TR10 e TR100, foi de 0,40 m e de 1.179,12 m² para as áreas molhadas.

Os resultados demonstram que esta última estação apresentou a menor variação de cota (0,40 m) e a maior variação da área molhada. Isso pode ser explicado devido a mesma apresentar a maior largura entre as margens (Figura 6), equivalente a 2.880 metros, fazendo com que um pequeno aumento na cota gere uma grande aumento na área molhada. Na estação do Acará do Tapajós, a variação de 0,51 m entre a cota maior e menor, resultou em uma área molhada de 854,74 m², devido esta estação ter apenas 771,52 metros de largura.

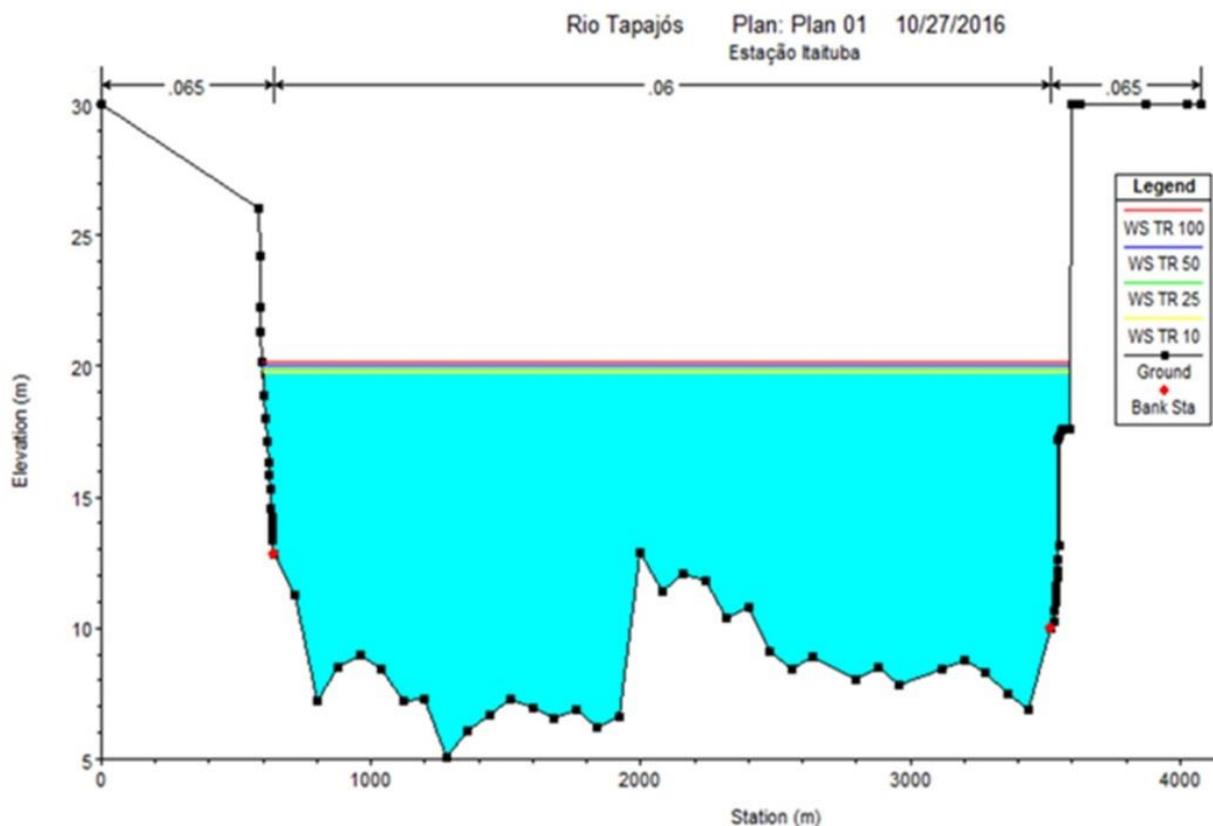


Figura 6. Visualização do perfil topobatimétrico da estação Itaituba com os perfis de linha d'água simulados para as vazões dos TRs.

A Figura 7 apresenta o perfil longitudinal do alto-médio rio Tapajós, na qual é perceptível uma brusca redução em relação ao nível da lâmina d'água entre as estações Acará do Tapajós e Itaituba, devido à alta declividade do fundo do canal (0,00021 m/m) entre essas estações, enquanto a média dos outros trechos é 0,00013 m/m.

Em decorrência da elevada declividade, a velocidade também é alta, chegando à média de 1,49 m/s na estação Acará, ao passo que a velocidade média da primeira estação (Barra do São Manoel) corresponde a 1,44 m/s, na estação Fortaleza de 1,19 m/s e, na estação Itaituba, 1,34 m/s. O conhecimento dessas velocidades é útil em se tratando de questões relacionadas à navegabilidade, bem como para a outorga de usos da água (captação de água e diluição de efluentes).

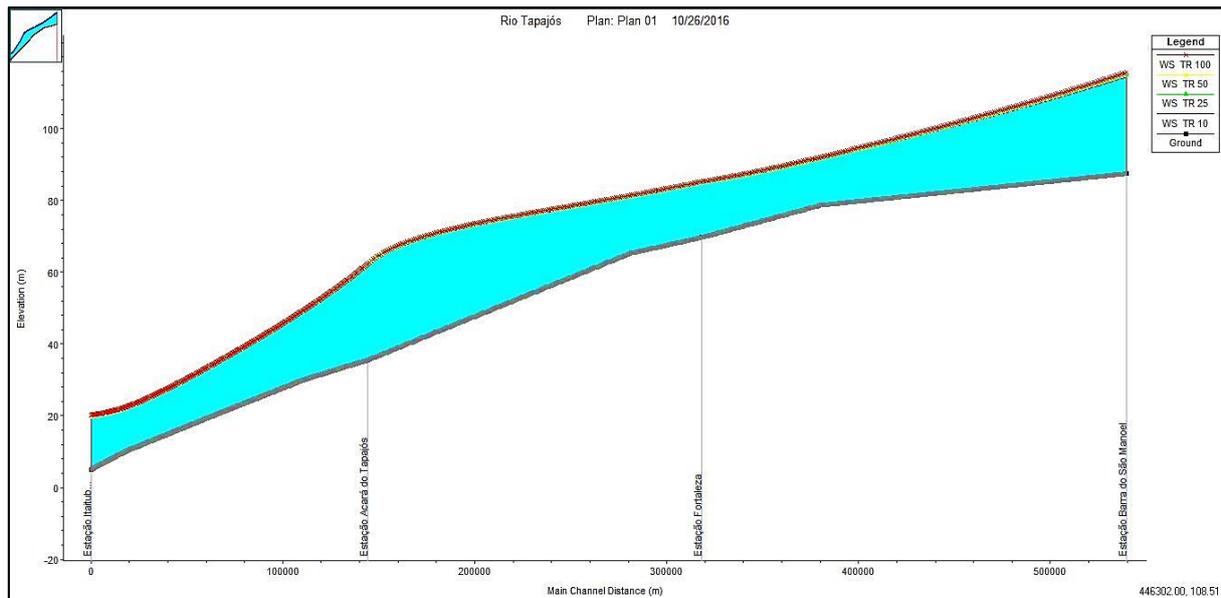


Figura 7. Perfil longitudinal do alto- médio rio Tapajós.

Os resultados da modelagem permitem obter informações para trechos em que não há monitoramento, como por exemplo entre as estações conhecidas, diminuindo o custo para obtenção desses dados. Como o modelo incorpora variáveis do curso d'água estudado, como vazão, cota, topografia, batimetria entre outros, é possível desenvolver medidas de controle e previsão, planos emergenciais, gerenciamento de risco entre outros, dando auxílio na implementação dos sistemas de informações sobre recursos hídricos e na elaboração de Planos de Recursos Hídricos, amparando as agências reguladoras e os gestores na tomada de decisões, de forma técnica e criteriosa.

Cestari Junior, Sobrinho e Oliveira (2015) realizaram o estudo de propagação de onda como auxílio para a elaboração do plano de ação emergencial (PAE), os quais simularam a ruptura hipotética da barragem da UHE Três Irmãos, no rio Tietê, resultando em mapas de inundação e definição de base de um plano de evacuação para a população afetada.

Outros trabalhos sobre ruptura hipotética de barragem com resultados bem sucedidos utilizando o HEC-RAS, podem ser vistos em Gomes et al. (2015), que realizou a modelagem no rio Ribeira do Iguape, no estado do Paraná; Rendon, Ashworth e Smith (2012), que aplicaram o estudo nos lagos Ellsworth e Lawtonka (Estado Unidos); Asnaashari, Meredith e Scruton (2014), que o utilizaram para estudos no rio Colúmbia e no lago Pinaus (Canadá); e Almassri (2011), que apresentou uma análise de diferentes casos de simulação, na Inglaterra.

Uma das aplicações mais utilizadas do modelo é a elaboração de mapas de inundação para cenários de Tempos de Retornos definidos e simulação de eventos históricos passados. Dessa forma, pode-se definir zonas prioritárias de intervenção com medidas estruturais e não-estruturais, dentro no planejamento da macro e microdrenagem urbana, como nos trabalhos de Agrawal e Regulwar (2016), no rio Dudhana (Índia); Hdeib et al. (2016), no rio El-Awali (Líbano); Shahriparsa et al. (2016), no rio Sungai Maka (Malásia); Mudabeti e Mfundisi (2013), no rio Kavango (Namíbia); Peña-Guzmán et al. (2016) no rio Frio (Colômbia).

O uso do modelo para a gestão de água para irrigação, como suporte ao planejamento de irrigação, pode ser observado em Filintas et al. (2015), que o aplicou no rio Pinios (Grécia) e evidenciou o uso dessa ferramenta. Estudos sobre a qualidade da água e dispersão de poluentes também podem ser feitos com eficácia por meio da modelagem hidrodinâmica, como os estudos no rio Macacu, Rio de Janeiro (CASTRO, 2015) e no rio Nitra (HALAJ et al., 2015; PECHÁČOVÁ et al., 2012).

4. Conclusões

Este estudo mostrou o uso potencial do modelo HEC-RAS para analisar os eventos extremos máximos de vazões, em um estudo de caso no rio Tapajós, permitindo fazer uma avaliação preliminar de processos mais complexos, a partir da modelagem hidrodinâmica. A calibração e validação do modelo hidrodinâmico apresentaram ajustes satisfatórios entre os dados simulados e observados. Mesmo assim, é necessário que se faça

trabalhos de campo para melhorar a acurácia do modelo, principalmente quanto aos coeficientes de rugosidade e dados de geometria.

A distribuição de Valor Extremo Generalizado demonstrou um bom desempenho na estimação das vazões para os respectivos Tempos de Retorno, sendo indicada a sua aplicação para estes fins na Bacia do rio Tapajós. Mesmo apresentando limitações, o modelo representa uma ferramenta importante dentro do campo da gestão hídrica, pois possibilita a previsão das alterações em um recurso hídrico, com base em cenários ambientais definidos pelo usuário.

À luz dos resultados fornecidos pela modelagem hidrodinâmica, os gestores dos recursos hídricos podem desenvolver estratégias no planejamento da Bacia do rio Tapajós, favorecendo a mitigação de prováveis desastres através da abordagem técnica proposta. Salienta-se que a modelagem ambiental é uma simplificação dos processos naturais complexos e, por isso, a mesma deve ser utilizada com cautela, devido as suas limitações.

Contribuições dos Autores: Concepção, Eliézer Silva e Fiamma Alves; metodologia e escrita, Eliézer Silva, Fiamma Alves e Marcelo Souza; análise formal, Marcelo Souza e Mayke Progênio; revisão, Mayke Progênio e Carlos Costa; supervisão, Mayke Progênio e Carlos Costa. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Esta pesquisa não recebeu nenhum financiamento externo

Agradecimentos: Os autores agradecem ao Grupo de Estudo em Energia e Processos na Amazônia (GEEPAM) da Universidade do Estado do Pará (UEPA) por todo suporte durante a elaboração do trabalho. Aproveitamos o espaço para agradecer também a todos os profissionais de saúde que estão na linha de frente no combate ao novo corona vírus, por toda dedicação e serviços prestados, assim como os pesquisadores, que atuam para definir estratégias na prevenção e tratamento da doença.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse

Referências

1. AGRAWAL, R.; REGULWAR, D. G. Flood Analysis of Dhudhana River in Upper Godavari Basin Using HEC-RAS. **International Journal of Engineering Research**, Karad, v.5, n.1, p.188-191. 2016. DOI: 10.17950/ijer/v5i1/044
2. ALMASSRI, B. **Numerical Simulation Analysis of Dam Breaks using ISIS & HEC-RAS**. Dissertação (Mestrado em Civil & Structural Engineering) - School of Engineering Design and Technology, University of Bradford, Bradford. 2011. 106 p.
3. ANA - Agência Nacional de Águas. **Portal HidroWeb - Rede Hidrometeorológica Nacional**. <http://www.snirh.gov.br/hidroweb>. Acesso em: 01/02/2019.
4. ASNAASHARI, A.; MEREDITH, D.; SCRUTON, M. (2014). Dam breach inundation analysis using HEC-RAS and GIS two case studies in British Columbia, Canada. In: **Canada Dam Association 2014, Annual Conferenc**. Alberta: Banff, p. 1-8.
5. BOZZA, A.; DURAND, A.; CONFORTOLA, G.; SONCINI, A.; ALLENBACH, B.; BOCCHIOLA, D. Potential of remote sensing and open street data for flood mapping in poorly gauged areas: a case study in Gonaives, Haiti. **Applied Geomatics**, v.8, p.117-131. 2016. DOI: 10.1007/s12518-016-0171-x
6. CASTRO, F. F. Simulação hidrológica de qualidade de águas de bacias contribuintes da baía de Guanabara. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH), 21., 2015, Brasília. **Anais...** Porto Alegre: ABRH. 2015. p. 1-8. ISSN 2318-0358.
7. CESTARI JUNIOR, E.; SOBRINHO, M. D.; OLIVEIRA, J. N. Estudo de propagação de ondas para auxiliar a elaboração do plano de ação emergencial externo - PAE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.20, n.3, p.689-697. 2015. DOI: 10.21168/rbrh.v20n3.p689-697
8. CHOW, V. T. **Open Channel Hydraulics**. 1ª Ed. Nova York: McGraw-Hill, 1959. 680 p.
9. FEARNSIDE, P. M. Amazon dams and waterways: Brazil's Tapajós basin plans. **Ambio**, v.44, p.426-439. 2015. DOI: 10.1007/s13280-015-0642-z
10. FILINTAS, A. T.; HATZIGIANNAKIS, E.; PANAGOPOULOS, A.; ARAMPATZIS, G.; ILIAS, A.; HATZISPIROGLOU, I. Hydrological modeling of Pinios River (Greece) water flows as assisting tool for environmental and agricultural water resources management using River Analysis Models. In: Fifth International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning & Economics and SECOTOX Conference, 5., 2015, Mykonos. **Anais...** Volos: Society of Ecotoxicology and Environmental Safety (SECOTOX). 2015.
11. GOMES, J.; VEIGA, B. V.; ROMERO, A.; GUERRA, A. A. Investigação da influência dos parâmetros definidores da formação da brecha de ruptura de uma barragem sobre o hidrograma de cheia a jusante. In: XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens, 30., 2015, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Comitê Brasileiro de Barragens. 2015. p.1-20.

12. GROHMANN, C. H.; RICCOMINI, C.; STEINER, S. S. Aplicações dos modelos de elevação SRTM em geomorfologia. **Revista Geográfica Acadêmica**, Piracicaba, v.2, n.2, 73-83. 2008.
13. GRUBE, R.; REYNAUD, F.; ARAÚJO FILHO, M. F. Aspectos do dimensionamento hidráulico do canal de derivação da UHE Belo Monte. In: XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens, 30., 2015, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Comitê Brasileiro de Barragens. 2015. p.1-20.
14. HALAJ, P.; BÁREK, V. B.; BÁREKOVÁ, A.; HALAJOVÁ, D. Application of HEC-RAS water quality model to estimate contaminant spreading in small stream. **Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods Technologies**, v.7, n.1, p.482-491. 2015.
15. HDEIB, R.; ABDALLAH, C.; MOUSSA, R.; HIJAZI, S. **Flood Hazard Mapping Assessment for El-Awali River Catchment-Lebanon**. In: European Geosciences Union General Assembly, 2016, Viena. **Resumos...** Viena: European Geosciences Union. 2016. p. 17305
16. HOLANDA, P. S. **Modelagem hidrodinâmica e estudo morfológico do lago Água Preta: um dos mananciais da grande Belém**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém. 2010. 75 p.
17. LEES, A. C.; PERES, C. A.; FEARNSIDE, P. M.; SCHNEIDER, M.; ZUANON, J. A. S. Hydropower and the future of Amazonian biodiversity. **Biodiversity and Conservation**, v. 25, n. 3, p. 451-466, 2016. DOI: 10.1007/s10531-016-1072-3
18. LOITZENBAUER, E.; MENDES, C. A. B. Integração da gestão de recursos hídricos e da zona costeira em Santa Catarina: a zona de influência costeira nas bacias dos rios Mampituba, Araranguá, Tubarão e Tijucas, SC. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre v.21, n.2, p.466-477. 2016. DOI: 10.21168/rbrh.v21n2.p466-477
19. MATHWAVE TECHNOLOGIES. **Easyfit help**. Software versão 5.6. 2015.
20. MELO, A. C. S.; VIEIRA, A. T. S.; CORDEIRO, B. A. F. Diagnosis of the Potential for Soybeans Outflow Through Ports in the State of Pará: A Bibliographical and Documentary Analysis. **InterSciencePlace – International Scientific Journal**, v. 12, n. 3, p. 116-132 2017. DOI: 10.6020/1679-9844/v12n3a8
21. MONTE, B. E. O.; COSTA, D. D.; CHAVES, M. B.; MAGALHÃES, L. O.; UVO, C. B. Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.21, n.1, p.152-167. 2016. DOI: 10.21168/rbrh.v21n1.p152-167
22. MUDABETI, A. M.; MFUNDISI, K. B. Development of a hydraulic model for the Kavango river for improved disaster risk management in Namibia. **Journal of Environmental Science and Water Resources**, v.2, n.9, p.310-319. 2013.
23. PARON, P.; BALDASSARRE, G. D. **Hydro-Meteorological Hazards, Risks, and Disasters**. 1ª Ed. Elsevier, 2014. 283 p.
24. PECHÁČOVÁ, K.; ŠINKA, Z.; OCHMANOVÁ, L.; HALAJ, P. Application of HEC-RAS Model for Research of Factors Affecting the Pollution Propagation in Small Streams. **Acta Horticulturae et Regiotecturae**, v.15, n.2, p.49-52. 2012.
25. PEÑA-GUZMÁN, C.; ALVARINO, N.; MORA, C.; MESA, D. Determinación de áreas de inundación en el Municipio de Chia- Colombia mediante Hec-Ras en la cuenca baja del río Frio. **European Scientific Journal**, v.12, n.5, p.386-392. 2016.
26. PINHO, P. F.; MARENGO, J. A.; SMITH, M. S. Complex socio-ecological dynamics driven by extreme events in the Amazon. **Regional Environmental Change**, v.15, n.4, p.643-655. 2015. DOI: 10.1007/s10113-014-0659-z
27. PLANCHON, O.; DARBOUX, F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. **Catena**, v. 46, n. 2-3, p. 159-176, 2002.
28. PRAMANIK, N.; PANDA, R. K.; SEN, D. One dimensional hydrodynamic modeling of river flow using DEM extracted river cross-sections. **Water Resources Management**, v.24, n.835, p.835-852. 2010. DOI: 10.1007/s11269-009-9474-6
29. PROGÊNIO, M. F.; COSTA FILHO, F. A. M.; CRISPIM, D. L.; RAIOL SOUZA, M. J.; PIMENTEL DA SILVA, G. D.; FERNANDES, L. L. Ranking sustainable areas for the development of tidal power plants: A case study in the northern coastline of Brazil. **International Journal of Energy Research**, v. 44, n. 12, p. 9772-9786, 2020. DOI: 10.1002/er.5716
30. QUIROGA, V. M.; KURE, S.; UDO, K.; MANO, A. Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. **Revista Iberoamericana del Agua**, v.3, n.1, p.25-33. 2016. DOI: 10.1016/j.riba.2015.12.001
31. RENDON, S. H.; ASHWORTH, C. E.; SMITH, S. J. **Dam-Breach Analysis and Flood-Inundation Mapping for Lakes Ellsworth and Lawtonka near Lawton, Oklahoma**. Reston, Va: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 2012.
32. RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental**. Ministério da Ciência e Tecnologia: INPE, Relatório Técnico Parcial. Dezembro, 60 p. 2000.
33. SHAHIRIPARSA, A.; NOORI, M.; HEYDARI, M.; RASHIDI, M. Floodplain zoning simulation by using HEC-RAS and CCHE2D models in the Sungai Maka river. **Air, Soil and Water Research**, v.9, n.9, p.55-62. 2016. DOI: 10.4137/ASWR.S36089

34. SILVA, E. C. R.; ALVES, F. B. Análise das vazões médias do rio Tapajós como apoio ao planejamento hídrico. In: Anais do II Congresso Amazônico de Meio Ambiente e Energia Renováveis, 2., 2016, Belém. **Anais...** Belém: UFRA. 2016.
35. SOARES, J. A. S.; SOARES, R. M. B. S.; BARBOSA, E. M.. Análise da evolução do arcabouço legislativo no trato dos recursos hídricos no Brasil até a Lei 9.433/97L. **Nature & Conservation**, v. 12, n. 2, p. 50-59, 2019. DOI: 10.6008/CBPC2318-2881.2019.002.0006
36. USACE - U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual**. Hydrologic Engineering Center (HEC), Version 4.1. Davis, 2010.
37. WOLFF, W. **Avaliação e nova proposta de regionalização hidrológica para o Estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2013. 113 p.



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.