

Uso da altimetria espacial para correção da cota de fundo de um modelo hidráulico. Estudo de caso: Resultados Preliminares no rio Madeira

João Paulo Lyra Fialho Brêda¹
Rodrigo Cauduro Dias de Paiva¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS/IPH
Caixa Postal 15029 - 91501-970 – Porto Alegre – RS, Brasil
joapaulofb@gmail.com / rodrigocpaiva@gmail.com

Abstract. River bottom level is an important parameter of a hydraulic model; however, this information is frequently not available. As an alternative to “in situ” measurements, methods based on remote sensing and geomorphologic equations are used to estimate river bottom level, despite of their significant errors. Therefore this paper suggests a simplified method to calibrate this model parameter using altimetry measurements of the Envisat satellite. The hydraulic model used for this test is adapted from Bates et al. (2010), called in the literature as inertial model, using a rectangular shaped cross section where the width is estimated by Landsat images. The calibration method is basically a spatial interpolation of the difference between simulated water levels and altimetry measurements. This preliminary test was taken in Madeira river, a 1.3 million km² basin affluent of the Amazon. The calibrated model results outperform the non-calibrated results regarding bias and mean squared error (MSE) as well. Yet, the modeled water elevation had shown higher amplitude compared to local measurements irrespective of the bottom level set. This fact indicates that the model formulation is too simplified for this system, so the model still need to be improved either by taking floodplains or variable channel form into account or calibrating other parameters as well.

Palavras-Chave: Hydraulic model, river bottom level, altimetry, Envisat, modelo hidráulico, nível de fundo do rio, altimetria.

1. Introdução

Conhecer a dinâmica de um rio é importante para entender como o fluxo d’água é influenciado por variações na vazão, contribuições laterais, forçantes de nível na foz ou implantação de estruturas hidráulicas. A modelagem hidrodinâmica é uma ferramenta utilizada para representar a propagação do escoamento em um rio e assim entender sua dinâmica. Como a direção predominante do fluxo d’água em rios é longitudinal, é razoável adotar um modelo unidimensional baseado nas equações de águas rasas ou equações de Saint-Venant.

Para que o modelo hidrodinâmico produza resultados condizentes com a realidade seus parâmetros devem ser bem selecionados. Parâmetros como área de seção transversal podem ser medidos diretamente em campo, no entanto, pela dificuldade de acesso ao rio e os custos associados, muitas vezes tais medições se tornam inviáveis.

Dessa forma, métodos alternativos como o sensoriamento remoto e relações geomorfológicas (Coe et al, 2008) se apresentam como opções para produzir informações sobre o sistema modelado. Através de produtos de sensoriamento remoto como Modelos Digitais de Elevação (MDE) e imagens de satélite é possível estimar a declividade do terreno, o traçado da rede de drenagem e a largura superficial do rio (Siqueira et al, 2016). Outros parâmetros como a profundidade da calha do rio e novamente a largura podem ser estimados por equações geomorfológicas, calculados como função da área de drenagem.

No entanto, esses métodos não são completamente acurados. Através de um teste de sensibilidade, Paiva et al (2013) demonstra o quanto a incerteza nos parâmetros influenciam o resultado do modelo. Liu e Gupta (2007) também comenta o impacto das incertezas e ressalta a necessidade de calibrar os parâmetros utilizando dados observados. Entretanto, semelhante ao que ocorre com a medição de parâmetros, dados observados “in situ” muitas vezes são escassos, sendo necessário recorrer a outros métodos de monitoramento.

A altimetria espacial é uma técnica de sensoriamento remoto que mede o nível da superfície terrestre a partir do espaço. Estudos dessas últimas décadas têm mostrado o potencial de aplicação da altimetria espacial para o monitoramento de hidrossistemas continentais (Paiva et al, 2013). O satélite Envisat orbitou a Terra entre 2002 e 2012, completando um ciclo a cada 35 dias, e gerou dados com precisão de cerca de 30 cm (Frappart, 2006). Tais observações se apresentam como informações significativas em bacias com pequena quantidade de dados.

Dessa maneira, é proposto nesse trabalho testar os dados de altimetria espacial como observações para calibrar as cotas de fundo de um modelo hidráulico. O teste preliminar consiste em um estudo de caso no rio Madeira, afluente do rio Amazonas, usando uma calibração simples realizada pela interpolação da diferença entre os dados do modelo e das observações altimétricas. As estimativas iniciais dos parâmetros são inteiramente baseadas em sensoriamento remoto e relações geomorfológicas e as observações altimétricas oriundas do satélite Envisat. O modelo hidráulico utilizado é adaptado de Bates et al (2010), denominado na literatura como modelo inercial, usando como dados de entrada observações de vazão e nível da Agência Nacional de Águas (ANA) entre 2002 e 2010.

2. Metodologia

2.1. Rio Madeira

O rio Madeira é um dos principais afluentes do rio Amazonas. Sua bacia abrange uma área de aproximadamente 1,3 milhão km², o que equivale a 20 % da bacia amazônica. O rio Madeira nasce no território da Bolívia e Peru, distando até 3.300 km da sua foz no Brasil (Figura 1). A descarga média do rio na foz é cerca de 30 mil m³/s e sua pluviometria anual perto de 2000 mm/ano. A variação no seu nível pode chegar a 10 metros nos trechos próximos à foz.

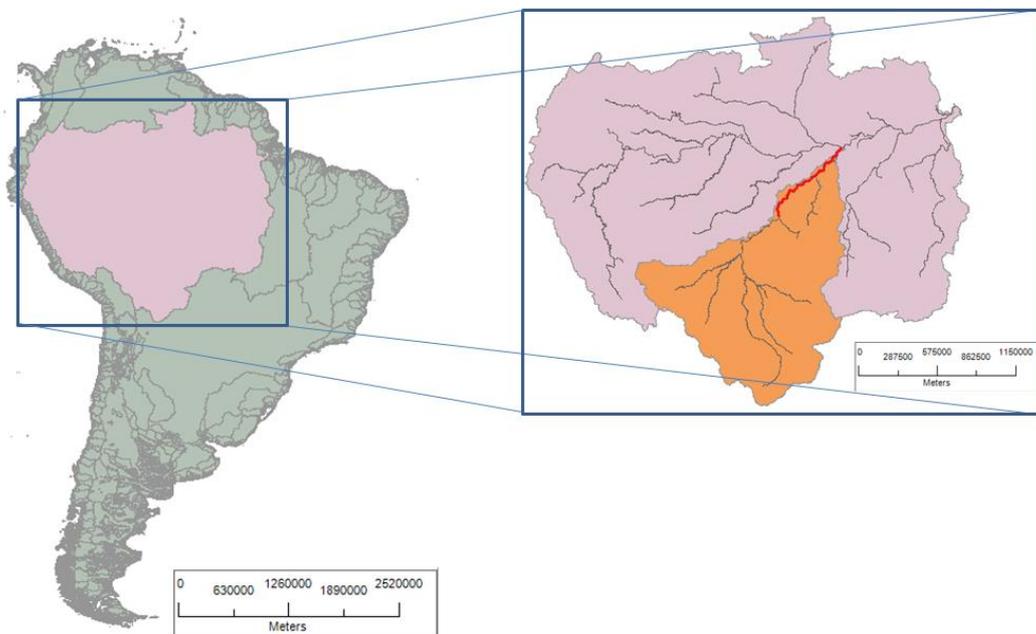


Figura 1. Localização do Rio Madeira

O trecho avaliado é o canal principal do Madeira que tem início em Porto Velho/RO (8°45' S, 63°55' O), que já corresponde a 3/4 da área de drenagem da bacia, e percorre 1100 km até sua foz no rio Amazonas (3°20' S, 58°45' O).

2.2. Determinação dos Parâmetros

A rede de drenagem foi delimitada seguindo a direção de fluxo por diferença de nível adquirida de um MDE de resolução de 500 m gerado pela missão SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission). De maneira semelhante se obteve a área acumulada de drenagem correspondente a cada trecho da rede utilizando o software IPH Hydro Tools (detalhes em Siqueira et al, 2016). A rede de drenagem foi dividida em trechos de aproximadamente 5 km, gerando assim 211 trechos no canal principal de Porto Velho à foz do rio Madeira.

A largura dos trechos foi definida a partir de imagens LANDSAT no período de setembro a novembro (período seco do rio). Gerou-se uma máscara de água classificando 7 imagens LANDSAT 8 na banda 5 (infravermelho próximo) que continham o percurso do canal estudado. A área de cada trecho da máscara foi então dividida por seu comprimento para que pudesse se obter a largura do canal. No intuito de deixar a transição entre os trechos mais suave foi-se aplicado à largura um filtro de média de 15 termos (7 jusante e 7 montante).

Já a cota de fundo inicial do rio foi obtida descontando do nível do terreno a profundidade máxima da seção. O nível de cada trecho foi estimado pela média da cota dos pixels do MDE por onde passava a rede de drenagem. Já a profundidade máxima dos trechos foram definidos através de uma relação geomorfológica apresentada por Paiva et al (2013). O autor utilizou medições de áreas transversais do rio realizadas pela ANA para alcançar a seguinte equação:

$$H = 1,25 \times A_d^{0,2} \quad (1)$$

Em que H é a profundidade máxima em metros e A_d é a área de drenagem em km^2 .

2.3. Modelo Inercial

O modelo inercial consiste em uma simplificação das equações de águas rasas em que o termo de inércia advectiva é desprezado (Bates et al, 2010). O modelo hidráulico utilizado nesse trabalho está majoritariamente descrito em Fan et al (2014). A calha do modelo é considerada retangular, assumindo largura e cota de fundo conforme o item 2.2. Basicamente esse modelo consiste nas seguintes equações numéricas:

$$Q_i^{t+1} = \frac{Q_i^t - \Delta t g A_i^t \frac{(y_i^t - y_{i+1}^t)}{\Delta x}}{1 + \frac{\Delta t g |Q_i^t| n^2}{A_i^t R_i^{t^3}}} \quad (2) \quad \left| \quad h_{i+1}^{t+1} = h_{i+1}^t - \frac{1}{\Delta x b_{i+1}} (Q_i^{t+1} - Q_{i+1}^{t+1} - Q a_{i+1}^{t+1}) \quad (3)$$

Em que Q representa a vazão no rio principal (m^3/s); Qa a vazão de contribuição lateral (m^3/s); h a profundidade (m); y o nível (m), dado por cota de fundo (z) mais profundidade; b a largura do trecho (m); g a gravidade (m/s^2); e n o coeficiente de rugosidade de Manning. A e R são respectivamente a área transversal e o raio hidráulico calculados na transição entre trechos, da mesma maneira que a vazão. Δt e Δx são o incremento temporal e espacial respectivamente, sendo o Δx igual a 5 km e Δt calculado por uma equação baseada na condição de Courant-Freidrichs-Levy utilizando um $\alpha = 0,7$ (ver Bates et al, 2010).

2.4. Condições de Contorno

A condição de contorno de montante foi uma série de dados de vazão do posto fluviométrico Porto Velho (cód. 15400000) disponibilizado pela ANA e monitorado pela CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). Como os dados de vazão se interrompem em janeiro de 2008, foi necessário utilizar dados de nível do mesmo posto para estender a série.

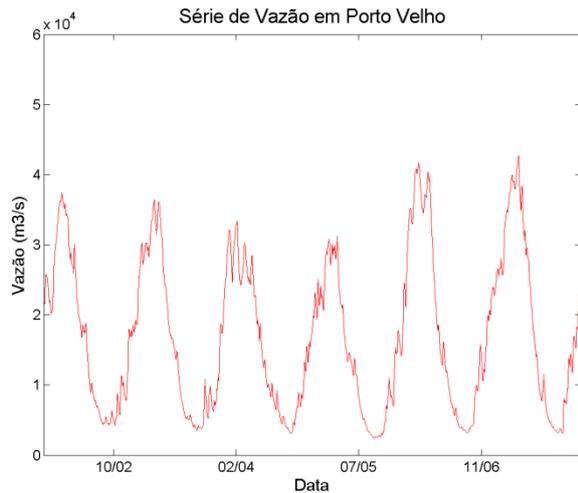


Figura 2. Condição de Contorno de Montante

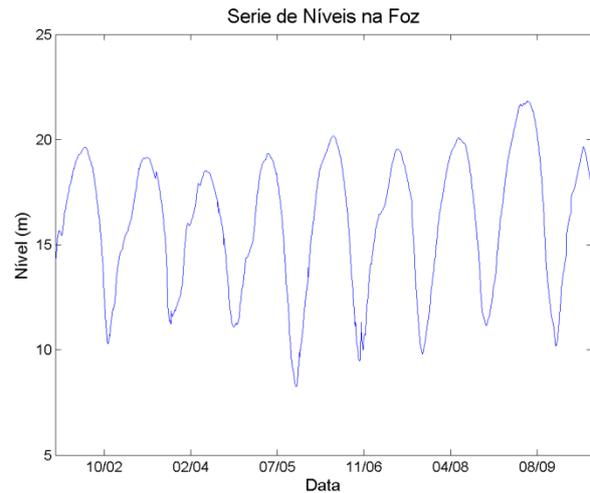


Figura 3. Condição de Contorno de Jusante

A condição de contorno de jusante foi obtida por uma combinação entre séries de níveis dos postos Nova Olinda do Norte (cód. 15940000), que fica a 80 km da foz, e Itacoatiara (cód. 16030000), já no rio Amazonas, 50 km a jusante do Madeira, disponibilizados pela ANA. Os dados tiveram que ser combinados por haver falhas em ambos durante o período analisado (jan/2002 - jun/2010).

Quanto aos parâmetros, foram testados dois valores para o coeficiente de rugosidade de Manning, $n = 0,030$ e $0,035$, que estão contidos em um intervalo de valores comum na literatura para a região (Paiva et al, 2013). Já a contribuição lateral foi estimada observando a diferença entre duas séries de vazões de postos fluviométricos ao longo do rio. Um dos postos utilizados foi o de Porto Velho (cód. 15400000) e o outro é o Manicoré (cód. 15700000), 600 km a jusante. A partir dos hidrogramas desses dois postos, foi estabelecida uma função senoidal que fornecia a vazão lateral de cada trecho observando a área de drenagem incremental e a defasagem entre os postos.

2.5. Observações de Altimetria

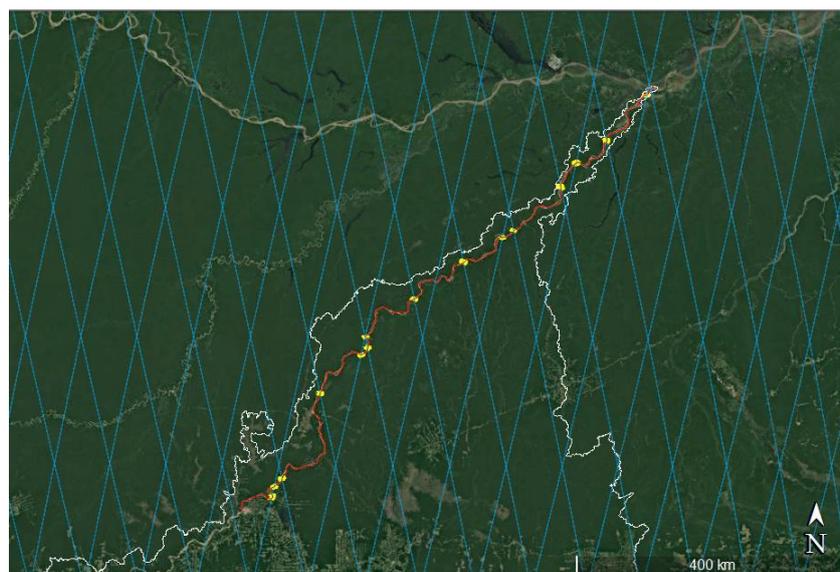


Figura 4. Observações por Altimetria Espacial. Azul - traços do satélite; Vermelho – rio Madeira; Amarelo – estações virtuais; Branco – traçado da bacia hidrográfica.

As observações para calibração da cota de fundo são obtidas de dados de altimetria espacial do satélite ENVISAT. Dezesesseis traços do ENVISAT cruzam o fragmento de rio estudado, criando assim estações virtuais (Figura 4) que forneceram dados de nível a cada 35 dias, desde setembro de 2002 a outubro de 2010, quando o satélite alterou sua órbita.

2.6. Método De Calibração

A calibração é realizada por um método simples que altera a cota de fundo do rio conforme a diferença entre o nível do modelo e o estimado por altimetria espacial. Nos trechos que contêm uma estação virtual, a diferença entre a observação e o resultado (ΔZ) é diretamente somada à cota de fundo. Nos demais trechos será feita uma interpolação linear dessas diferenças que também serão somadas à cota de fundo. Como as observações não são no mesmo dia, então a diferença entre observado e o modelado no trecho que contém uma estação virtual é guardada até que haja observação nas demais estações e assim possa ser feita uma nova interpolação linear para todo o fragmento estudado. A cota de fundo utilizada para verificar o resultado do modelo será a média das cotas de fundo corrigidas dos últimos dois anos de simulação.

2.7. Critérios de Avaliação

Com a calibração efetuada os resultados foram comparados com as séries de nível dos postos fluviométricos Prosperidade (cód. 15490000), Humaitá (cód. 15630000) e Fazenda Vista Alegre (cód. 15860000), que estão a aproximadamente 1000, 840 e 260 km da foz do Madeira. A análise será baseada em três índices:

- Erro quadrático médio (EQM): Média dos erros elevados ao quadrado;
- Viés: Diferença entre a média do resultado e a média do observado;
- Coefficiente de Correlação de Pearson (r);

3. Resultados

Esta análise avalia o desempenho do método de calibração proposto, testando dois valores diferentes de rugosidade de Manning (0,030 e 0,035). A estimativa inicial da cota de fundo foi obtida por meio de uma equação geomorfológica ajustada por Paiva et al (2013).

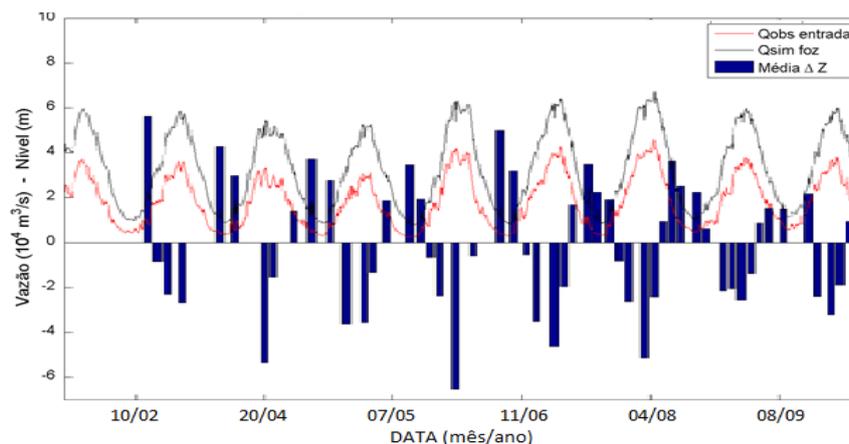


Figura 5. Variação da Cota de Fundo pelo método de Calibração ($n=0,03$). Hidrogramas de entrada (vermelho) e saída (preto), Média dos incrementos na cota de fundo (Δz - azul).

Através da Figura 5 nota-se que a cota de fundo é ajustada conforme a época do ano. Em períodos mais caudalosos, o nível d'água observado por altimetria está mais baixo que o resultante do modelo. Já em vazões baixas o modelo subestima o nível do rio. Esse padrão se repete para uma rugosidade de 0,035.

A cota de fundo após calibração é apresentada na Figura 6. Percebe-se que existe uma tendência de criar valas, constituindo um tipo de barragem natural, formando patamares e regiões mais íngremes. Embora a cota de fundo resultante do método de calibração não represente a realidade, os níveis modelados podem estar mais próximos aos observados.

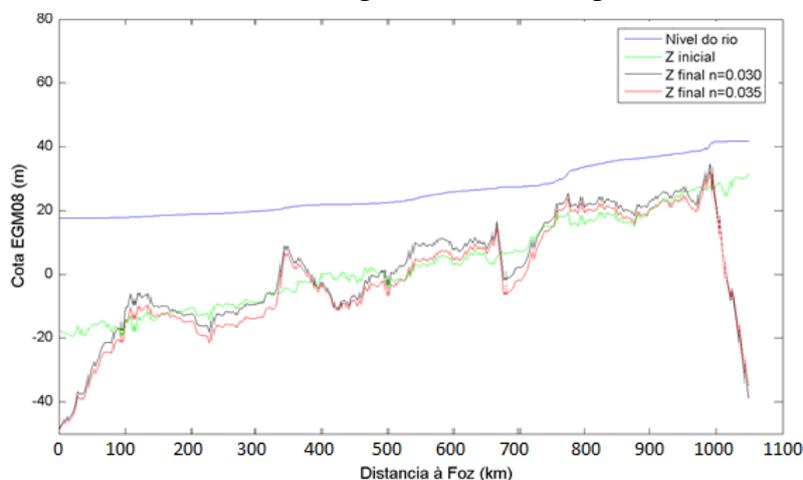


Figura 6. Perfil Longitudinal do Madeira e as Cotas de Fundo avaliadas

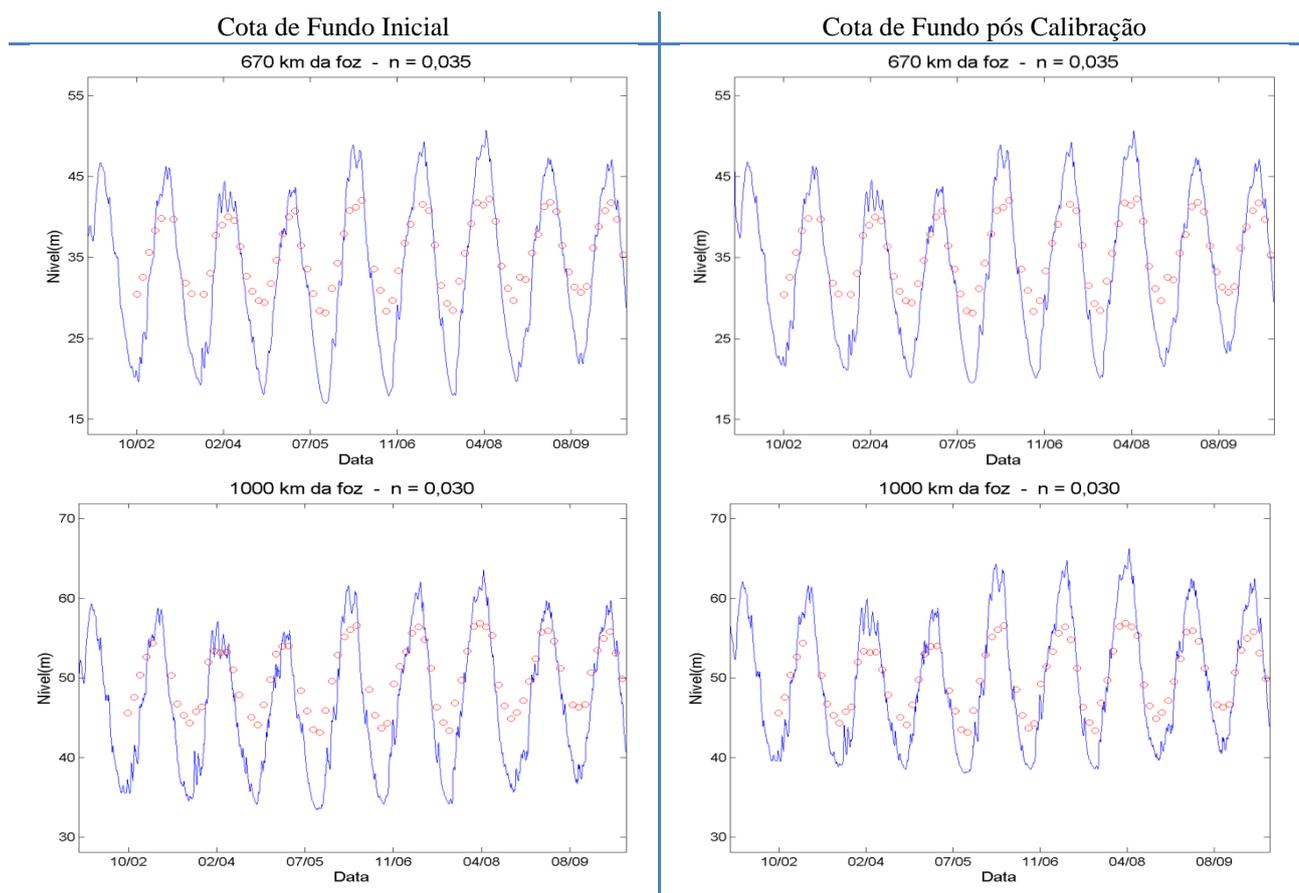


Figura 7. Medições de Altimetria (vermelho) e Níveis Modelados (azul)

A Figura 7 mostra medições da altimetria espacial e a série de níveis modelada na seção do rio correspondente. Percebe-se que nos picos o modelo, independente da cota de fundo, superestima o nível do rio, e o inverso ocorre em águas mais rasas. Esses resultados provavelmente são consequências da formulação do modelo, que foi elaborado sem

considerar planícies de inundação e assumindo uma calha retangular. As planícies de inundação atuam como reservatórios laterais impactando na celeridade da onda de cheia e diminuindo os níveis d'água máximos no rio. Ao adotar um canal retangular assume-se que a largura superficial do rio é igual em períodos de seca e de cheia, sendo que na natureza o que normalmente se observa é o crescimento da largura conforme o aumento do nível. Adotando trechos mais largos o impacto da vazão no nível diminuiria.

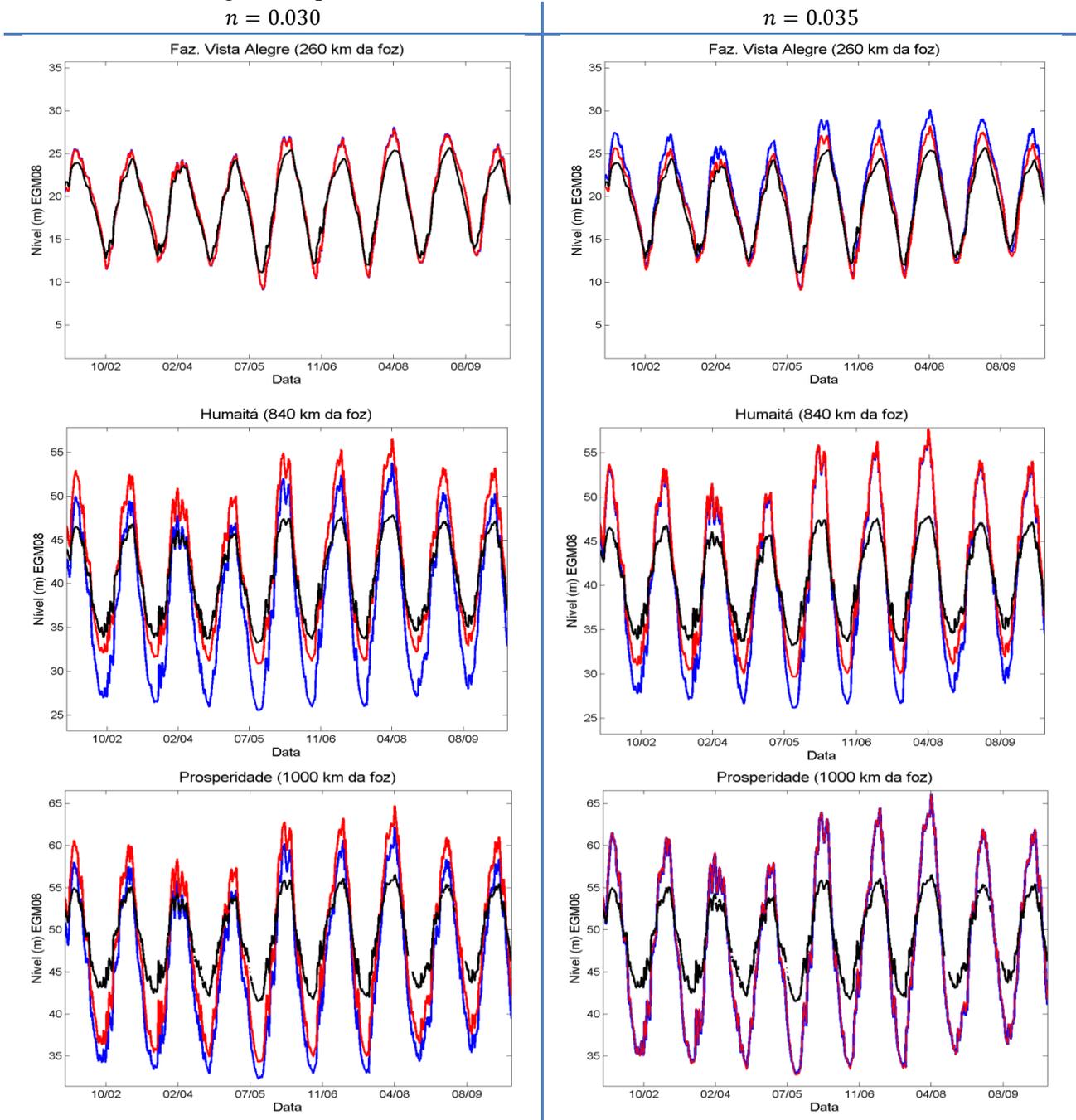


Figura 8. Comparação dos Níveis Modelados com Postos Fluviométricos. (Preto – dados observados; Vermelho – resultados pós-calibração; Azul – resultados pré-calibração).

Apesar das limitações do modelo, pode-se afirmar que houve um ganho ao utilizar o método de calibração proposto. A Figura 8 traz os níveis modelados com e sem calibração e as séries de níveis em postos fluviométricos. Percebe-se que a amplitude do nível diminui levemente após a calibração do modelo, além disso, a média de nível também se altera. Os níveis modelados no trecho correspondente à estação fluviométrica da Fazenda Vista Alegre

apresentaram os melhores resultados porque esse posto está mais próximo à foz, cuja condição de contorno com dados reais controla o nível. Quanto mais afastado da foz, maior o erro do modelo nos dados de nível. Em geral o modelo calibrado apresentou um Erro Quadrático Médio (EQM) e um Viés menor em valor absoluto (Tabela 1). Já os valores de correlação parecem não alterar significativamente com a calibração.

Tabela 1. Índices de Desempenho

N	Posto Fluviométrico	Viés (m)		R		Raiz do EQM (m)	
		Inicial	Pós-Calibração	Inicial	Pós-Calibração	Inicial	Pós-Calibração
0,030	Prosperidade	-3,514	-0,985	0,997	0,998	5,344	4,278
	Humaitá	-2,736	1,147	0,996	0,995	4,542	3,105
	Fazenda Vista Alegre	0,354	0,332	0,986	0,986	1,138	1,064
0,035	Prosperidade	-1,358	-1,198	0,997	0,997	5,161	5,133
	Humaitá	-0,591	0,961	0,996	0,995	4,596	3,685
	Fazenda Vista Alegre	1,320	0,370	0,989	0,985	1,966	1,186

4. Conclusão

Em resumo, o modelo calibrado produziu um resultado superior ao modelo não calibrado. Considerando que o método é simples e não exige muito recurso computacional, a calibração proposta nesse trabalho pode ser uma boa alternativa a métodos mais sofisticados.

Na sequência do trabalho é importante verificar alguns detalhes. Observa-se que em épocas de cheia do Madeira o modelo superestima o nível do rio e subestima em épocas de seca. Tal fato pode ter ocorrido porque o modelo é simplificado, pois considera uma seção transversal retangular e não representava planícies de inundação. Além disso, existe a possibilidade dos outros parâmetros não terem sido bem selecionados, como a rugosidade de Manning e a largura. Também é necessário ressaltar que o método foi aplicado a partir de uma boa condição inicial de cota de fundo, testada previamente na literatura. Dessa forma, no decorrer da pesquisa pretende-se testar se o método teria bons resultados diante de condições iniciais diversas, além de considerar o efeito das planícies de inundação.

Referências

- Bates, P. D.; Horritt, M. S.; Fewtrell, T. J. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. **Journal of Hydrology**, v. 387, p. 33-45, 2010.
- Siqueira, V. A.; Fleischmann, A. S.; Jardim, P. F.; Fan, F. M.; Collischonn, W. IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open- source environment. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n.1, p. 274-287, 2016.
- Coe, M. T.; Costa, M. H.; Howard, E. A.. Simulating the surface waters of the Amazon River basin: impacts of new river geomorphic and flow parameterizations. **Hydrological Processes**, v. 22, p. 2542-2553, 2008.
- Fan, F. M., Pontes, P. R., Paiva, R. C., & Collischonn, W. Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 4, p. 137-147, 2014.
- Frappart, F.; Calmant, S.; Cauhopé, M. Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon basin. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, p. 252-264, 2006.
- Liu, Y.; Gupta, H. V. Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework. **Water Resources Research**, v. 43, 2007.
- Paiva, R. C.; Buarque, D. C.; Collischonn, W.; Bonnet, M.-P; Frappart, F.; Calmant, S., Mendes, C. A. B. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. **Water Resources Research**, v. 49, p. 1-18, 2013.