

Anais do XX SBSR

XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO XX Brazilian Symposium on Remote Sensing

2 a 5 de abril de 2023
Florianópolis, SC

Editores

Douglas Francisco Marcolino Gherardi
Ieda Del'Arco Sanches
Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**São José dos Campos
2023**

PREVISÃO DE NÍVEIS D'ÁGUA A PARTIR DE DADOS ALTIMÉTRICOS DOS SATÉLITES SENTINEL 3A E JASON 3

Arthur Kolling Neto¹, Rodrigo Cauduro Dias de Paiva², Flavio Fagundes de Paula³ e Larissa de Castro Ribeiro⁴

¹ IPH /UFRGS, arthur.kolling@hotmail.com; ² IPH/ UFRGS, rodrigo.paiva@ufrgs.br; ³ IPH/UFRGS, engenheria.flaviofagundes@gmail.com; ⁴ IPH/UFRGS, larissa.ribeirocr@gmail.com;

RESUMO

Diante da ocorrência frequente de inundações e do seu poder destrutivo, a busca por melhorias na predição de risco, previsão e mapeamento de cheias constitui-se um grande desafio. Entretanto, o uso de dados de altimetria consiste numa alternativa viável e promissora. Este estudo visa prever os níveis d'água, para diferentes lead times, a partir de dados de altimetria dos satélites Jason 3 e Sentinel 3A, no rio Madeira. Foram utilizados dados de altimetria dos satélites Jason 3 (2017-2021) e Sentinel 3A (2016-2021) e da estação fluviométrica (15400000). As previsões foram realizadas por meio do ajuste de modelos de regressão em diferentes lead times, e os resultados foram avaliados com métricas estatísticas. O modelo com dados do Jason 3 e Sentinel 3A associados aos dados medidos apresentou melhor desempenho para antecedência de até 10 dias. Previsões acima de 16 dias tiveram erros maiores, porém ainda fornecem informações úteis para aplicações operacionais.

Palavras-chave — Inundação, regressão linear, sensoriamento remoto; rio Madeira.

ABSTRACT

Finding better methods for risk prediction, forecasting, and risk mapping is difficult given how frequently floods occur and how damaging they can be. Altimetry data, however, is a workable substitute for this advancement. This study aims to predict water levels, for different lead times, from altimetry data from the Jason 3 and Sentinel 3A satellites, on the Madeira River. Altimetry data from the Jason 3 (2017-2021) and Sentinel 3A (2016-2021) satellites and the fluviometric station (15400000) were used. Predictions were performed by fitting regression models at different lead times, and the results were evaluated with statistical metrics. The model with data from Jason 3 and Sentinel 3A associated with measured data performed best for lead times up to 10 days. Forecasts over 16 days had larger errors, but still provide useful information for operational applications.

Key words — Flooding, linear regression, remote sensing; Madeira river.

1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de inundações é um dos desastres naturais mais frequentes, devastadores e desafiadores para sociedade neste século [1], [2], constituindo uma das principais causas de danos econômicos, de estragos em áreas urbanas e da perda de vidas humanas em todo o mundo [1].

Diante da alta frequência das inundações e dos resultados destrutivos, a melhoria contínua das formas de predição de risco e a previsão e mapeamento de inundações repentinas [3] são fundamentais para a o planejamento e formulação de estratégias eficazes de defesa contra as cheias. Portanto, gerar modelos de previsão de inundação precisos é um dos principais objetivos de cientistas e governos [2].

O uso de observações de altimetria consiste numa opção para a obtenção de observações de rios e corpos de água. As medidas altimétricas de níveis de água fornecem importantes aplicações na modelagem, estudos de vazão, planícies de inundação, variação do nível de água [4]. Nesse sentido, tem-se satélites de missões passadas e atuais, como o ERS-2, ENVISAT, TOPEX/Poseidon (T/P), Jason-1/-2/-3, Sentinel-3A/-3B e IceSat-1/-2 e missões futuras, como Sentinel-6A/B e SWOT.

Observações de nível de água derivadas de altimetria do T/P em estações virtuais (EVs) a montante dos rios Ganges e Brahmaputra, na Índia, puderam ser usadas para prever níveis de água a jusante, em Bangladesh por meio de análise de regressão a cada 10 dias devido ao ciclo de repetição [5]. Além disso, níveis de água oriundos do satélite Jason-2, obtidos a cada 10 dias em EVs a montante, na Índia, possibilitaram a previsão diária de 5 dias em vazões a jusante, em Bangladesh [6].

No Brasil, inundações geram preocupação e causam diversos danos a sociedade. Entre janeiro e abril de 2014, diversos rios do sudoeste da Amazônia apresentaram níveis excepcionais. O rio Madeira em Porto Velho atingiu a marca recorde de 19,74 metros, mais de 3 metros acima da cota de emergência estabelecida por órgãos públicos nesse local – 16,68 metros e em 2020, o rio alcançou a cota de 16,26 metros. Comportamento semelhante foi observado nos rios Mamoré, Guaporé e Abunã, que também atingiram níveis excepcionais nesse verão.

Diante disso, o objetivo desse estudo é prever os níveis de água, para diferentes lead times, a partir de dados de

altimetria dos satélites Jason 3 e Sentinel 3A, e compará-los com a estação fluviométrica a jusante, no rio Madeira - RO.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Estudo de caso

O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do rio Madeira, que possui 1.368.400 km², vazão anual de aproximadamente 26.500 m³ s⁻¹, e é o segundo maior afluente do rio Amazonas [7].

A precipitação média anual na bacia é 1940 mm [8] e a variação climática, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, é Af (tropical úmido), Am (tropical chuvoso com monção) e Aw (tropical quente com estação seca) [8].

Para garantir a representatividade dos principais afluentes do rio Madeira, selecionou-se EVs no rio Madre de Dios e rio Mamoré, como é mostrado da Figura 1.

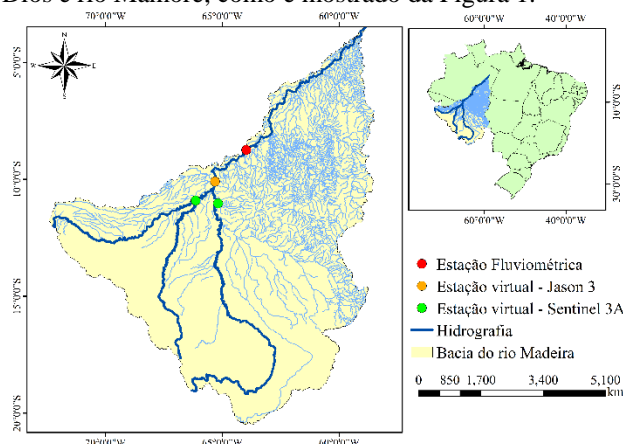


Figura 1. Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Madeira. As estações virtuais do satélite Sentinel 3A e Jason 3 nos rios Madre de Dios e Mamoré são representadas, respectivamente, por pontos verdes e laranja. O ponto vermelho corresponde ao medidor in situ a jusante, em Porto Velho.

Foram obtidos dados de nível de água da estação fluviométrica (Porto Velho – cód. 15400000) disponibilizada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) através do banco de dados HydroWeb. O período de dados foi compreendido entre os anos de 2016 a 2021.

Os dados de altimetria foram obtidos através de estações virtuais operacionais da base de dados HydroWeb (<http://www.legos.obs-mip.fr/en/soa/hydrologie/hydroweb/>) para os altímetros de nadir, Sentinel 3A e Jason 3, que medem o nível de água apenas em um plano vertical.

O satélite Sentinel 3A, lançado em 2016, é um satélite síncrono em órbita polar, opera a uma altitude média de 815 km, inclinação de 98,6° e ciclo de repetição de 27 dias. E o Jason 3 é uma missão de altímetro de satélite cooperativo internacional, lançado em 2016, que possui órbita com inclinação de 66°, não hélio-síncrona a 1.336 km de altitude média e resolução temporal de 10 dias, operando na

frequência de 13.575 GHz (banda Ku) e 5,3GHz (banda C) [9].

O período de análise foi baseado na disponibilidade de dados de níveis de água para cada traço dos satélites, compreendidos entre abril de 2016 a junho de 2021 para o Sentinel 3A e setembro de 2017 a agosto de 2021 para o Jason 3. Foram selecionadas duas estações virtuais do Sentinel 3A (EV 2753), localizadas no rio Madre de Dios e (EV 2686) no rio Mamoré, e uma EV do Jason 3 (EV 2542), no rio Madeira. As principais informações das EVs são mostradas na Tabela 1.

Satélite	Tempo médio (dias)	Nº de observações	Distância (km)
EV 2753 (Sentinel 3A)	27	67	324
EV 2686 (Sentinel 3A)	27	68	285
EV 2542 (Jason 3)	10	140	210

Tabela 1. Tempo médio entre duas observações consecutivas, número de observações e distância da estação fluviométrica, para cada estação virtual obtida no HydroWeb.

A previsão dos níveis de água foi obtida por meio de modelos de regressão linear simples (Eq. 1) e múltipla (Eq. 2), para o Jason 3 e Sentinel 3A, respectivamente. Desse modo, foi realizado o ajuste entre nível da água na estação fluviométrica e na EV para k dias de antecedência. O *lead time* k foi o mesmo adotado por [5], variando de 0 a 40 dias.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + e_i \quad (1)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + e_i \quad (2)$$

onde, Y a observação a ser estimada na estação em análise; X é a observação do posto a montante do posto em análise; β_0 é o valor esperado de Y quando todas as variáveis independentes forem nulas, β_k é a variação esperada em Y dado um incremento unitário em X_k , mantendo-se constantes todas as demais variáveis independentes; e_i é o erro não explicado pelo modelo.

Para análise dos resultados, definiu-se os intervalos de antecedência em 5, 25 e 40 dias. As falhas dos dados da estação fluviométrica foram preenchidas pelo método de interpolação linear com base na medição mais próxima no tempo. E a compatibilização das datas de leitura de cada traço do satélite resultou num intervalo final de 4 dias (56 leituras) entre as datas EV. O processamento dos dados foi realizado no *software* matlab.

A verificação do desempenho das previsões foi realizada para cada *lead time* por meio das anomalias. Além disso, foram calculadas as seguintes métricas estatísticas: índice de eficiência de Nash Sutcliffe – NSE, Raiz quadrada do erro quadrático médio – RMSE e coeficiente de correlação (*Corr*), descrita na Equação 3:

$$Corr_h(k) = \frac{cov[h_{situ}(t), h_{alti}(t+k)]}{stdev[h_{situ}(t)].stdev[h_{alti}(t+k)]} \quad (3)$$

em que de k é o *lead time*, t corresponde à data para a qual $h_{alti}(t+k)$ está disponível, cov é a covariância, $stdev$ é o desvio padrão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 são mostradas as anomalias de nível de água *in situ* (curva azul) e previstas a partir de regressão simples com os dados da EV 2542. Em geral, a previsão para 5 e 25 dias de antecedência apresentaram comportamento próximos, caracterizando os picos e a recessão da vazão. Para antecedência de 40 dias houve tendência ao adiantamento na ascensão dos picos e atrasos na descida, e maior diferença tanto para os picos e quanto para a estiagem.

As correlações entre anomalias da estação fluviométrica e a EV foram altos ($Corr > 0,9$) para *lead time* de até 23 dias e o NSE persistiu com 0,9 até a antecedência de 15 dias. O valor de RMSE foi ~0,6 m para previsões inferiores a 5 dias, porém, aumentou para os demais *lead times*, alcançando 3.4 m para 40 dias.

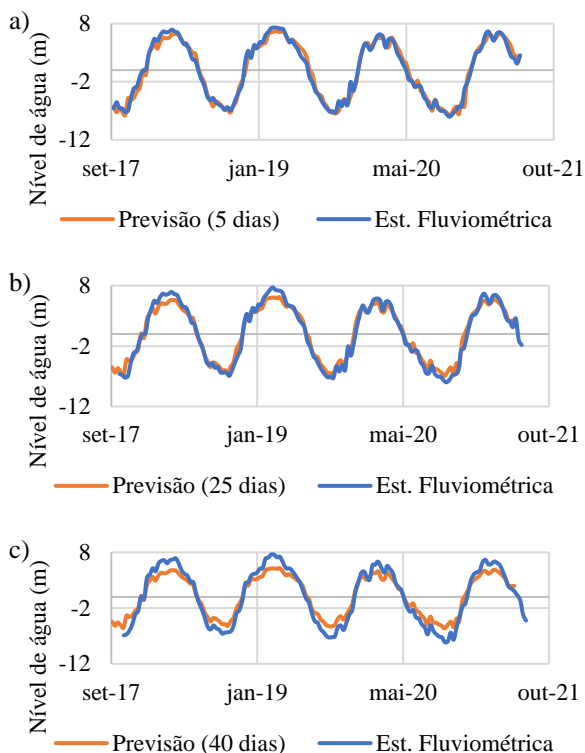


Figura 2. Série temporal de anomalias de nível de água da estação fluviométrica (15400000) (azul) e prevista pela EV 2542, no rio Madeira (laranja) para (a) prazo de 5 dias; b) 25 dias e; c) 40 dias.

Na Figura 3 são apresentadas anomalias de níveis de água previstas pelo ajuste com 2 variáveis (EV 2686 e EV 2753). Os níveis previstos com antecedência de 5 dias apresentaram menor deslocamento em relação aos dados

medidos, e caracterizaram a descida e ascensão da vazão.

A correlação foi alta ($Corr > 0,90$) para previsão de até 17 dias. Entretanto, para antecedências de 25 e 40 dias a representação dos máximos e mínimos ocorreu de forma irregular. Os valores de NSE e RMSE foram inversamente correlacionados, de modo que para 5 dias de antecedência obteve-se NSE igual a 0,95 e erro de 1,5 m e para 40 dias esses valores foram de 0,76 e 3.17 m, respectivamente.

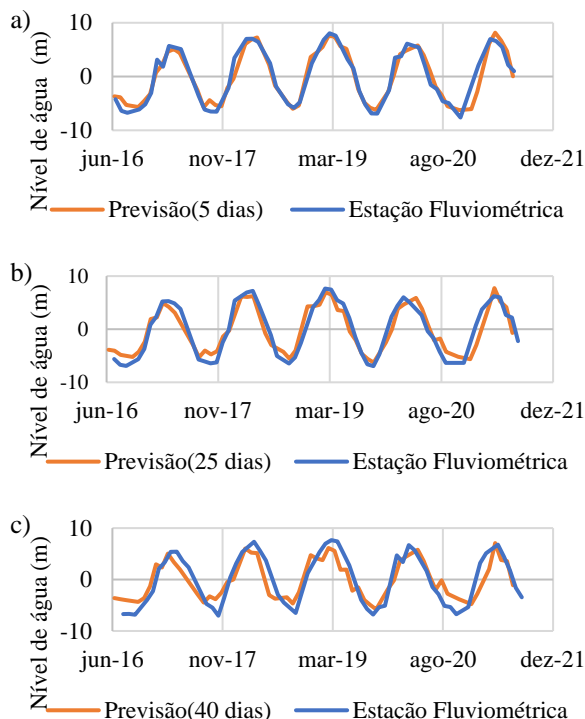
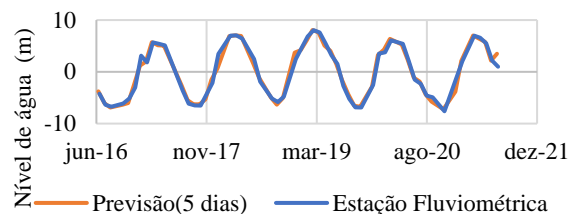


Figura 3. Série temporal de anomalias de nível de água da estação fluviométrica (15400000) (azul) e previstas pelo ajuste com 2 variáveis (laranja), para (a) prazo de 5 dias; b) 25 dias e; c) 40 dias.

Na Figura 4 são apresentadas anomalias de níveis de água previstos pelo ajuste com 3 variáveis (EV 2686, EV 2753 e estação fluviométrica equivalente aos dias da EV 2686). A adição da terceira variável gerou melhor correlação que os demais modelos, principalmente para o *lead time* de 5 dias, e antecipação da ocorrência dos níveis de água para as previsões com 25 e 40 dias.

Os valores de RMSE foram os menores obtidos ~0,5 m, 1,9 m e 2,5 m para 5, 25 e 40 dias, respectivamente. E o NSE $\geq 0,9$ teve a maior persistência (19 dias) em comparação com os outros modelos.



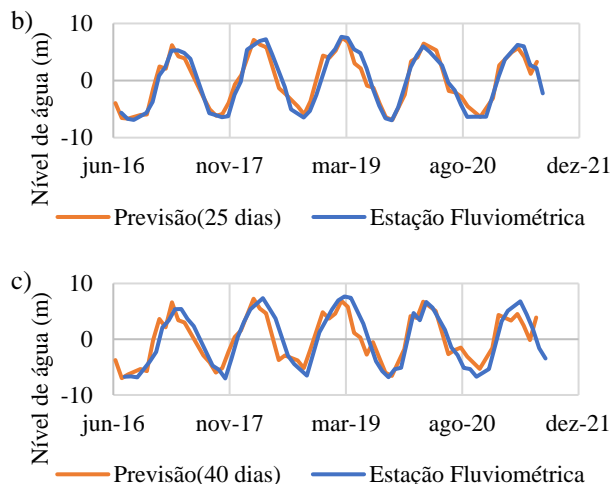


Figura 4. Série temporal de anomalias de nível de água da estação fluviométrica (15400000) (azul) e previstas pelo ajuste com 3 variáveis predictoras (laranja), para (a) prazo de 5 dias; b) 25 dias e; c) 40 dias.

Na Figura 5 são apresentados os resultados de NSE e RMSE, para os ajustes de regressão simples e regressão múltipla.

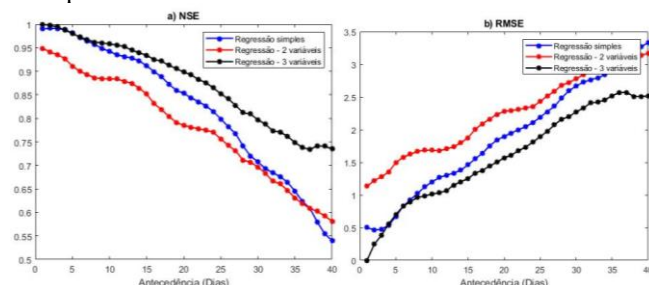


Figura 5. Métricas estatísticas a) NSE e b) RMSE, para os ajustes de regressão simples para dados do Jason 3 e regressão múltipla para dados do Sentinel 3A com 2 e 3 variáveis predictoras.

Os valores de NSE reduziram com o aumento das antecedências. Os níveis de água do satélite Jason 3, com regressão simples, apresentaram maior acurácia que os previstos pela regressão múltipla com duas variáveis, com dados do Sentinel 3A. O desempenho do modelo de regressão com 3 variáveis foi superior aos demais.

Os valores de RMSE aumentaram ao longo das antecedências. Os maiores erros foram registrados pela regressão com 2 variáveis. E o RMSE da previsão por regressão simples foi menor para o lead time de 5 e 10 dias, cuja variação foi de 0,6 a 1,2 m. Para o mesmo lead time, o RMSE do modelo de regressão com 3 variáveis variou de 0,5 – 1 m, e partir do lead time de 10 dias houve atenuação na magnitude dos erros.

Os resultados obtidos, para as antecedências de 5- 10 dias, pelos modelos de regressão simples e regressão múltipla com 3 variáveis corroboram com os encontrados por [5] e [6]. Desse modo, entende-se que tais metodologias podem ser

aperfeiçoadas e operacionalizadas, possibilitando a obtenção de resultados mais robustos.

4. CONCLUSÕES

As previsões com o modelo de regressão simples (Jason 3) e a regressão múltipla composta por 3 variáveis (Sentinel 3A e est. fluviométrica) trouxeram resultados melhores para lead times de até 10 dias, com alta correlação e menores erros. Para antecedências inferiores a 5 dias os resultados melhoraram.

Os resultados obtidos pela regressão com 2 variáveis (Sentinel 3A) apresentaram pior desempenho. Comportamento que pode estar relacionado ao maior distanciamento entre as estações, menor ciclo de repetições do satélite (27 dias) e incertezas nos dados de entrada. Apesar disso, a inserção da terceira variável, com níveis de água medidos na estação fluviométrica, resultou os melhores nesse estudo.

5. REFERÊNCIAS

[1] UNISDR, G. (2015). Global assessment report on disaster risk reduction, making development sustainable: The future of disaster risk management. *United Nations, Geneva*.

[2] Li, W., Lin, K., Zhao, T., Lan, T., Chen, X., Du, H., & Chen, H. (2019). Risk assessment and sensitivity analysis of flash floods in ungauged basins using coupled hydrologic and hydrodynamic models. *Journal of Hydrology*, 572, 108-120.

[3] Zhao, G., Liu, R., Yang, M., Tu, T., Ma, M., Hong, Y., & Wang, X. (2022). Large-scale flash flood warning in China using deep learning. *Journal of Hydrology*, 604, 127222.

[4] Silva, K, Silva, J. S. da, Calmant, S., e Paris, A., (2021). Validação dos níveis de água fornecidos pelos satélites Altimétricos Jason 1, 2 e 3 na Bacia Amazônica, *Brazilian Journal of Development*

[5] Biancamaria, S., Hossain, F., Lettenmaier, D. P. (2011). Forecasting transboundary river water elevations from space. *Geophysical Research Letters*, 38(11).

[6] Hossain, F., A.H. Siddique-E-Akbor, L.C. Mazumder, S.M. Shahnewaz, S. Biancamaria, H. Lee, C.K., (2014). Shum Proof of concept of an altimeter-based river forecasting system for transboundary flow inside Bangladesh *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 7, pp. 587-601.

[7] Molinier, M., Guyot, J. L., De Oliveira, E., & Guimarães, V. (1996). Les regimes hydrologiques de l'Amazone et de ses affluents. *IAHS publication*, 209-222.

[8] Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific data*, 5(1), 1-12.

[9] Yang, J., e Zhang, J. (2019). Validation of Sentinel-3A/3B satellite altimetry wave heights with buoy and Jason-3 data. *Sensors*, 19(13), 2914.