

## ASSIMILAÇÃO DE DADOS DE ALTIMETRIA ESPACIAL PARA AJUSTE DA COTA DE FUNDO DE UM MODELO HIDRÁULICO

*João Paulo Lyra Fialho Brêda<sup>1</sup>, Rodrigo Cauduro Dias de Paiva<sup>2</sup>, Juan Martin Bravo<sup>3</sup> e Otávio Augusto Passaia<sup>4</sup>*

**Resumo** – Modelos hidráulico são ferramentas úteis para o estudo do escoamento superficial que, no entanto, apresentam incertezas. Uma parte dessas incertezas está relacionada a estimativa de parâmetros como cota de fundo. A altimetria espacial é uma técnica de observação de nível da superfície que pode contribuir com a redução dos erros. Esse estudo se propõe a avaliar métodos de assimilação de dados de altimetria para ajustar a cota de fundo de um modelo inercial unidimensional, estudando o caso de um trecho do rio Madeira. São testados os seguintes métodos de assimilação de dados: Inserção Direta, Interpolação Linear, o método de otimização global SCE-UA e uma adaptação do Filtro de Kalman com base em relações hidráulicas. Também foi avaliada a aptidão de missões altimétricas de diferentes resoluções espaciais e temporais, como o ICESAT, ENVISAT e JASON 2. Observou-se que a resolução espacial dos satélites foi um fator determinante no desempenho da assimilação, pois os satélites ENVISAT e ICESAT superaram a performance do JASON 2. O método de assimilação de dado que apresentou os menores erros no nível modelado foi o Filtro de Kalman, seguido pela Interpolação Linear e o SCE-UA, e a Inserção Direta por último.

**Palavras-Chave** – Assimilação de Dados, Altimetria Espacial, Modelo Inercial

## SPATIAL ALTIMETRY DATA ASSIMILATION FOR RIVER BOTTOM LEVEL ADJUSTMENT ON A HYDRAULIC MODEL

**Abstract** – Hydraulic models are useful tools for surface runoff studies; however include uncertainties at some extent. Part of these uncertainties is related to parameters estimative as bottom levels. Spatial altimetry is a technic of surface level observations that can contribute to error reducing. This paper evaluates methods of spatial altimetry data assimilation to adjust the bottom level of a one-dimensional inertial model, studying the Madeira River case. The data assimilation methods tested are direct insertion, linear interpolation, the global optimization method SCE-UA and an adapted Kalman Filter based on hydraulic relations. It was also evaluated different spatial-temporal resolution altimetry missions capabilities such as ICESAT, ENVISAT and JASON 2. It was observed that the satellites spatial resolution played an important role on the data performance, since ENVISAT and ICESAT data assimilation performed better than JASON 2. The data assimilation method that presented the lower errors was the Kalman Filter, followed by the SCE-UA and Linear Interpolation, and Direct Insertion at last.

**Keywords** – Data Assimilation, Spatial Altimetry, Inertial Model.

## 1. INTRODUÇÃO

A modelagem hidráulica é uma ferramenta que representa a dinâmica do fluxo d'água, contribuindo para o seu entendimento. Esse tipo de artifício é utilizado em estudos que procuram estimar vazão, níveis e áreas inundadas ao longo de um canal.

Modelos hidráulicos matemáticos procuram representar a física que age no sistema obedecendo as equações de conservação de massa e quantidade de movimento (equações de Navier-Stokes). Dependendo da aplicação do modelo, essas equações podem ser simplificadas diminuindo a complexidade e o grau de detalhamento do sistema. Um rio/canal normalmente assume uma direção preferencial e dessa forma o sistema de equações é normalmente simplificado para uma dimensão (equações de Saint-Venant). Outras simplificações como a exclusão dos termos de inércia (modelo de onda difusiva) ou inércia e pressão (modelo de onda cinemática) da equação da quantidade de movimento podem ser aplicadas em situações em que os termos suprimidos têm pouco impacto no escoamento (Moussa e Bocquillon, 1996).

No entanto os modelos hidráulicos não são perfeitos e contêm incertezas. Essas incertezas estão relacionadas a diversos fatores como: limitações no conhecimento físico do sistema, simplificações matemáticas, formulações numéricas, erros nos dados de entrada e nas estimativas de parâmetros do modelo. A estimativa “*in situ*” de parâmetros para modelagem hidráulica em grandes bacias é dificultada devido ao seu tamanho e acesso.

O sensoriamento remoto tem sido uma alternativa capaz de estimar os níveis do terreno, (SRTM - Farr et al., 2007), a rede de drenagem e os limites da bacia (Siqueira et al., 2016), a largura do rio (Pavelsky e Smith, 2008), etc., e assim reduzir uma parte dos erros do modelo. No entanto, as técnicas para definir a cota do fundo de um rio ainda não estão consolidadas, sendo que esse parâmetro causa impactos significativos na modelagem do deslocamento da onda de cheia, dos níveis e da extensão das áreas inundáveis (Paiva et al., 2013). Além disso, existem outras técnicas de sensoriamento remoto que são capazes de fornecer observações do sistema, como extensão de áreas inundadas por SAR (Hess et al., 2003) e níveis da superfície por altimetria espacial (Maillard et al., 2015).

Dessa forma a assimilação de dados aparece como uma opção para tentar ajustar as estimativas dos parâmetros a partir de observações. As técnicas de assimilação de dados procuram combinar de maneira ótima as informações do modelo com observações do sistema considerando os erros envolvidos. Trabalhos anteriores já mostraram a capacidade de se assimilar dados de altimetria espacial para corrigir o fundo do rio de um modelo hidrodinâmico unidimensional usando dados sintéticos do futuro satélite SWOT (Durand et al., 2008; Yoon et al., 2012).

Esse trabalho propõe testar métodos para assimilar dados de altimetria espacial em um modelo inercial unidimensional de um trecho do rio Madeira. São testados 4 métodos de assimilação: Inserção Direta, Interpolação Linear, otimização global pelo algoritmo SCE-UA e uma adaptação do Filtro de Kalman considerando relações hidráulicas para cálculo da variância e covariância. Os dados de altimetria espacial são oriundos das missões espaciais ENVISAT, ICESAT e JASON 2, com diferentes coberturas espaço-temporais. Os resultados são validados com base em séries de níveis de 7 estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA).

## 2. MÉTODOS DE ASSIMILAÇÃO DE DADOS

### 2.1. Inserção Direta (Inser\_D)

Assumindo que uma variação na cota de fundo do rio causa uma mesma variação do nível superficial de água, esse método adiciona à cota de fundo a diferença média entre os níveis observados por altimetria e os níveis modelados. Como a maior parte das seções não tem observações, esses não são corrigidos. Esse método é o mais simples de ser avaliado e corrige os erros apenas localmente, sem procurar corrigir os trechos não observados.

### 2.2. Interpolação Linear (Interp)

Esse método é similar ao método de Inserção Direta, com uma diferença de que se assume que os erros variam linearmente entre os trechos observados. A Interpolação Linear adiciona diretamente a média da diferença entre os níveis observados e modelados e interpola linearmente as variações no fundo das seções sem observação. Nos trechos extremos (jusante e montante), as variações na cota de fundo são extrapoladas.

### 2.3. SCE-UA

O algoritmo de otimização global SCE-UA (Shuffle Complex Evolution – University of Arizona – Duan et al., 1992) combina os conceitos de busca aleatória, baralhamento de complexos e evolução competitiva. Esse método procura minimizar uma função objetivo (FO), que basicamente mede a diferença entre os dados de observação (altimetria) e as saídas do modelo (níveis simulados). Através de um esquema de evolução competitiva, baseada no algoritmo Simplex (Nelder e Mead, 1965), os conjuntos de parâmetros menos adaptados (que geram o maior valor da FO) são descartados e os mais adaptados permanecem até que os conjuntos converjam. Os parâmetros utilizados para a execução do algoritmo estão descritos em Brêda (2017).

### 2.4. Filtro de Kalman adaptado (FK)

O Filtro de Kalman é uma técnica sequencial de assimilação de dados originada de uma otimização de mínimos quadrados. Esse método consiste em atualizar as variáveis de estado e os erros associados a cada novo conjunto de observações. O método utilizado é uma adaptação do Filtro de Kalman derivado da abordagem BLUE (*Best Linear Unbiased Estimation*) para atualização de parâmetros. Basicamente a técnica envolve uma minimização da variância da cota de fundo ( $\sigma_Z^2$ ) assumindo que os erros são enviesados e os erros do modelo e da observação não são correlacionados, resultando nas equações a seguir:

$$\text{Atualização da Cota de Fundo} \quad Z_i^a = Z_i^f + K_i(Y_o - Y_N) \quad (1)$$

$$\text{Ganho de Kalman} \quad K_i = \sigma_{Z_i|Y_N} / (\sigma_{Y_N}^2 + \sigma_o^2) \quad (2)$$

$$\text{Atualização dos Erros} \quad \sigma_{Z_i^a}^2 = \sigma_{Z_i^f}^2 - K_i \sigma_{Z_i|Y_N} \quad (3)$$

Em que  $Z$  e  $Y$  são a cota de fundo e o nível da superfície d'água do modelo respectivamente;  $\sigma_X^2$  representa a variância de  $X$  e  $\sigma_{X|W}$  é a covariância entre  $X$  e  $W$ ; os índices  $a$  e  $f$  são usados para identificar as estimativas *à priori* (*forecast - f*) e *posteriori* (*analysis - a*); o índice  $i$  está relacionado a uma seção qualquer do rio; o índice  $N$  representa o trecho do modelo onde houve observação e o índice  $o$  está relacionada com a própria observação.

Pode ser observado na equação (1) que a atualização da cota de fundo é diretamente proporcional a diferença entre os níveis da superfície d'água observados e simulados ( $Y_o - Y_N$ ). Esse coeficiente de proporcionalidade é denominado de ganho de Kalman ( $K$ ). Os erros dos dados de altimetria ( $\sigma_o^2$ ) são normalmente encontrados na literatura. Já a variância do nível d'água simulado no trecho onde houve observação ( $\sigma_{Y_N}^2$ ) e a covariância entre a cota de fundo de um trecho e o nível d'água simulado onde houve observação ( $\sigma_{Z_i|Y_N}$ ) são estimados por relações hidráulicas que incluem: a derivada entre nível da superfície e cota do fundo; efeito de jusante e correlação espacial entre os trechos (mais detalhes em Brêda, 2017).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Modelo Hidráulico do Rio Madeira

O estudo de caso é em um trecho de 1.100 km do rio Madeira. O trecho começa em Porto Velho-RO (8°45' S, 63°55' O), que já acumula a drenagem de 3/4 da área da bacia, e termina em sua foz no rio Amazonas.

O modelo hidráulico usado nesse experimento é o modelo inercial (Bates et al., 2010) unidimensional com uma seção transversal retangular. O modelo inercial deriva-se das equações de águas rasas, desprezando apenas o termo de inércia convectiva da equação de momento. As equações numéricas estão apresentadas abaixo:

$$Q_i^{t+1} = \frac{Q_i^t - \Delta t g A_i^t \frac{(Y_i^t - Y_{i+1}^t)}{\Delta x}}{1 + \frac{\Delta t g |Q_i^t| n^2}{A_i^t h_i^{t \frac{4}{3}}}} \quad (4) \quad \left| \quad h_{i+1}^{t+1} = h_{i+1}^t - \frac{\Delta t}{\Delta x B_{i+1}} (Q_i^{t+1} - Q_{i+1}^{t+1} - Q a_{i+1}^{t+1}) \quad (5)$$

Em que os índices  $t$  e  $i$  indicam o tempo e o trecho do rio respectivamente (menor valor de  $i$  está mais próximo da foz);  $g$  é a gravidade;  $Q$  é a vazão e  $Q_a$  é a vazão lateral;  $\Delta x$  representa o comprimento do trecho e  $\Delta t$  o passo de tempo;  $B$  é a largura;  $n$  o coeficiente de rugosidade de Manning;  $A$  a área da seção transversal e  $h$  a profundidade no trecho.

Os parâmetros iniciais do modelo foram adquiridos por técnicas de sensoriamento remoto. A rede de drenagem, a área acumulada de drenagem, as minibacias e as direções de fluxo foram processadas de um modelo digital de elevação (MDE) de 500 m de resolução do SRTM usando o IPH-Hydro tools (Siqueira et al, 2016). O comprimento de cada trecho do rio foi definido como 5 km, totalizando 211 trechos. As larguras das seções transversais foram estimadas através de máscaras de água extraídas de imagens LANDSAT 8 na banda do infravermelho próximo usando a média dos períodos seco (outubro) e úmido (abril). Após foi aplicado um filtro de média com 15 componentes para suavizar o ruído da largura. A estimativa inicial da cota de fundo foi estimada subtraindo a profundidade de um banco de dados global (Andreadis et al., 2013) do nível medido no MDE. Foi adotado um coeficiente de rugosidade de Manning igual a 0.030 para todo o rio, o que pertence a uma faixa de valores encontrada na literatura para bacia Amazônica (Paiva et al., 2013).

As condições de contorno são séries de estações fluviométricas da ANA entre 2002 e 2013, que é o período de simulação. A condição de contorno de montante é uma série de vazão (posto 15400000 - Figura 1) e a condição de jusante é uma série de nível (posto 15940000). Já as contribuições laterais foram estimadas a partir da diferença entre os únicos postos do trecho com dados de vazão disponível

para o período (postos 15400000 e 15700000) distribuindo a vazão lateral trecho a trecho proporcionalmente ao seu incremento na área de drenagem.

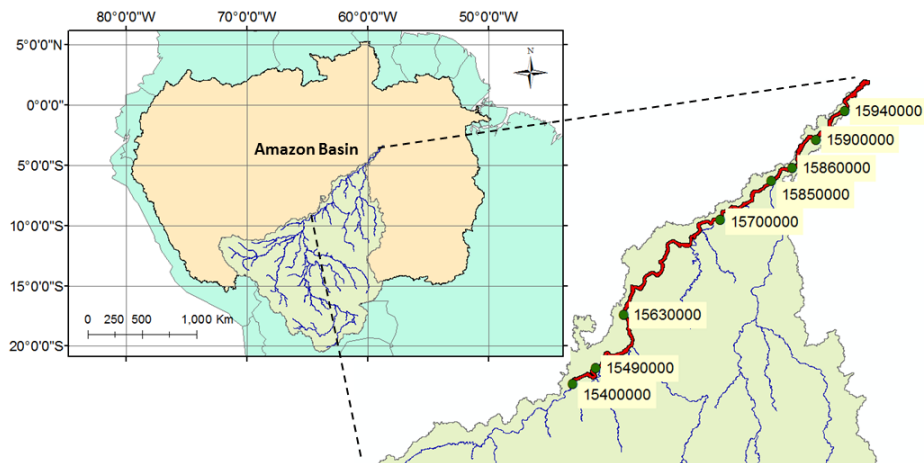


Figura 1– Trecho modelado da bacia do rio Madeira e os postos fluviométricos disponíveis.

### 3.2. Dados de Altimetria Espacial

Os satélites JASON 2 e ENVISAT são satélites de altimetria por radar, portanto possuem dados mais consistentes, entretanto com maiores erros associados em observações em rios devido ao seu *footprint*. O JASON 2 fornece dados em uma baixa distribuição espacial (cruza o rio em apenas 4 pontos - Figura 2), porém em grande frequência (a cada 10 dias) sendo o período de dados entre 2008 e 2013. Diferentemente, o ENVISAT atravessa o rio em 16 locais (Figura 2 – em preto) em uma frequência de 35 dias, ficando na mesma órbita entre 2002 e 2010.

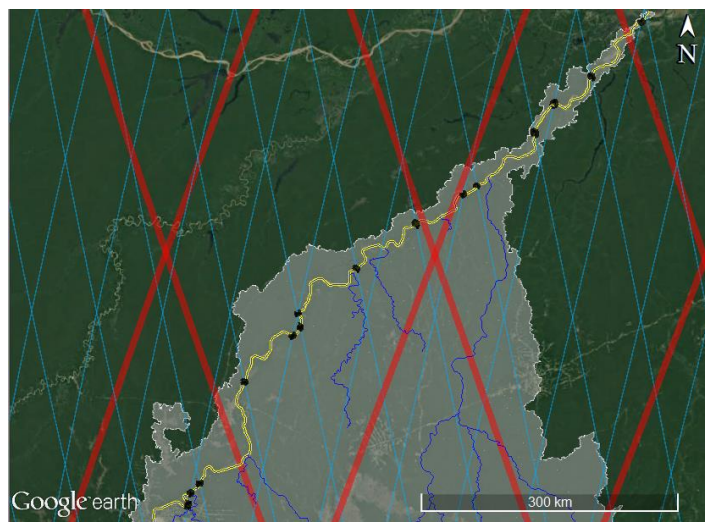


Figura 2 - Trecho do Rio Madeira e traços de passagem dos satélites (vermelho - JASON 2; azul- ENVISAT)

Já o satélite ICESat carrega um altímetro LiDAR e portanto é mais sensível às condições atmosféricas. Além disso o satélite apresentou alguns problemas em seus sensores e também na manutenção de sua órbita. Portanto a distribuição espacial de seus dados é bem ampla e a quantidade de dados, bem menor. Os dados foram obtidos através do aplicativo ICESat Processor (Passaia e Paiva, 2017) para o período de 2003 a 2009.



### 3.3. Avaliação dos Resultados

A avaliação dos resultados é feita por comparação com séries de níveis de 7 estações fluviométricas da ANA, todas demonstradas na Figura 1, exceto o posto 15940000 que já havia sido usado como condição de jusante. Esses postos foram georreferenciados para o geóide EGM08 seguindo o trabalho de Moreira (2017). O índice utilizado para mensurar o desempenho é a raiz do erro médio quadrático (RMSE).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 demonstra os fundos do rio resultantes da assimilação de dados dos diferentes satélites. O fundo resultante do método de Inserção Direta é um bom indicativo dos locais onde houve observação. Por exemplo, percebe-se que o fundo por Inserção Direta dos dados do JASON 2 é praticamente igual ao fundo Inicial, isso porque o JASON 2 passa em apenas quatro locais no rio. Também é possível notar que tanto o método de Inser\_D e Interp praticamente não alteram o fundo nas regiões mais a jusante, estão praticamente iguais ao fundo Inicial. Isso ocorre porque o nível dessa região é controlado pela condição de jusante e assim não existem muita diferença entre as medições do satélite e o nível modelado.

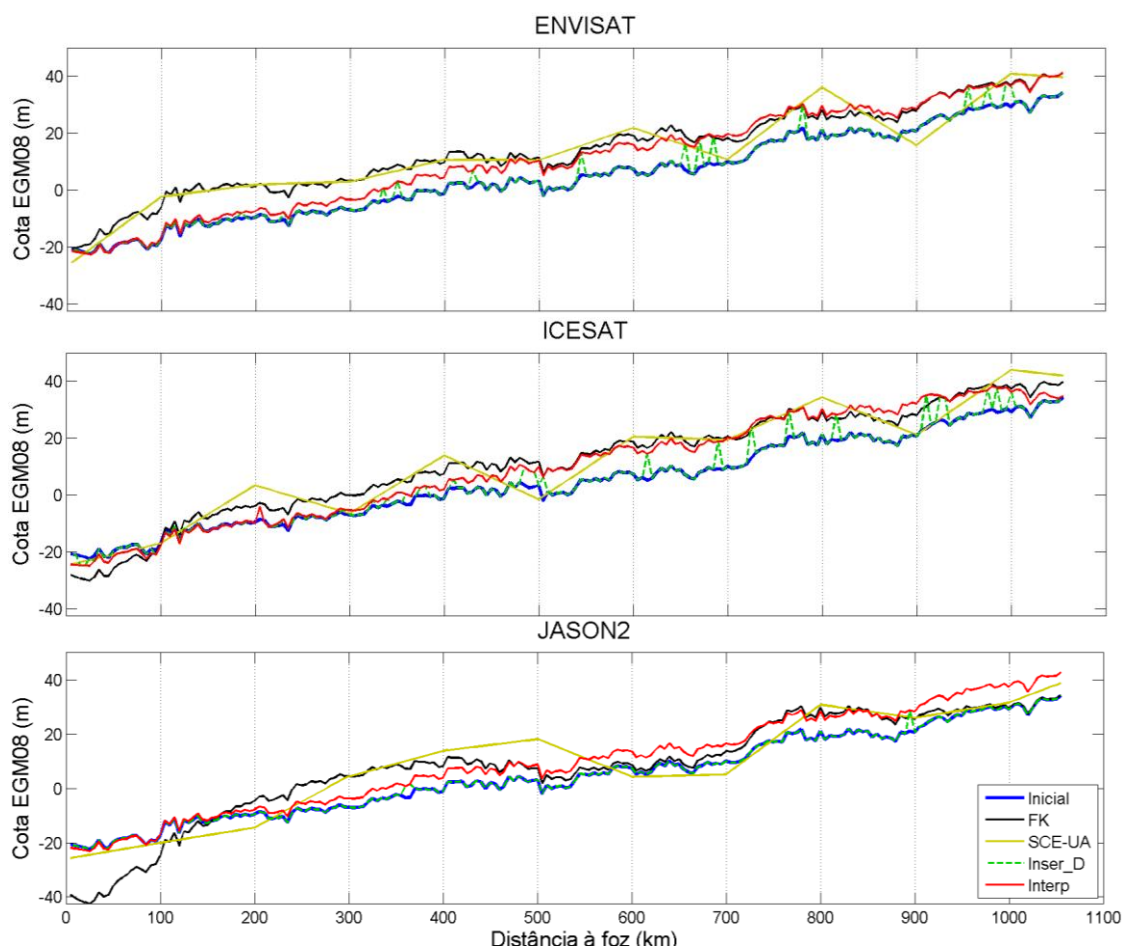


Figura 3 - Fundos do rio resultantes da assimilação de dados

A Figura 4 é um gráfico com a média do desempenho dos métodos de assimilação dos dados dos diferentes satélites comparando o nível simulado após o ajuste dos fundos com as séries de níveis das 7 estações fluviométricas. O desempenho da Inser\_D/JASON 2 é praticamente equivalente à simulação com o fundo inicial, como era de se esperar. Pode-se notar também que a melhor performance quanto aos dados do JASON 2 foi da Interpolação, isso porque a distribuição espacial dos dados do JASON 2 é muito pobre e os métodos de otimização global SCE-UA (devido ao *overfitting*) e o Filtro de Kalman (mantendo os erros altos) não conseguiram convergir a um fundo que gerasse um bom resultado. Por outro lado, quando se assimilava dados dos satélites ICESAT e ENVISAT o desempenho do FK foi superior aos demais, seguido do SCE-UA e Interp, e por último a Inserção Direta.

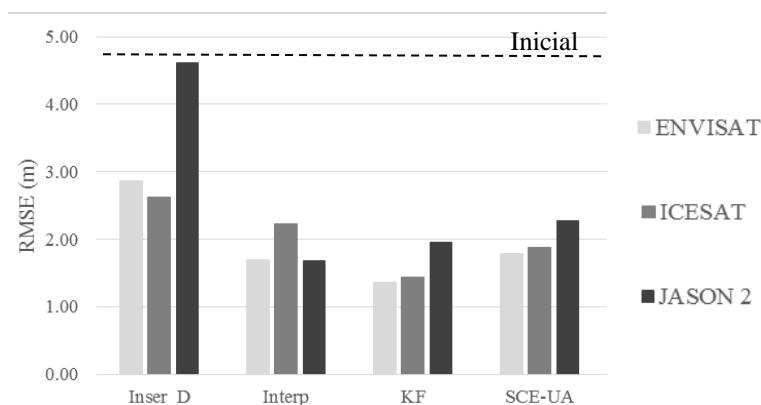


Figura 4 - Desempenho dos métodos de Assimilação de Dados

Já em relação aos dados dos satélites, pode se observar que a assimilação de dados do JASON 2 foi a que produziu os piores resultados, provavelmente devido a sua má distribuição espacial. Os dados do ENVISAT aparecem como o mais indicado para correção do fundo. Embora tenha uma menor distribuição espacial que o ICESAT, o ENVISAT apresentou uma série mais longa e contínua e com maior quantidade de dados, o que possivelmente contribuiu com o seu desempenho.

## 5. CONCLUSÕES

De maneira geral, todos os métodos de assimilação de dados conseguiram ajustar o fundo melhorando as estimativas iniciais de níveis. O melhor desempenho verificado foi pela assimilação por Filtro de Kalman, com redução de até 70 % no erro. Já o desempenho dos dados esteve fortemente relacionado à distribuição espacial dos mesmos, tendo o ENVISAT apresentado a melhor performance e o JASON 2 a pior. Dessa forma averiguamos que os métodos tem potencial para ser aplicado futuramente em redes de drenagem completas de bacias. Mais resultados em Brêda, 2017.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREADIS, K. M.; SCHUMANN, G. J.-P.; PAVELSKY, T. A simple global river bankfull width and depth database. *Water Resources Research*, v. 49, p. 7164-7168, 2013.
- BRÊDA, J. P. L. F. Assimilação de Altimetria Espacial para Estimativa de Batimetria e Rugosidade Efetivas para Modelagem Hidrodinâmica. 2017. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental / UFRGS. Porto Alegre, 2017.

- 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.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. *Water Resources Research*, 28, n. 4, 1992. 1015-1031.
- DURAND, M.; ANDREADIS, K. M.; ALSDORF, D. E.; LETTENMAIER, D. P.; MOLLER, D.; WILSON, M. Estimation of bathymetric depth and slope from data assimilation of swath altimetry into a hydrodynamic model. *Geophysical Research Letters*, v. 35, p. L20401, 2008.
- FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, v. 45, 2007.
- HESS, L. L.; MELACK, J. M.; NOVO, E. M. L. M.; BARBOSA, C. C. F.; GASTIL, M. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon Basin, *Remote Sensing of Environment*, v. 87, p. 404-428. 2003
- MAILLARD, P.; BERCHER, N.; CALMANT, S. New processing approaches on the retrieval of water levels in Envisat and SARAL radar altimetry over rivers: A case study of the São Francisco River, Brazil. *Remote Sensing of Environment*, v. 156, p. 226-241, 2015.
- MOREIRA, D. M. Geodésia Aplicada ao Monitoramento Hidrológico da Bacia Amazônica. Rio de Janeiro: Doutorado COPPE/UFRJ, 2016.
- MOUSSA, R.; BOCQUILLON, C. Criteria for the choice of flood routing methods in natural channels. *Journal of Hydrology*, v. 186, p. 1-30. 1996.
- NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, 7, n. 4, 1965. 308-313.
- PAIVA, R. C.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M.-P.; FRAPPART, F.; CALMANT, S.; MENDES, C. A. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. *Water Resources Research*, v. 49, p. 1-18, 2013.
- PASSAIA, O. A.; PAIVA, R. C. D. Processamento de dados do ICESat para aplicações hidrológicas. *Anais In: XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR*. Santos, 2017.
- PAVELSKY, T. M.; SMITH, L. C. RivWidth: A software toll for the calculation of river widths from remotely sensed imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, v. 5, n. 1, Janeiro 2008.
- SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A.S.; JARDIM, P.F.; FAN, F.M.; COLLISCHONN, W. IPH-Hydro Tools: uma ferramenta open source para determinação de informações topológicas em bacias hidrográficas integrada a um ambiente SIG. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 1, p. 274-287, 2016.
- YOON, Y.; DURAND, M.; MERRY, C. J.; CLARK, E. A.; ANDREADIS, K. M.; ALSDORF, D. E. Estimating river bathymetry from data assimilation of synthetic SWOT measurements. *Journal of Hydrology*, v. 464-465, p. 363-375, 2012.