

## ESTIMATIVA DA BATIMETRIA DO RESERVATÓRIO DE SOBRADINHO POR IMAGENS ORBITAIS

Alice César Fassoni-Andrade<sup>1</sup>, Otávio Augusto Passaia<sup>1</sup>,  
Vitor Souza Martins<sup>2</sup> e Rodrigo Cauduro Dias de Paiva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Caixa Postal 15029 – 91501-970 – Porto Alegre – RS, Brasil

<sup>2</sup>Iowa State University – ISU. Caixa Postal 50011 – Ames – Iowa, United States

alice.fassoni, otapassaia, vitors@iastate.edu, rodrigocdpaiva@gmail.com

### RESUMO

A matriz energética brasileira é dependente de usinas hidrelétricas e, apesar da importância desses reservatórios, poucos dados de monitoramento, como a batimetria e a curva cota-volume, estão disponíveis. Neste estudo, a batimetria do reservatório de Sobradinho (Bahia) é estimada utilizando uma base de dados global de frequência de água aberta e nível da água do reservatório. As curvas cota-área-volume também são estimadas pela batimetria. Os resultados indicam que há boa concordância entre a curva cota-volume estimada e observada. O volume total do reservatório estimado foi 4,15% inferior ao volume observado (34730 hm<sup>3</sup> em relação a 36270 hm<sup>3</sup>). A técnica proposta para a estimativa da batimetria é uma alternativa para esse tipo de aplicação (curva cota-volume) e pode ser aplicada em outros lagos e reservatórios.

**Palavras-chave** — curva cota-volume, Landsat, frequência de inundação, nível da água

### ABSTRACT

*Brazilian energy matrix is highly dependent on hydropower generation. However, few monitoring data are available for most dam reservoirs, such as bathymetry and stage-volume curve. In this study, the bathymetry of the Sobradinho reservoir (Bahia) is estimated using a global open water frequency database and reservoir water level. The stage-area-volume curves are then calculated based on the estimated bathymetry. The results indicate a good agreement between the estimated and observed stage-volume curve. The total estimated volume was 4.15% lower than the observed volume (34730 hm<sup>3</sup> out of 36270 hm<sup>3</sup>). Finally, the proposed approach is an alternative to obtain the bathymetry and stage-volume curve, and it can be applied in other lakes and reservoirs.*

**Key words** — Stage-volume curve, Landsat, flood frequency, water level

### 1. INTRODUÇÃO

A água dos corpos hídricos é utilizada para diversos fins, como abastecimento humano, geração de energia, pecuária,

irrigação, navegação, manufatura e resfriamento em termelétricas. Com o objetivo de maximizar os benefícios dos recursos de água doce e mitigar os riscos de inundação, dezenas de milhares de barragens artificiais foram construídas nos principais sistemas fluviais do mundo, com capacidades de armazenamento total superior a 8000 km<sup>3</sup> [1, 2]. No Brasil, a geração de energia elétrica é o principal motivo para a implementação de reservatórios [3], correspondendo a 68% da matriz energética [4].

Apesar de sua importância para as reservas de água doce, o monitoramento sistemático de lagos e reservatórios é limitado [5], e em termos globais, o conhecimento da batimetria é baixo [6]. Além disso, os registros do armazenamento dos reservatórios nem sempre são compartilhados. Informações detalhadas sobre as curvas cota-área-volume de reservatórios, ou sobre suas estruturas de saída também são difíceis de encontrar [7].

A Resolução Conjunta da Agência Nacional de Águas (ANA) e da Agência Nacional De Energia Elétrica (ANEEL) 003-2010 exige que as usinas pertencentes ao Sistema Interligado Nacional (SIN) atualizem suas curvas cota-área-volume (batimetria) a cada 10 anos [8]. Entretanto, levantamentos batimétricos em reservatórios são caros. Batimetrias recentes em reservatórios da região semiárida, contratadas pela ANA, tiveram custo entre R\$ 1200 e R\$ 4.400 por hectômetro cúbico (hm<sup>3</sup>) [9].

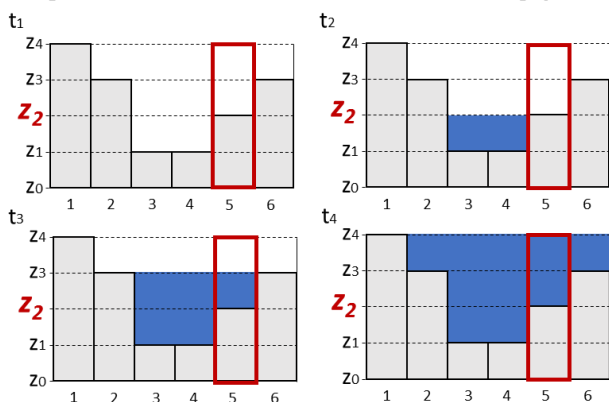
Nesse sentido, os dados de sensoriamento remoto são uma alternativa para monitorar os volumes de água em reservatórios, como feito por trabalhos anteriores [6, 10, 11, 12, 13, 14]. Esses trabalhos utilizaram, de forma geral, dados de altimetria e área do espelho d'água para estimar a curva hipsométrica ( $dh/da$ ). No entanto, a classificação da extensão da área tem uma demanda e incerteza associada. Para superar essa limitação, [6] utilizaram o mapeamento da superfície da água de uma base de dados validada (*JRC Global Surface Water*). Os autores também consideraram uma relação linear entre  $dh/da$ . Por outro lado, [9] estimaram a curva cota-volume de reservatórios considerando uma relação potencial entre a área e a cota, e extrapolaram a curva para estimar o volume absoluto.

Neste trabalho, um método inovador foi proposto para estimar a batimetria do reservatório de Sobradinho utilizando imagens de sensoriamento remoto e gerar curvas cota-área-volume. O método utiliza a base de dados consolidada do *JRC Global Surface Water* e o nível da água do reservatório.

## 2. MÉTODO PROPOSTO

O método para estimativa da batimetria do reservatório tem como base o nível da água e a frequência de água aberta no reservatório. Isto é, observa-se que a curva da frequência acumulada do nível da água em ordem decrescente (curva de permanência) e a curva da frequência de inundação versus a cota de fundo do reservatório são idênticas. Por exemplo, um local com cota de fundo  $z$  tem uma frequência de inundação  $f$  em um certo período, da mesma forma que a frequência que o nível da água excede  $z$ , é  $f$  (exemplificado na Figura 1). Assim, a partir de um mapa de frequência de inundação e a série temporal do nível da água, ambos os dados para o mesmo período, a cota de fundo pode ser estimada em regiões onde a frequência de inundação é inferior a 100%. Portanto, o método não consegue recuperar a batimetria abaixo da menor área observada no período considerado.

Freq. de inundação de um local com cota de fundo  $z_2$ :  $f = 50\%$



Frequência que o nível da água excede  $z_2$ :  $f = 50\%$

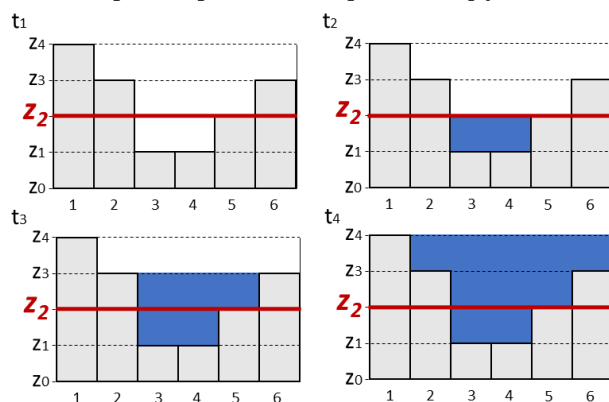


Figura 1. Exemplo do método proposto para estimativa da batimetria.

## 3. ÁREA DE ESTUDO E BASE DE DADOS

O método proposto foi aplicado no reservatório de Sobradinho, localizado no norte da Bahia (Figura 2). Esse foi

construído em 1982 e pertence à bacia hidrográfica do rio São Francisco. É o maior lago artificial do Nordeste brasileiro, com um espelho d'água de 4.214 km<sup>2</sup>. Por esse motivo esse reservatório foi escolhido para a aplicação do método, facilitando a delimitação de área de água. Além disso, esse reservatório apresenta variação na área de inundação, facilitando sua aplicação. A área de aplicação foi delimitada a partir de uma máscara de água do reservatório disponibilizada pela ANA.

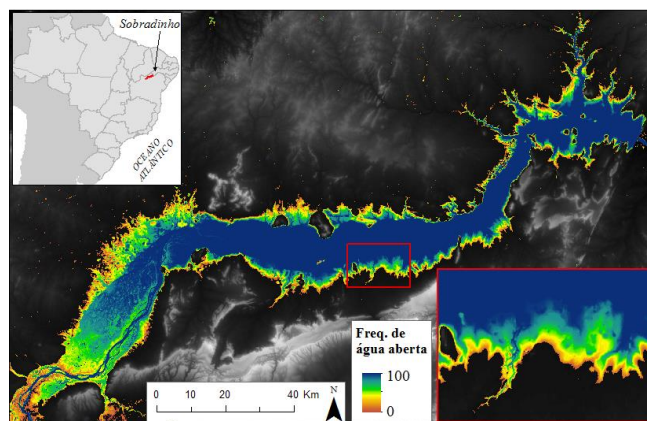


Figura 2. Reservatório de Sobradinho (BA). Frequência de água aberta entre 1991 e 2015 (%).

Os dados utilizados para estimar a batimetria foram o nível da água no reservatório e a frequência de água aberta, ambos para o período de 1991 a 2015. O nível é proveniente do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR), ANA (disponível em <<http://sar.ana.gov.br/MedicaoSin>>), enquanto que o mapa de frequência de água aberta foi elaborada no *Google Earth Engine* utilizando a base de dado global *JRC Monthly Water History, v1.0* [15]. Essa base de dado corresponde a imagens mensais, classificadas em água/não-água/sem-dado e foram elaboradas a partir de três milhões de imagens da série Landsat com resolução espacial de 30m e 32 anos de dados [15] (Disponível em <<https://global-surface-water.appspot.com/>>).

Em cada pixel da área de aplicação, foi calculada a curva de permanência do nível da água e relacionada com a frequência de inundação para estimar a cota de fundo. Vale ressaltar que não foi feita nenhuma correção para preenchimento de dados faltantes nos dados do nível, como entre os anos de 1993 a 1998, e nos pixels com cobertura de nuvem (descartados da análise). Dessa forma, o método não considera, necessariamente, dados de nível da mesma data da imagem como usualmente consideram os métodos para estabelecer a curva cota-área do reservatório.

Uma vez que a batimetria do reservatório não está disponível para validação do método, essa foi avaliada comparando a curva cota-volume do reservatório estimada a partir da batimetria e a curva cota-volume disponibilizada pelo ONS (disponível em <<http://ons.org.br/>>). No entanto, a curva estimada não possui informação no tramo inferior pois a batimetria não é recuperada abaixo do menor nível da água

observado no período. Assim, para extrapolar a curva e estimar o volume absoluto, utilizou-se o método descrito em [9]. Nesse sentido, foi ajustando uma regressão potêncial na curva cota-área da forma:  $\text{Área} = a(\text{cota} - H_0)^b$ , onde  $a$ ,  $b$  e  $H_0$  são parâmetros estimados. Posteriormente, a curva cota-volume é calculada a partir da integração da curva cota-área estabelecida pela batimetria e considerando  $H_0$  igual ao nível em que a área e o volume são iguais a zero.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A batimetria estimada é apresentada na Figura 3. Observa-se que a batimetria não foi estimada na área em que a cota é mínima (380 m). A Figura 4 mostra a curva cota-área calculada a partir da batimetria (pontos pretos) e a função ajustada (linha vermelha). Dessa forma, a função ajustada -  $\text{Área} = 18,68 (\text{cota} - 371,94)^{1,074}$  - indica que a cota para o volume nulo é igual a 371,94 m.

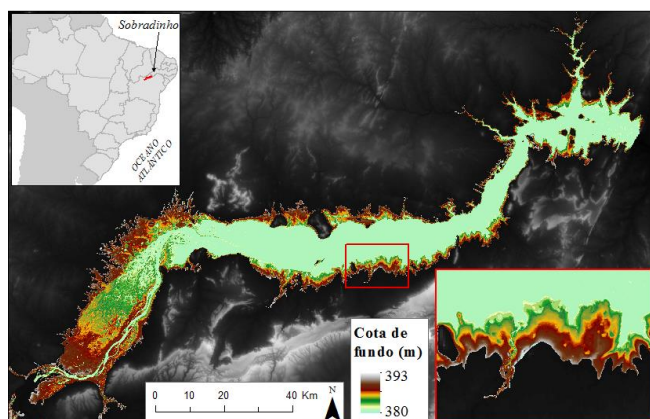


Figura 3. Batimetria estimada para o reservatório de Sobradinho (BA).

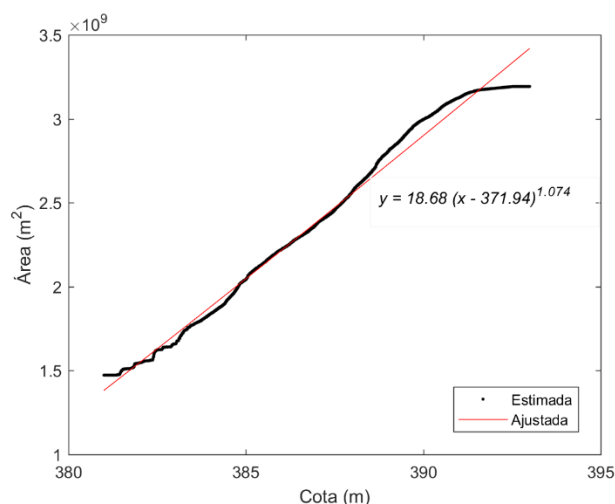


Figura 4. Curva cota-área estimada a partir da batimetria (preto) e ajustada (vermelho).

A curva cota-volume resultante da integração (preta) e a curva observada (ONS, azul) são apresentadas na Figura 5. Para a comparação das curvas, considerou-se o volume correspondente a menor e a maior cota observada no período (1991-2015), i.e. as cotas 381 e 393 m, respectivamente.

O volume total do reservatório estimado por sensoriamento remoto (correspondente à cota 393m) foi 4,15% inferior ao volume observado (34730 hm³ em relação a 36270 hm³). Essa ligeira subestimativa foi observada a partir da cota 391m e pode estar relacionada a subestimativa na classificação da área de água aberta das imagens uma vez que pixels com cobertura de nuvem não são considerados no cálculo da área. Para cotas mais baixas, o volume foi ligeiramente superestimado, com erro relativo de no máximo 6,8% (cota 385m).

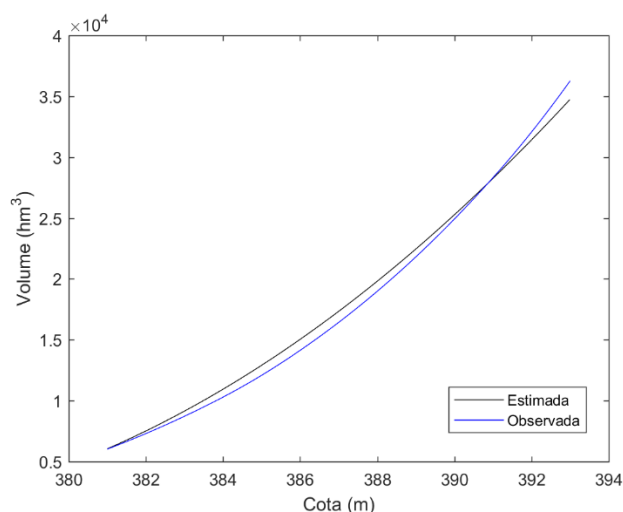


Figura 5. Curva cota-volume estimada (preto) e observada (azul) para o reservatório de Sobradinho (BA).

#### 5. CONCLUSÕES

Esse trabalho apresentou uma nova abordagem para estimar a batimetria do reservatório de Sobradinho com aplicação para estimar a curva cota-volume. A metodologia utilizou uma base de dados de imagens e nível da água, podendo ser aplicada para outros reservatórios e lagos.

Apesar da batimetria não ser validada com dados *in situ*, a curva cota-volume estimada sugere boa concordância com a curva observada e resultados satisfatórios. A vantagem em relação aos métodos utilizados em trabalhos anteriores é que a nova abordagem não necessita de dados de nível e área do mesmo dia para estabelecer a curva cota-área. No entanto, a batimetria não ser recuperada abaixo da menor superfície da água observada e um método para estimar o volume absoluto é necessário.

A sugestão para trabalhos futuros é a avaliação do método com um mapeamento mais rigoroso das áreas de água-aberta e utilização de dados sem falhas.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] Nilsson, C. et al, "Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems", *Science*, v. 308, n. 5720, p. 405-408, 2005.
- [2] Lehner, B. et al, "High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management", *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 9, n. 9, p. 494-502, 2011.
- [3] Bravo, J. M. et al, "Incorporating forecasts of rainfall in two hydrologic models used for medium-range streamflow forecasting", *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 14, n. 5, p. 435-445, 2009.
- [4] Empresa de Pesquisa Energética, "Balanço energético nacional 2017: ano base 2016", Rio de Janeiro: EPE, 2017.
- [5] Gao, H, "Satellite remote sensing of large lakes and reservoirs: From elevation and area to storage", *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, v. 2, n. 2, p. 147-157, 2015.
- [6] Busker, T. et al, "A global lake and reservoir volume analysis using a surface water dataset and satellite altimetry", *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018.
- [7] Collischonn, B. et al, "Modelagem hidrológica de uma bacia com uso intensivo de água: Caso do Rio Quaraí-RS" *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, n. 4, p. 119-134, 2011.
- [8] ANA/ANEEL, "Resolução Conjunta nº 3, de 10 de agosto de 2010".
- [9] Collischonn, B.; Clarke, R. T, "Estimation and uncertainty of remote-sensing-based Depth-Area-Volume (DAV) relationships" *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 4, p. 719-727, 2016.
- [10] Avisse, N. et al, "Monitoring small reservoirs' storage with satellite remote sensing in inaccessible areas", *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 21, n. 12, p. 6445, 2017.
- [11] Crétaux, J.-F. et al, "Lake volume monitoring from space", *Surveys in Geophysics*, v. 37, n. 2, p. 269-305, 2016.
- [12] Duan, Z.; Bastiaanssen, W. G. M, "Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data", *Remote Sensing of Environment*, v. 134, p. 403-416, 2013.
- [13] Smith, L. C.; Pavelsky, T. M, "Remote sensing of volumetric storage changes in lakes", *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 34, n. 10, p. 1353-1358, 2009.
- [14] Gao, H.; Birkett, C.; Lettenmaier, D. P., "Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing", *Water Resources Research*, v. 48, n. 9, 2012.
- [15] Pekel, J. et al, "High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes", *Nature*, [s. l.], v. 540, n. 7633, p. 418-422, 2016.