

AVALIAÇÃO DA EVAPORAÇÃO DE ÁGUA EM RESERVATÓRIOS BRASILEIROS ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Júlia Brusso Rossi¹, Anderson Ruhoff², Ayan Santos Fleischmann³

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, e-mail: juliabrusso@gmail.com; ²Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, e-mail: andersonruhoff@gmail.com; ³Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, Tefé/AM, e-mail: ayan.fleischmann@gmail.com

RESUMO

Estimativas de evaporação são fundamentais para avaliar as perdas de água em reservatórios. Para estimar a evaporação, métodos que utilizam sensoriamento remoto são uma boa solução para abranger grandes áreas em curtos intervalos de tempo. O presente estudo tem por objetivo estimar a evaporação de águas abertas em reservatórios brasileiros utilizando modelos de balanço de energia e dados de sensoriamento remoto. Os resultados indicaram que os modelos representaram de forma satisfatória a evaporação nos reservatórios avaliados. O reservatório da UHE Sobradinho foi o que registrou maiores volumes evaporados, entre os reservatórios analisados.

Palavras-chave — evaporação, reservatórios, sensoriamento remoto, balanço de energia.

ABSTRACT

Evaporation estimates are essential to assess water losses in reservoirs. Methods that use remote sensing to estimate evaporation are a good solution to cover large areas in short time intervals. The present study aims to estimate open water evaporation in Brazilian reservoirs using energy balance models and remote sensing data. The results indicated that the models satisfactorily represented the evaporation in the evaluated reservoirs. The UHE Sobradinho reservoir registered the highest evaporated volumes among the analyzed reservoirs.

Key words — evaporation, reservoirs, remote sensing, energy balance.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil conta com cerca de 1380 hidrelétricas em operação, totalizando uma potência fiscalizada de mais de 180 GW [1]. As hidrelétricas se destacam pela grande participação na matriz energética nacional, que, em 2020, correspondeu a mais de 65% [2]. Além de sua importância no fornecimento de energia hidrelétrica, os reservatórios desempenham um papel fundamental no controle dos recursos hídricos, para garantia de abastecimento de água e controle de cheias [3].

A evaporação é um componente-chave do balanço hídrico de reservatórios, e é o principal processo natural de perda de água armazenada nestes sistemas [4]–[6]. Desse modo, estimativas precisas de evaporação são necessárias para quantificar as perdas evaporativas, garantindo a manutenção do abastecimento de água em reservatórios. Considerando a ausência de medições de evaporação *in situ* em reservatórios brasileiros, uma questão pode ser levantada: como estimar a evaporação real de reservatórios em escala nacional?

Neste sentido, a utilização de dados de sensoriamento remoto para monitorar os fluxos evaporativos é uma alternativa econômica que permite cobrir grandes áreas em curtos intervalos de tempo [7]. Com dados de sensoriamento remoto, a evaporação pode ser estimada a partir de métodos baseados na temperatura da superfície da terra (balanço de energia) [8]. O objetivo geral deste estudo foi avaliar as estimativas de evaporação em reservatórios brasileiros obtidas por modelos de balanço de energia utilizando dados de sensoriamento remoto.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A evaporação dos reservatórios foi estimada por dois métodos baseados no balanço de energia, o *Google Earth Engine implementation of the Surface Energy Balance Algorithm for Land model* (geeSEBAL) [9] e o *Simplified Surface Energy Balance* (SSEBop) [10], [11], que estimam a evaporação e evapotranspiração (ET – evaporação do solo e águas abertas e transpiração das plantas). O geeSEBAL [9] é um modelo baseado no SEBAL [12], desenvolvido dentro do Google Earth Engine (GEE). Este modelo estima a evapotranspiração pela combinação da expressão de balanço de energia de superfície e equações de fluxo de superfície terrestre com dados de temperatura obtidos por sensoriamento remoto. Nesta abordagem, o calor latente (LE) é estimado como um resíduo do balanço de energia de superfície (Equação 1).

$$LE = R_n - H - G \quad (1)$$

Onde H é o calor sensível (Equação 2), R_n é a radiação solar líquida na superfície terrestre (Equação 3), e o G é fluxo de calor do solo (Equação 4). A R_n é dividida em fluxos de H, LE e G, sendo que, os elementos da superfície (plantas, solo, corpos d'água), absorvem e reemitem uma parte dessa

energia solar radiante, como LE, além de perderem vapor d'água para a atmosfera [7].

$$H = \frac{\rho C_p dT}{r_{ah}} \quad (2)$$

$$Rn = (1 - \alpha)Rn \downarrow + Rl \downarrow - Rl \uparrow - (1 - \epsilon_0)Rl \downarrow \quad (3)$$

Sendo ρ é a densidade do ar, C_p é o calor específico do ar, dT é o gradiente de temperatura, r_{ah} é a resistência aerodinâmica, α é o albedo, $Rn \downarrow$ é a radiação de ondas curtas incidente, $Rl \downarrow$ é a radiação de ondas longas incidente, $Rl \uparrow$ é a radiação de ondas longas ascendente, ϵ_0 é a emissividade térmica da superfície. A fração evaporativa (Λ) (Equação 4), por fim, é utilizada para estimar a evapotranspiração diária (ET_{24h}) (Equação 5).

$$\Lambda = \frac{LE}{Rn - G} \quad (4)$$

$$ET_{24h} = \frac{\Lambda Rn_{24h}}{\lambda} \quad (5)$$

Sendo Rn_{24h} a média diária de Rn , e λ o calor latente de vaporização da água. Os dados climáticos de reanálise utilizados no geeSEBAL foram obtidos do ERA5-Land (do Centro Europeu de Previsão Meteorológica de Médio Prazo – ECMWF, sigla em inglês) [13]. Mais detalhes sobre a metodologia e as equações utilizadas no geeSEBAL podem ser consultadas em [9] e [12].

O SSEBop [10], [11], por sua vez, utiliza uma simplificação do balanço de energia para estimar a ET (Equação 6). Este modelo não resolve a totalidade dos componentes do balanço hídrico, utilizando princípios psicrométricos para estimativa da ET [14].

$$ET = ET_0 - \gamma^s (T_s - T_c) ET_0 \quad (6)$$

Onde ET_0 é a ET de referência, γ^s é a constante psicrométrica de superfície (Equação 7), T_s é a temperatura da superfície terrestre T_c é a temperatura da superfície de referência úmida/fria (estimada a partir da temperatura máxima diária do ar).

$$\gamma^s = \frac{\rho C_p}{Rn r_{ah}} \quad (7)$$

Os dados climáticos de reanálise utilizados no SSEBop foram obtidos do WorldClim [15], do *Global Data Assimilation System* (GDAS, da USGS *Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET) Data Portal*), e do *International Water Management Institute (IWMI)*. Os dados do GDAS foram reamostrados para 10 km. A evaporação foi estimada utilizando dados de sensoriamento remoto obtidos do MODIS Terra/Aqua (*United States Geological Survey – USGS/NASA*), disponíveis de 2003 a 2021, para ambos os modelos geeSEBAL e SSEBop.

Os resultados foram comparados aos do produto global MOD28C3 versão 6.1 [16], que fornece dados mensais de taxa de evaporação, obtidos a partir de estimativas utilizando dados de temperatura de superfície do MODIS (Terra/Aqua) e dados meteorológicos do GLDAS. Mais informações sobre

o produto podem ser encontradas em [16]–[18]. O MOD28C3 possui dados disponíveis para 164 reservatórios ao redor do mundo [17], [18], sendo 12 reservatórios no Brasil (entre os 20 maiores do país). O presente estudo avaliou a evaporação nestes 12 reservatórios, que correspondem a uma área de cerca de 14001 km², ou seja, aproximadamente 31% do total de área ocupada por massas d'água artificiais no país [19]. Para a delimitação da área dos reservatórios, foi utilizado o produto massas d'água, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico [19].

Para avaliar a performance dos modelos de balanço de energia em comparação ao produto MOD28C3, foram utilizadas métricas como: a raiz da diferença quadrática média em valor percentual (RMSD%), a correlação de Pearson (R^2) e a diferença média de viés (BIAS).

3. RESULTADOS

As estimativas de evaporação mensais dos modelos geeSEBAL e SSEBop e do produto MOD28C3 são apresentadas em um gráfico de dispersão dos resultados em função da área dos reservatórios (Figura 1), para avaliação do desempenho dos modelos. O geeSEBAL e o SSEBop apresentam comportamentos similares, sendo dois modelos de balanço de energia, esse resultado é esperado. Ainda, percebe-se que ambos os modelos geeSEBAL e SSEBop estão subestimados em comparação aos valores do produto MOD28C3. Em geral, esta comparação de estimativas de evaporação em grandes reservatórios do Brasil indicou uma boa correlação dos resultados.

Ainda, o modelo SSEBop apresentou uma correlação (pelo R^2) mais alta com o MOD28C3 (0,61), quando comparado ao modelo geeSEBAL (0,40). Por outro lado, foram verificados menores vieses e erros (BIAS e RMSE%) entre o modelo geeSEBAL e o produto MOD28C3 (-1,93 e 19,61, respectivamente), quando comparados ao modelo SSEBop (-8,25 e 20,97 respectivamente). De modo geral, o desempenho dos modelos geeSEBAL e SSEBop foi similar.

Considerando a evaporação estimada pelos modelos e pelo produto MOD28C3 (Figura 2), foram estimadas taxas mais elevadas de evaporação para os reservatórios localizados no Bioma Caatinga, na região Nordeste do Brasil (UHE Sobradinho e UHE Luiz Gonzaga). Ainda, o reservatório da UHE Tucuruí, localizada no Bioma Amazônia, apresenta comportamento sazonal distinto dos demais, sem uma redução característica da evaporação no inverno.

A Figura 3 apresenta os resultados de evaporação em relação a latitude em que se encontram os reservatórios, considerando uma média dos resultados dos modelos geeSEBAL e SSEBop. Os reservatórios das UHEs Sobradinho e Luiz Gonzaga resultaram nas maiores taxas evaporativas (1915,0 mm/ano e 1855,9 mm/ano, respectivamente). Por outro lado, os maiores reservatórios avaliados foram das UHEs Sobradinho e Tucuruí (3135,6 km² e 2784,1 km², respectivamente), resultando em valores de

volumes evaporados por ano de 6,0 km³, 3,7 km³ e 1,4 km³, respectivamente para os reservatórios das UHEs Sobradinho, Tucuruí e Luiz Gonzaga. Por fim, foi avaliado o volume evaporado por geração de energia por ano, em cada usina, sendo verificado o maior valor para a UHE Sobradinho, com 27,4 m³/W/ano, enquanto os menores resultados foram encontrados nas UHEs São Simão, Tucuruí e Ilha Solteira (em torno de 1 m³/W/ano).

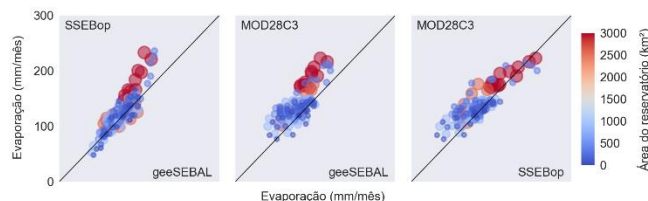


Figura 1. Comparação da evaporação estimada com os modelos geeSEBAL e SSEBop, e o produto MOD28C3, para 12 reservatórios brasileiros. Na figura está representado um marcador para cada reservatório por mês. A área do reservatório (km²) é representada por escala de cores e pelo tamanho do marcador.

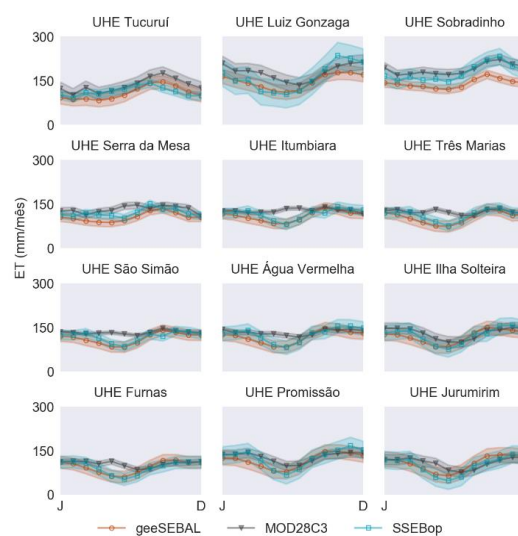


Figura 2. Evaporação estimada pelos modelos geeSEBAL e SSEBop e pelo produto MOD28C3, para 12 reservatórios brasileiros. Os gráficos estão organizados em função da latitude dos reservatórios. A área hachurada representa o desvio padrão dos dados ao longo do eixo.

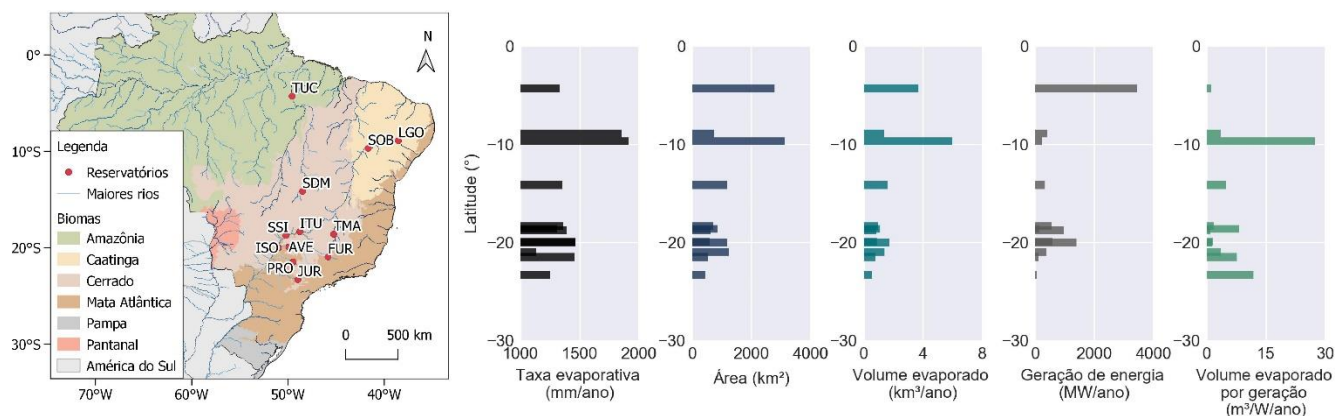


Figura 3. Comparação dos resultados por latitude: área dos reservatórios; perdas evaporativas médias anuais nos reservatórios a partir da média dos modelos geeSEBAL e SSEBop; volume evaporado (área x evaporação) para cada reservatório, em km³ por ano; geração de energia, em MW por ano, nos reservatórios analisados, e; volume evaporado por geração de energia, em m³/W/ano, para cada reservatório. Legenda: TUC - UHE Tucuruí, LGO - UHE Luiz Gonzaga, SOB - UHE Sobradinho, SDM - UHE Serra da Mesa, ITU - UHE Itumbiara, TMA - UHE Três Marias, SSI - UHE São Simão, AVE - UHE Água Vermelha, ISO - UHE Ilha Solteira, FUR - UHE Furnas, PRO - UHE Promissão, e JUR - UHE Jurumirim.

4. DISCUSSÃO

Os modelos geeSEBAL e SSEBop permitem a obtenção de estimativas de evaporação e evapotranspiração (evaporação do solo e águas abertas e transpiração das plantas). Estudos já demonstraram que estes modelos apresentam desempenho adequado ao serem utilizados para estimar a evaporação de lagos reservatórios [20]

Foram estimadas taxas mais elevadas de evaporação para os reservatórios localizados no Bioma Caatinga, respectivamente, das UHEs Sobradinho e Luiz Gonzaga. Esta região compreende o semiárido brasileiro, que apresenta

baixa precipitação anual (média abaixo de 800 mm) [21]. Contudo, considerando a área dos reservatórios analisados, os maiores volumes evaporados foram obtidos para os reservatórios das UHEs Sobradinho e Tucuruí. O reservatório da UHE Tucuruí apresenta comportamento sazonal distinto dos demais, o que está associado ao regime de chuvas na região, que varia de cerca de 70 mm/mês na estação seca a 350 mm/mês na estação chuvosa [22].

Outros estudos também apontam para a elevada evaporação destes reservatórios, localizados nas maiores latitudes. Segundo relatório da ANA, no Brasil, cinco reservatórios concentraram 32% do total de vazão consumida

via evaporação líquida, sendo Sobradinho o primeiro, Luiz Gonzaga o segundo e Tucuruí o quinto [23]. Ainda, outro estudo que analisou a evaporação no reservatório da UHE Tucuruí constatou que o fluxo evaporado é aproximadamente 20% superior à vazão retirada na bacia do Rio Tocantins [22].

Diversos estudos globais já apontam para um aumento nas taxas evaporativas, inclusive no Brasil [6], [24]. Deste modo, estudos que contabilizam as perdas evaporativas de reservatórios são essenciais para a correta gestão dos recursos hídricos no país.

5. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou as estimativas de evaporação em reservatórios brasileiros, obtidas por modelos de balanço de energia (geeSEBAL e SSEBop), utilizando dados de sensoriamento remoto. Os resultados foram comparados com as estimativas de evaporação do produto MOD28C3. Os modelos geeSEBAL e SSEBop apresentaram desempenho similar, com boa correlação dos resultados com as estimativas do produto MOD28C3. Os reservatórios com as maiores perdas de volumes evaporados estão localizados nas maiores latitudes, mas não necessariamente são os maiores reservatórios em área. As maiores perdas evaporativas anuais ocorrem no reservatório da UHE Sobradinho, com 1915,0 mm/ano, resultando em aproximadamente 6,0 km³/ano, sendo verificado um alto volume evaporado em relação a geração de energia desta usina. Os resultados deste estudo demonstram a relevância de aplicações de métodos de balanço de energia combinados com dados de sensoriamento remoto, para estimar as perdas evaporativas em reservatórios. Espera-se que isto possa auxiliar nos cálculos de balanço hídrico, e por consequência, na garantia do abastecimento de água e geração de energia.

6. REFERÊNCIAS

[1] ANEEL, “SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL / Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil),” 2022. [Online]. Available: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>. [Accessed: 03-Aug-2022].

[2] EPE, “Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020 / Empresa de Pesquisa Energética (Brasil).” EPE, Rio de Janeiro, p. 292, 2021.

[3] B. Lehner *et al.*, “High-resolution mapping of the world’s reservoirs and dams for sustainable river-flow management,” *Front. Ecol. Environ.*, vol. 9, no. 9, pp. 494–502, Nov. 2011.

[4] S. Assouline, K. Narkis, and D. Or, “Evaporation suppression from water reservoirs: Efficiency considerations of partial covers,” *Water Resour. Res.*, vol. 47, no. 7, Jul. 2011.

[5] K. Friedrich *et al.*, “Reservoir Evaporation in the Western United States: Current Science, Challenges, and Future Needs,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 99, no. 1, pp. 167–187, 2018.

[6] W. Tian, X. Liu, K. Wang, P. Bai, C. Liu, and X. Liang, “Estimation of global reservoir evaporation losses,” *J. Hydrol.*, vol. 607, p. 127524, 2022.

[7] K. Zhang, J. S. Kimball, and S. W. Running, “A review of remote

sensing based actual evapotranspiration estimation,” *WIREs Water*, vol. 3, no. 6, pp. 834–853, Nov. 2016.

[8] T. Biggs *et al.*, “Remote Sensing of Actual Evapotranspiration from Cropland: Chapter 3,” in *Remote sensing handbook, Vol. III: Remote sensing of water resources, disasters, and urban studies*, P. S. Thenkabail, Ed. CRC Press, 2015.

[9] L. Laipelt *et al.*, “Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and Google Earth Engine cloud computing,” *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 178, pp. 81–96, 2021.

[10] G. B. Senay, S. Kagone, and N. M. Velpuri, “Operational Global Actual Evapotranspiration: Development, Evaluation and Dissemination,” *Sensors (Basel)*, vol. 20, no. 7, p. 1915, Mar. 2020.

[11] G. B. Senay *et al.*, “Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach,” *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.*, vol. 49, no. 3, pp. 577–591, Jun. 2013.

[12] W. G. M. Bastiaanssen, M. Menenti, R. A. Feddes, and A. A. M. Holtslag, “A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation,” *J. Hydrol.*, vol. 212–213, pp. 198–212, Dec. 1998.

[13] J. Muñoz-Sabater *et al.*, “ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications,” *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 13, no. 9, pp. 4349–4383, Sep. 2021.

[14] G. B. Senay, “Satellite Psychrometric Formulation of the Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) Model for Quantifying and Mapping Evapotranspiration,” *Appl. Eng. Agric.*, vol. 34, no. 3, pp. 555–566, 2018.

[15] S. E. Fick and R. J. Hijmans, “WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas,” *Int. J. Climatol.*, vol. 37, no. 12, pp. 4302–4315, Oct. 2017.

[16] H. Gao, “MODIS/Terra Water Reservoir Monthly L3 Global V061 [Data set],” *NASA EOSDIS Land Processes DAAC*, 2021. .

[17] Y. Li *et al.*, “NASA’s MODIS/VIIIRS Global Water Reservoir Product Suite from Moderate Resolution Remote Sensing Data,” *Remote Sensing*, vol. 13, no. 4, 2021.

[18] G. Zhao, H. Gao, and X. Cai, “Estimating lake temperature profile and evaporation losses by leveraging MODIS LST data,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 251, p. 112104, 2020.

[19] ANA, “Catálogo de Metadados da ANA / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil),” *Massas d’Água*, 2019. [Online]. Available: <https://metadados.snirh.gov.br/>. [Accessed: 13-Jul-2022].

[20] M. Rahimpour and M. Rahimzadegan, “Assessment of surface energy balance algorithm for land and operational simplified surface energy balance algorithm over freshwater and saline water bodies in Urmia Lake Basin,” *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 143, no. 3, pp. 1457–1472, 2021.

[21] J. A. Marengo and M. Bernasconi, “Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections,” *Clim. Change*, vol. 129, no. 1, pp. 103–115, 2015.

[22] C. D. Coelho, D. D. da Silva, G. C. Sedyama, M. C. Moreira, S. B. Pereira, and Â. M. Q. Lana, “Comparison of the water footprint of two hydropower plants in the Tocantins River Basin of Brazil,” *J. Clean. Prod.*, vol. 153, pp. 164–175, 2017.

[23] ANA, “Evaporação líquida de reservatórios artificiais no Brasil / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil),” Brasília, DF, 2021.

[24] G. Zhao, Y. Li, L. Zhou, and H. Gao, “Evaporative water loss of 1.42 million global lakes,” *Nat. Commun.*, vol. 13, no. 1, p. 3686, 2022.