MODELAGEM HISTÓRICA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO ATRAVÉS DA COMPUTAÇÃO EM NUVEM: RESULTADOS PRELIMINARES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (1987 A 2017)

Ricardo Neves de Souza Lima [1], Celso Bandeira de Melo Ribeiro [2], Otto Corrêa Rotunno Filho [3]

[1] Centro de Documentação e Disseminação de Informações, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rua General Canabarro 706, Maracanã – RJ, ricardo.s.lima@ibge.gov.br; [2] Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Juiz de Fora, celso.bandeira@ufjf.edu.br; [3] Professor do Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, otto@coc.ufrj.br.

RESUMO

A análise histórica da evapotranspiração (ET) em bacias hidrográficas é fundamental para a gestão e planejamento em recursos hídricos. Este trabalho tem como objetivo avaliar a dinâmica espaço-temporal da ET na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul (BHPS), nos últimos 30 anos, através do modelo *Operational Simplified Surface Energy Balance* (SSEBop) utilizando a computação em nuvem de imagens Landsat-5 e 8 e dados meteorológicos em grade. Como resultado foi possível identificar o padrão espacial e a variabilidade temporal de longo termo da ET na bacia. Constatou-se, a partir da série histórica gerada, tendências significativas de alteração anual da ET para algumas classes de uso e cobertura da terra. A utilização de uma plataforma computacional em nuvem permitiu simular o comportamento de longo termo da ET em uma grande bacia e a construção de séries temporais extremamente úteis em estudos hidrológicos e ambientais.

Palavras-chave — Evapotranspiração, Modelo SSEBop, Google Earth Engine, Landsat.

ABSTRACT

The historical analysis of evapotranspiration (ET) in river basins is a fundamental key for water resources management and planning. This work aims to assess the spatio-temporal dynamics of ET in Paraíba do Sul river basin (BHPS), in the last 30 years, using the Operational Simplified Surface Energy Balance model (SSEBop) based on Landsat-5 and 8 jointly with weather grid datasets. As a result, it was possible to identify spatial patterns and long-term temporal variability of ET over the basin. We verified significant trends in annual ET for some land cover classes from the historical ET series. The use of a cloud computing platform allowed simulating the long-term ET over a large basin and the analysis of time series which are extremely useful in hydrological and environmental studies.

Key words — *Evapotranspiration, SSEBop model, Google Earth Engine, Landsat.*

1. INTRODUÇÃO

A evapotranspiração (ET) é um dos principais componentes do balanço hidrico em bacias hidrográficas, interligando a biosfera, hidrosfera e atmosfera. Nas diferentes escalas de tempo e espaço as oscilações climáticas e as mudanças na cobertura e uso da terra impactam de forma conjunta a disponibilidade hídrica, o que representa um grande desafio à gestão e planejamento em recursos hídricos.

A avaliação de tendências em séries históricas de dados hidrológicos é um importante subsídio para a gestão em áreas propensas à ocorrência de crises hídricas, como é o caso da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul (BHPS).

Nos últimos anos diversos métodos de sensoriamento remoto (SR) foram desenvolvidos para a estimativa da ET em diferentes escalas espaciais, abrangendo desde propriedades agrícolas até grandes bacias hidrográficas [1]. Dentre esses modelos, o SSEBop (*Operational Simplified Surface Energy Balance*) [2] vem apresentando bons resultados para a estimativa sazonal da ET em grandes áreas nos EUA [3] e África [4] a partir de dados orbitais MODIS e Landsat.

A principal vantagem do SSEBop é sua parametrização simplificada em comparação a outros modelos como o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) [5], entre outros, o que permite uma operacionalização mais eficaz, tanto para análises locais quanto regionais ou globais.

No entanto, análises espaço-temporais em sensoriamento remoto demandam um elevado custo computacional, impactando a aplicação de modelos como o SSEBop. Nesse sentido, a plataforma Google Earth Engine (GEE) [6] possibilita o processamento em larga escala de infomações geoespaciais, a partir da computação de alto desempenho em nuvem e do acesso a um vasto acervo de dados orbitais.

Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho é analisar a variabilidade espaço-temporal da ET estimada a partir do modelo SSEBop na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, nos últimos 30 anos (1987-2017), utilizando o ambiente computacional em nuvem do GEE e sua serie histórica de dados geoespaciais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul (BHPS) drena uma das regiões mais desenvolvidas do Brasil (Figura 1), com uma população estimada em 5,5 milhões de habitantes (ano 2000), e uma área total de 62.074 km^2, estendendo-se pelos estados de São Paulo (14.510 km²), Rio de Janeiro (26.851 km²) e Minas Gerais (20.713 km²) [7].

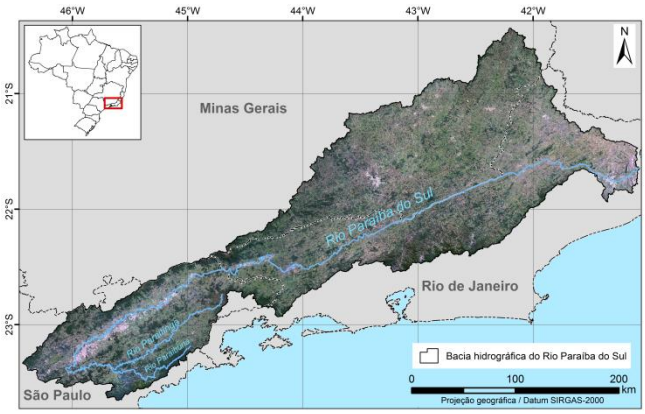

Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul.

2.2. Base de dados

Os dados utilizados incluíram as coleções de imagens orbitais Landsat-5 (1987 a 2011) e Landsat-8 (2013 a 2017), dados meteorológicos em grade do NCEP/CFSv2 (*National Center for Environmental Prediction/Climate Forecast System, version 2, 6-hourly Products*), dados altimétricos do SRTMGL1 (*NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second V003*), e os dados de cobertura e uso da terra do projeto MapBiomas (coleção 3), acessados através da plataforma GEE. Para avaliação dos resultados do SSEBop, foi utilizado o produto MOD16A2 (*MODIS Terra Net Evapotranspiration 8-Day Global 500m*) também disponível no GEE. Maiores detalhes sobre esses dados podem ser consultados em [8] e [9].

2.3. SSEBop

No modelo SSEBop a ET real diária (ET_a) é calculada a partir da Equação 1, como uma fração da ET de referência da grama (ET_0), calculada pelo método Penman-Monteith-FAO [10], com base nos dados meteorológicos em grade do modelo NCEP/CFSv2.

$$ETa = ETf.k.ET_0 \quad (1)$$

onde k é um coeficiente que ajusta a ET_0 para um valor máximo provável de uma cultura aerodinamicamente mais rugosa, como a alfafa (neste trabalho, k = 1), e ETf é a fração da ET_0 ou fração evaporativa, calculada pela Equação 2 como

$$ETf = \frac{Th-Ts}{dT} = \frac{Th-Ts}{Th-Tc} \quad (2)$$

onde Ts (K) é a temperatura de superfície derivada da banda termal da coleção Landsat, Th e Tc são, respectivamente, as temperaturas (K) para as condições de contorno "quente" e "fria", e dT é o diferencial de temperatura (entre Th e Tc).

Os valores de Tc, Th e dT foram calculados conforme as Equações 3 a 6 [2]:

$$Tc = c.\ Ta \quad (3)$$

$$c = \frac{Ts_cold}{Ta} \quad (4)$$

$$Th = Tc + dT \quad (5)$$

$$dT = \frac{R_n \cdot r_{ah}}{\rho_a \cdot C_p} \quad (6)$$

onde Ta (K) é temperatura máxima diária do ar com base nos dados NCEP/CFSv2, c é um fator de correção para relacionar Ta e Ts em uma superfície bem vegetada e com boa disponibilidade hídrica, Ts_cold (K) é a temperatura de superfície (Ts) em locais onde o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) é maior ou igual a 0,8, Rn (MJ.m^{-2}.dia^{-1}) é o saldo de radiação estimado para condições de solo exposto/seco onde se assume que os fluxos de calor no solo (G) e calor latente (LE) sejam iguais a zero, Cp (1,013 kJ.kg^{-1}.°C^{-1}) é o calor específico do ar, ρ_a (kg.m^{-3}) é a densidade do ar [10], e r_{ah} (s.m^{-1}) é a resistência aerodinâmica ao fluxo de calor para condições de solo exposto/seco, neste caso igual a 110 s.m^{-1} [2].

Todos os cálculos para a estimativa da ETa foram realizados em escala diária, para cada imagem Landsat selecionada no período (1987 a 2017), sendo posteriormente obtidas a média de longo termo (mm.dia^{-1}) (Equação 7) e o coeficiente de variação (%) (Equação 8):

$$ETa_{MLT} = \frac{1}{n} \sum ETa \quad (7)$$

$$ETa_{CV} = \left(\frac{DP}{ETa_{MLT}}\right) .\ 100 \quad (8)$$

onde ETa_{MLT} (mm.dia^{-1}) é a média de longo termo da ETa diária calculada pelo SSEBop, e ETa_{CV} (%) é o coeficiente de variação da ETa diária no período.

2.4. Implementação e avaliação dos resultados

O modelo SSEBop foi implementado na plataforma GEE seguindo o fluxograma geral apresentado na Figura 2.

A avaliação dos resultados foi realizada por meio do cálculo do erro absoluto médio percentual (MAPE) e da raiz do erro quadrático médio (RMSE) (Equações 9 e 10) entre a ET média de longo termo obtida pelo SSEBop e pelo

produto MOD16A2, desagregado para a escala diária, segundo

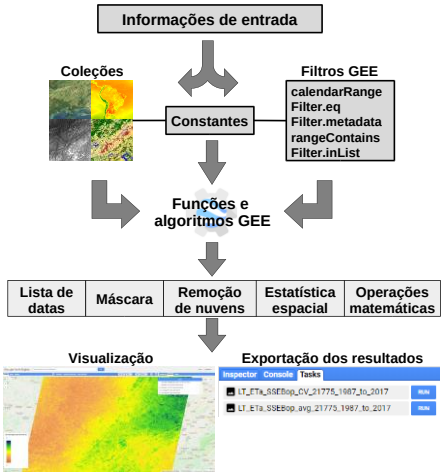

Figura 2. Fluxograma geral de implementação do SSEBop no GEE.

$$MAPE = (\sum(|obs - sim/obs|)/N).100 \quad (9)$$

$$RMSE = [(\sum(obs - sim)^2)/N]^{1/2} \quad (10)$$

onde *obs* (mm.dia^{-1}) é a ETa$_{MLT}$ do produto MOD16A2, *sim* (mm.dia^{-1}) é a ETa$_{MLT}$ simulada pelo SSEBop e, *N* é o número de amostras.

Devido a diferença na resolução espacial entre os dados Landsat (30 m) e MODIS (500 m), foram adotadas, como unidade amostral para o cálculo do MAPE e RMSE, células regulares de 5km x 5km sobre a área da BHPS, excluindo áreas urbanas e massas d'água, as quais não são consideradas no produto MOD16A2. Esta avaliação foi realizada a partir do ano 2001, que corresponde ao período inicial de disponibilidade do produto MOD16A2.

Para a avaliação de tendências temporais, foi aplicado o teste de Mann-Kendall com o estimador de inclinação Sen [11] sobre a série histórica de ETa obtida pelo SSEBop para cada uma das principais classes de cobertura e uso da terra na BHPS. Neste caso, considerou-se apenas os pixels que não apresentaram transição de classe no período em análise.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram processadas, na plataforma GEE, um total de 1811 cenas Landsat-5 e Landsat-8 no período 1987-2017, cobrindo 9 articulações (*path/row*). O ano de 2014 apresentou o maior número de cenas selecionadas (95), enquanto o menor número foi em 2002 (30).

A média de longo termo da ETa (ETa$_{MLT}$) na bacia, estimada pelo SSEBop (Figura 3 – superior), apresentou os maiores valores (ETa$_{MLT}$ > 3mm.dia^{-1}) na porção sul, especialmente em áreas florestais montanhosas, e no trecho inferior da bacia, próximo à foz do rio Paraíba do Sul. Os menores valores estimados (ETa$_{MLT}$ < 2mm.dia^{-1}) foram observados na porção central e norte da bacia, principalmente entre 500 e 1000m de altitude, e em áreas urbanas e pouco vegetadas.

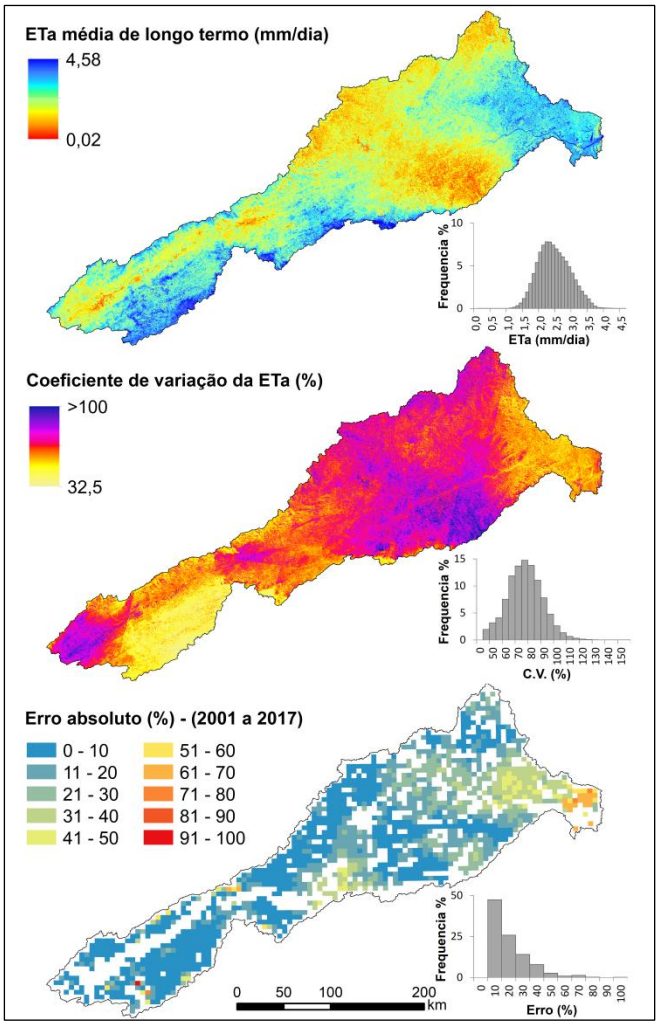

Figura 3. Resultados do SSEBop na BHPS (superior e centro) e avaliação comparativa com o produto MOD16A2 (inferior).

Conforme observado na Figura 3 (centro), a porção central da bacia apresentou os maiores índices de variação da ETa (CV ≥ 100%) entre as datas selecionadas, principalmente no trecho serrano do estado do RJ e em algumas áreas em MG. Os menores valores (C.V. < 60%) ocorreram no trecho superior da BHPS, na região dos rios Paraitinga e Paraibuna no estado de SP.

A análise espaço-temporal da ETa na BHPS no período 1987-2017 indicou uma compartimentação dos processos evapotranspirativos na bacia e uma elevada variabilidade temporal, que podem estar associadas a diferentes graus de sazonalidade hídrica na região, especialmente em áreas topograficamente complexas e/ou com baixa cobertura florestal.

A avaliação espacial entre a ETa$_{MLT}$ estimada pelo SSEBop em relação àquela obtida pelo produto MOD16A2, no período 2001-2017, apresentou maior frequência de erros

de até 10% (47,4%) (Figura 3 – inferior), e valores de MAPE de 14,7% e RMSE de 0,40 mm.dia^{-1}, indicando boa concordância com o produto MOD16A2 na maior parte da bacia.

A série anual (1987-2017) da ETa média diária estimada pelo SSEBop para cada classe de uso e cobertura da terra na BHPS pode ser observada no gráfico da Figura 4. O teste de Mann-Kendall (Z_{MK}) indicou a existência de tendências positivas moderadas, no nível de 10% de significância, para as classes Floresta, Formação natural não florestal e Agropecuária (Tabela 1). Para as classes Área não vegetada e Corpo d'água, as tendências foram consideradas duvidosas ($p > 0,1$).

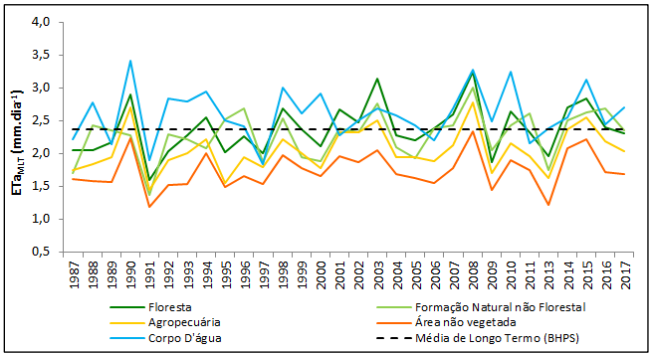

Figura 4. Série histórica anual de ETa estimada pelo SSEBop para cada classe de uso e cobertura da terra na BHPS.

Tabela 1. Teste de Mann-Kendall e Sen sobre a série anual de ETa estimada pelo SSEBop para cada classe de uso e cobertura da terra (n = 30).

Classe de uso e cobertura	Teste Z_{MK}	p-Valor (MK)	Sen (mm.ano^{-1})	Sig.
Floresta	1,855	**0,0635**	0,0147	**Aceitável**
Formação Natural não Florestal	1,891	**0,0586**	0,0120	**Aceitável**
Agropecuária	1,677	**0,0935**	0,0106	**Aceitável**
Área não vegetada	1,392	0,1640	0,0069	Duvidosa
Corpo D'água	0,250	0,8028	0,0023	Duvidosa

4. CONCLUSÕES

A aplicação do modelo SSEBop através da plataforma Google Earth Engine permitiu avaliar os padrões espaciais e temporais de distribuição da evapotranspiração real na BHPS nos últimos 30 anos com base no processamento em larga escala de imagens Landsat e de dados meteorológicos em grade.

Algumas limitações foram identificadas, indicando a necessidade de incorporação de técnicas ou outras plataformas orbitais com objetivo de melhorar a desagregação temporal da série histórica de evapotranspiração.

Futuros trabalhos podem incorporar a influência sazonal da topografia, assim como calibrações regionalizadas de alguns parâmetros e outras bases de dados para a avaliação dos resultados.

5. REFERÊNCIAS

[1] McShane, R.R.; Driscoll, K.P. e Sando, R., "A review of surface energy balance models for estimating actual evapotranspiration with remote sensing at high spatiotemporal resolution over large extents: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2017–5087", USGS, 19 pp., 2017.

[2] Senay, G.B.; Bohms, S.; Singh, R.K.; Gowda, P.H.; Velpuri, N.M.; Alemu, H. e Verdin, J.P., "Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets - A new parameterization for the SSEB approach", *Journal of the American Water Resources Association*, v. 49, n. 3, pp. 577–591, 2013.

[3] Singh, R.K., Senay, G.B., Velpuri, N.M., Bohms, S., Scott, R.L. e Verdin, J.P., "Actual evapotranspiration (water use) assessment of the Colorado River Basin at the Landsat resolution using the Operational Simplified Surface Energy Balance Model", *Remote Sensing*, v. 6, n. 1, pp. 233–256, 2014.

[4] Alemayehu, T.; van Griensven, A.; Senay, G. B. e Bauwens, W., "Evapotranspiration Mapping in a Heterogeneous Landscape Using Remote Sensing and Global Weather Datasets: Application to the Mara Basin, East Africa", *Remote Sensing*, v. 9, n. 4, pp. 390, 2017.

[5] Bastiaanssen, W.G.M.; Menenti, M.; Feddes, R.A. e Holtslag, A.A.M. "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part. 1: Formulation", *Journal of Hydrology*, v. 212-213, pp. 198-212, 1998.

[6] Gorelick, N.; Hancher, M.; Dixon, M.; Ilyushchenko, S.; Thau, D. e Moore, R. "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone", *Remote Sensing of Environment*, v. 202, pp. 18-27. 2017.

[7] CEIVAP - Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, Gestão da Bacia, Dados Gerais. Disponível em: <http://www.ceivap.org.br/dados-gerais.php>. Acesso em: 28 set 2018.

[8] Google Earth Engine, Datasets. Disponível em: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/>. Acesso em: 04 out 2018.

[9] Projeto MapBiomas – Coleção 3 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil. Disponível em: <http://mapbiomas.org>. Acesso em: 25 set 2018.

[10] Allen, R.G.; Pereira, L.; Raes, D. e Smith, M., "Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements: Food and Agriculture Organization of the United Nations Irrigation and Drainage Paper 56", FAO, Roma, 178 pp., 1998.

[11] Gilbert, R.O., "Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring", John Wiley and Sons, Nova York, 319 pp., 1987.