

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

BALANÇO HÍDRICO POR SENSORIAMENTO REMOTO EM REGIÃO DE CRESCIMENTO AGRÍCOLA NA COSTA DO NORDESTE DO BRASIL

Franzone de Jesus Farias¹; Antônio Heriberto de Castro Teixeira¹; Inajá Francisco de Souza¹; Janice Freitas Leivas²; Celina Maki Takemura² & Edlene Aparecida Monteiro Garçon²

Abstract: The SAFER algorithm was applied to test water balance (WB) monitoring an agricultural growing region of the coastal Northeast Brazil, classifying the biomes Atlantic Forest and Caatinga. The MODIS MOD13Q1 reflectance product and weather data were used to calculate actual (ET) evapotranspiration at 16-day timescale along the years 2007 to 2021. The period with the highest precipitation (P) is in May, when the 16-day values are above 90 mm in Atlantic Forest and higher than 70 mm in Caatinga. For ET, the largest rates occur between July and September, when the 16-day average surpass 2.70 mm d⁻¹ in the Atlantic Forest and 2.90 mm d⁻¹ in Caatinga. Larger P together with lower ET concentrates the positive water balance - WB (P – ET) from March to August in both biomes bringing suitability for the rainfed agriculture. However, from July to December occur the negative WB values, indicating the need of irrigation for critical crop stages. The large-scale modeling presented viability to subsidize public policies regarding the water resources, with potential for replication of the methods in other regions.

Key words – Precipitation, evapotranspiration, SAFER.

Resumo: O algoritmo SAFER foi aplicado para testar o monitoramento do balanço hídrico (BH) em região de crescimento agrícola na região costeira do Nordeste do Brasil, classificando-se os biomas Floresta Atlântica e Caatinga. O produto reflectância MODIS MOD13Q1 foi usado em conjunto com dados climáticos nos cálculos da evapotranspiração atual (ET) na escala temporal de 16 dias ao longo dos anos de 2007 a 2021. O período com maior precipitação (P) é em maio, quando os valores para 16 dias são acima de 90 mm na Floresta Atlântica e maiores que 70 mm na Caatinga. Para a ET, as maiores taxas ocorrem entre julho e setembro, quando as médias para 16 dias ultrapassam 2,70 mm d⁻¹ na Floresta Atlântica e 2,90 mm d⁻¹ na Caatinga. Elevados valores de P em conjunto com baixa ET, concentram os valores positivos de balanço hídrico – BH (P – ET) de março a abril em ambos os biomas, acarretando viabilidade para agricultura de sequeiro. Entretanto, de julho a dezembro ocorrem os valores negativos de BH, indicando a necessidade de irrigação nos estágios críticos das culturas. A modelagem em larga escala apresentou viabilidade para políticas públicas relacionadas aos recursos hídricos, com potencial de replicação dos métodos em outras regiões.

Palavras-Chave – Precipitação, evapotranspiração, SAFER.

1. INTRODUÇÃO

As análises dos componentes do balanço hídrico em larga escala são essenciais para compreensão do ambiente físico e a compreensão das dinâmicas desses componentes é crucial para

1) Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão – SE: franzone.farias@gmail.com; heribertoteixeira11@gmail.com & inajafrancisco@gmail.com
2) Embrapa Territorial, Campinas – SP: janice.leivas@embrapa.br; celina.takemura@embrapa.br & edlene.garcon@embrapa.br

avaliação dos impactos das mudanças climáticas e do uso da terra (Yang *et al.* 2016; Zhang *et al.* 2019). Os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT), localizados na região de crescimento agrícola na costa do Nordeste do Brasil, limitada pelos estados Sergipe (SE), Alagoas (AL) e Bahia, chamada SEALBA, por exemplo, estão sofrendo com vários impactos sobre os recursos hídricos, como consequências de desflorestamentos, queimadas, poluição da água e agricultura intensiva, o que demanda estudos de balanço hídrico em larga escala (Teixeira *et al.* 2020).

Embora alguns estudos de balanço hídrico tenham sido realizados por meio de medições pontuais nos biomas FA e CT (Pereira *et al.* 2010; Silva *et al.* 2017; Marques *et al.* 2020; Rodrigues *et al.* 2021), poucos esforços foram feitos para comparar os componentes do balanço hídrico nesses biomas dentro do SEALBA utilizando uma série longa de dados. Medições locais desses componentes não são adequadas para análises em larga escala, devido às variações nas condições ambientais. Devido a essas limitações, o sensoriamento remoto por satélites em conjunto com dados climáticos tem sido usado através de aplicações de algoritmos em distintos agroecossistemas (Wagle *et al.*, 2017; Nyolei *et al.*, 2019; Teixeira *et al.*, 2020). O algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*), desenvolvido por Teixeira (2010) foi escolhido na atual pesquisa na determinação da evapotranspiração atual (ET) para uso em conjunto com grades de precipitação (P). A razão dessa escolha foi devido a fato de, além da aplicabilidade do SAFER, outra vantagem importante, com relação a outros algoritmos, é que na sua nova versão não há necessidade das bandas termais para obtenção da ET.

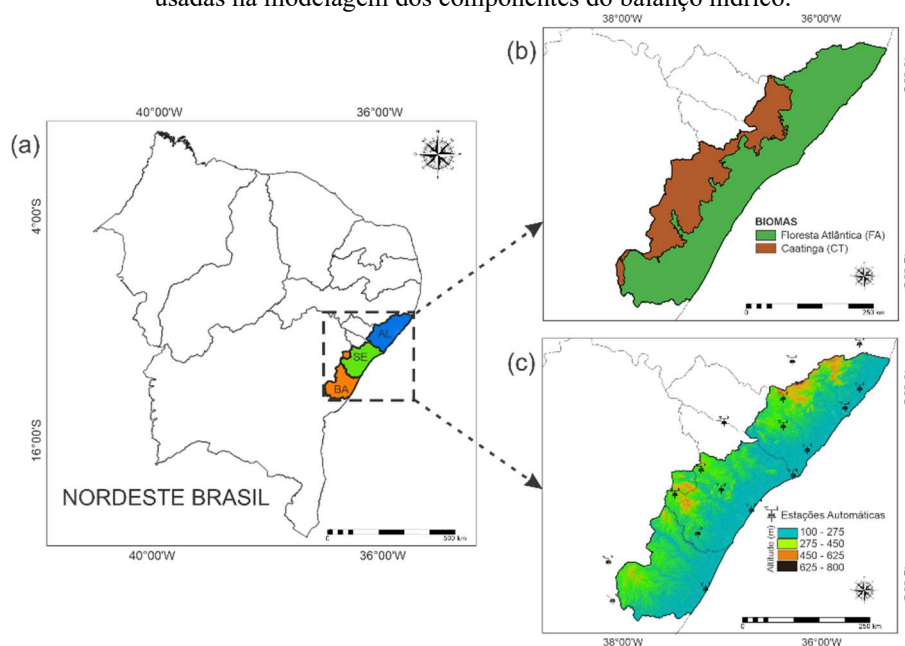
Objetivando a implementação de sistema operacional para monitoramento dos componentes do balanço hídrico em regiões com crescimento agrícola, tomando SEALBA como referência, testamos a versão nova do SAFER com o uso do produto reflectância MODIS MOD13Q1 em conjunto com dados climáticos históricos em um período de 15 anos (2007-2021). A pesquisa, além de contribuir com a disponibilidade de informações nas escalas espacial de 250 m e temporal de 16 m, tem potencial para subsidiar políticas públicas sobre o uso dos recursos hídricos. O sucesso dessas aplicações na região específica do SEALBA pode encorajar a replicação dos métodos em outras condições ambientais, com simples calibrações das equações das modelagens.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo e série de dados

A região de estudo engloba áreas de crescimento agrícola na região litorânea do nordeste do Brasil, envolvendo os estados de Sergipe (SE), Alagoas (AL) e Bahia (BA), denominada SEALBA, um acrônimo formado pelas siglas desses três estados. A Figura 1 apresenta a localização do SEALBA nos respectivos Estados (Figura 1a), biomas de acordo com o instituto brasileiro de geografia e estatística (IBGE) (Figura 1b) e altitudes com as 17 estações climáticas usadas do instituto nacional de meteorologia - INMET (Figura 1c).

Figura 1 – Localização da região SEALBA no Nordeste do Brasil envolvendo os estados de Sergipe - SE, Alagoas - AL e Bahia – BA (Figura 1a), com detalhes para os biomas (Figura 1b) e altitudes com as estações climáticas (Figura 1c) usadas na modelagem dos componentes do balanço hídrico.



O bioma Floresta Atlântica (FA) é caracterizado pela presença de vegetação florestal, sendo prevalentes a floresta ombrófila densa e aberta, a floresta estacional semidecidual e ecossistemas associados na baixada litorânea. O clima é tropical úmido, ocasionado pelas massas de ar úmidas vindas do Oceano Atlântico, com temperaturas e umidade do ar elevadas durante todo o ano e com chuvas regulares e bem distribuídas (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA, 2023). O bioma Caatinga apresenta uma flora composta por árvores e arbustos com características que permitem a adaptação às condições climáticas adversas. A região apresenta temperaturas elevadas, com escassez e menores quantidades de chuvas que no bioma FA (Beuchle *et al.* 2015). Tanto o bioma Floresta Atlântica (FA) quanto o bioma Caatinga (CT) vem sofrendo alteração do uso da terra devido a inserção de diversos cultivos como: frutíferas, sucoenergéticas, grãos, silvicultura e pastagem (Procópio *et al.* 2019).

Os dados climáticos que entraram na modelagem dos componentes do balanço hídrico em larga escala foram a radiação solar global (R_G), a temperatura do ar (T_a), umidade relativa do ar (UR), a velocidade do vento (u). Esses dados foram usados nos cálculos da evapotranspiração de referência (ET_0) e atual (ET), as quais juntamente com dados de precipitação pluviométrica (P) permitiram a contabilidade do balanço hídrico. Foram usadas as bandas 1 e 2 do sensor MODIS (produto reflectância MOD13Q1), em conjunto com os dados climáticos, considerando-se o período de 2007 a 2021.

2.2. Modelagem do balanço hídrico.

Para a estimativa da ET com aplicação do SAFER obtém-se primeiramente os parâmetros de entrada por sensoriamento remoto combinando-os com as grades de dados climáticos. As equações e coeficientes de regressão a seguir foram previamente obtidos na região Nordeste do Brasil com medições simultâneas em campo e por satélite, descrito em detalhe em Teixeira (2010) e Teixeira *et al.* (2008).

O albedo da superfície (α_0) foi calculado como:

$$\alpha_0 = a + b\rho_1 + c\rho_2 \quad (1)$$

onde ρ_1 e ρ_2 são respectivamente as reflectâncias do sensor MODIS nas bandas 1 (vermelho) e 2 (infravermelho próximo); a, b e c são coeficientes de regressão 0,08, 0,41, e 0,14, respectivamente.

O índice da Diferença de Vegetação Normalizado (NDVI) é usado como indicador das condições de umidade e cobertura do solo:

$$NDVI = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (2)$$

O saldo de radiação (R_n) foi estimado pela equação de Slob:

$$R_n = (1 - \alpha_0)R_G - a_L \tau_{sw} \quad (3)$$

onde τ_{sw} é a transmissividade atmosférica para comprimento de ondas curtas e a_L é um coeficiente de regressão que foi espacializado em função da temperatura do ar (T_a).

A emissividade atmosférica (ε_A) foi calculada como:

$$\varepsilon_A = a_A (\ln \tau_{sw})^{b_A} \quad (4)$$

onde a_A e b_A são os coeficientes de regressão 0,94 e 0,11, respectivamente.

A emissividade da superfície foi estimada como:

$$\varepsilon_0 = a_0 \ln NDVI + b_0 \quad (5)$$

onde a_0 e b_0 são os coeficientes de regressão 0,06 e 1,00, respectivamente.

Pelo método residual a temperatura da superfície foi estimada pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$T_0 = \frac{\sqrt[4]{R_G(1 - \alpha_0) + \sigma \varepsilon_A T_a^4 - R_n}}{\sigma \varepsilon_0} \quad (6)$$

Para estimativa da evapotranspiração atual (ET), sua razão para a de referência (ET_0) foi modelada:

$$\frac{ET}{ET_0} = \exp \left[a_{sf} + b_{sf} \left(\frac{T_0}{\alpha_0 NDVI} \right) \right] \quad (7)$$

onde a_{sf} e b_{sf} são os coeficientes de regressão 1.80 e -0.008, respectivamente.

A Eq. 7 não funciona para corpos de água ($NDVI < 0$), então o conceito de evapotranspiração de equilíbrio - ET_{eq} é usado no SAFER nessas circunstâncias:

$$ET_{eq} = 0.035 \left(\frac{\Delta (R_n - G)}{\Delta + \gamma} \right) \quad (8)$$

onde Δ é a inclinação da curva que relaciona a pressão de saturação do vapor (e_s) com T_a , γ é a constante psicrométrica, e G é o fluxo de calor no solo estimado como:

$$\frac{G}{R_n} = a_G \exp(b_G \alpha_0) \quad (9)$$

onde a_G e b_G são os coeficientes de regressão 3.98 e -25.47, respectivamente.

Considerando que os valores de ET/ET_0 na passagem não diferem significativamente dos diários, através de funções condicionais aplicadas aos valores de NDVI, a ET diária foi estimada como:

$$ET = \frac{ET}{ET_0} ET_{0,24} \text{ ou } ET_{eq} \quad (10)$$

onde $ET_{0,24}$ é a evapotranspiração de referência diária calculada com os dados climáticos.

Tendo ET sido modelada, com grades de precipitação (P), o balanço hídrico foi obtido:

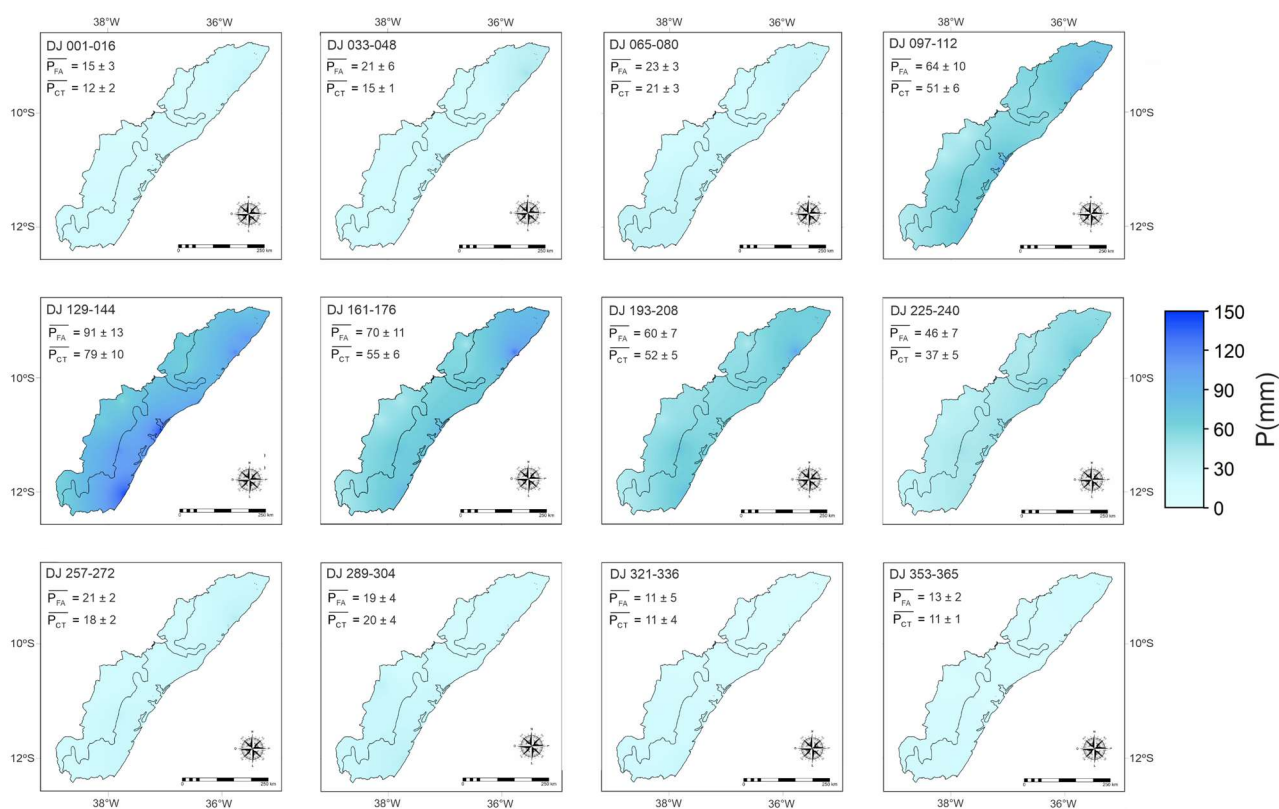
$$BH = P - ET \quad (11)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Dinâmica espacial e temporal da precipitação

A Figura 2 mostra as distribuições espaciais dos totais médios de precipitação (P) para alguns dos períodos de 16 dias das imagens MODIS, juntamente com os valores médios dos pixels e desvios padrões (DP) para os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) dentro da região do SEALBA, para o período de 2007 a 2021 em termos de dias julianos (DJ)

Figura 2 – Distribuições espaciais dos totais médios de precipitação (P) para alguns períodos de 16 dias das imagens MODIS, nos biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT), em termos de dias julianos (DJ).



Em geral, para ambos os biomas, as distribuições das chuvas apresentam irregularidades espaciais e temporais na distribuição das chuvas, entretanto, menores precipitações (P) ocorrem na

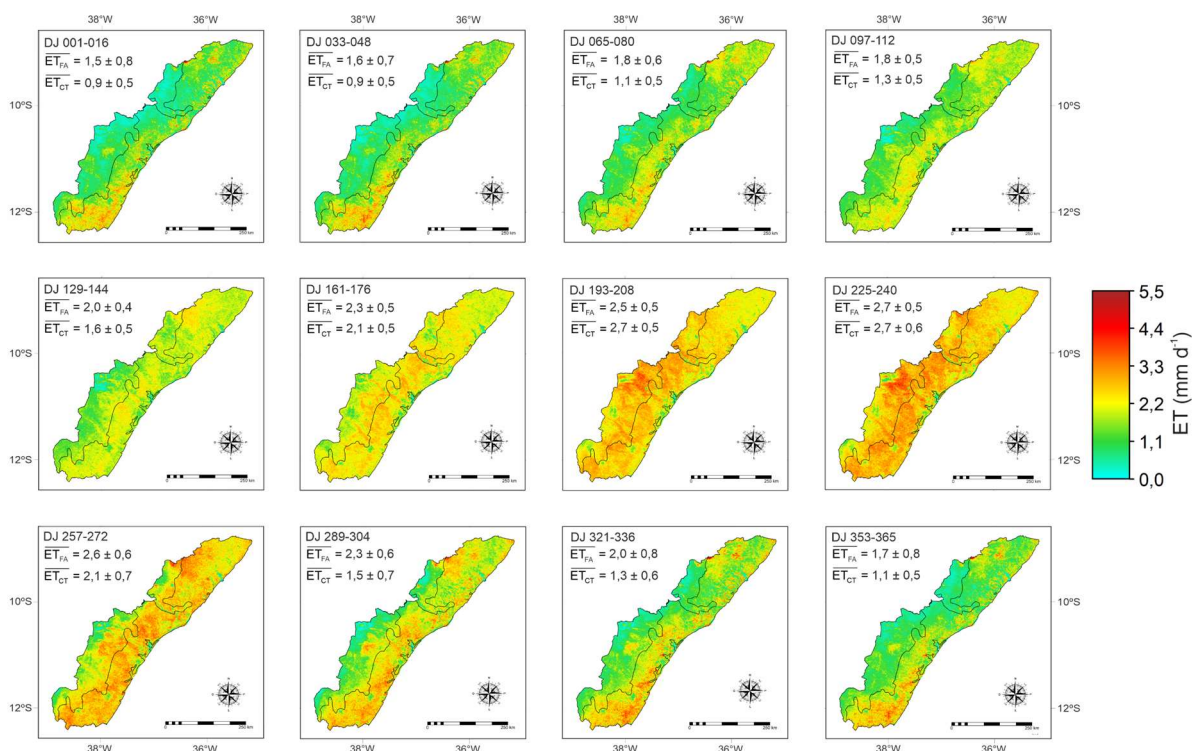
Caatinga (CT) quando comparadas àquelas na Floresta Atlântica (FA), principalmente no período de abril a julho (DJ 097-192), quando a diferença nos totais para 16 dias entre os biomas é acima de 12 mm. Durante este último período ocorrem os valores máximos de P, com totais médios para 16 dias acima de 60 mm para FA e maiores que 50 mm em CT. Os menores valores de P, com totais médios para 16 dias inferiores a 15 mm em ambos os biomas, são em dezembro (DJ 321-336). Considerando a escala anual, o total médio em CT, com 772 mm ano^{-1} , é 83% daquele para FA (927 mm ano^{-1}). De acordo com os valores de desvios padrões (DP) ao longo do ano, nota-se maiores variações espaciais em FA que em CT, com DP representando 17 e 14% dos valores médios dos pixels, respectivamente.

Através de medições dos componentes do balanço hídrico no bioma FA durante 2008, Pereira *et al.* (2010), reportaram valores anuais de P de 1313 mm ano^{-1} , um pouco superior ao nosso total médio anual. Silva *et al.* (2017) encontraram um valor anual de P no bioma CT de 430 mm ano^{-1} com medições entre 2014 e 2015, inferior ao valor na pesquisa corrente para este bioma. Entretanto, para o bioma CT, Oliveira *et al.* (2022) reportaram um valor anual de P de 783 mm ano^{-1} , muito próximo do nosso para esse bioma. Como os valores de P no estudo corrente são médias para 15 anos, observa-se que aqueles para anos específicos podem variar para acima ou abaixo dos valores históricos em ambos os biomas. Analisando a dinâmica das chuvas para os períodos de 16 dias, ambos os biomas dentro do SEALBA apresentam duas estações definidas, uma seca e outra chuvosa, com maiores quantidades concentradas no meio do ano.

3.2. Dinâmica espacial e temporal da evapotranspiração atual

A Figura 3 mostra as distribuições espaciais da evapotranspiração atual (ET), na escala diária, para alguns dos períodos de 16 dias das imagens MODIS, juntamente com as médias dos pixels e desvios padrões (DP) para os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) dentro da região do SEALBA, para o período de 2007 a 2021 em termos de dias julianos (DJ).

Figura 3 – Distribuições espaciais da evapotranspiração atual (ET), na escala diária, para alguns períodos de 16 dias das imagens MODIS, nos biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT), em termos de dias julianos (DJ).



Como para P, são observadas largas variações espaciais e temporais nos valores da ET ao longo do ano, dentro da região do SEALBA. As taxas mais elevadas ocorrem entre julho e setembro (DJ 193-256), quando os valores médios dos pixels para 16 dias ultrapassam 2,70 mm d⁻¹ para o bioma FA e 2,90 mm d⁻¹ para o bioma CT. Os valores inferiores da ET são detectados de janeiro a fevereiro, quando as médias para 16 dias em FA são inferiores a 1,50 mm d⁻¹ e abaixo de 1,00 mm d⁻¹ em CT. Na escala anual os respectivos totais médios são de 760 e 601 mm ano⁻¹, com as taxas em CT sendo 79% daquelas para FA.

Através de medições do balanço hídrico no bioma FA, Pereira *et al.* (2010) reportaram na escala anual um valor médio diário para a ET de 3,30 mm d⁻¹m, um pouco superior ao nosso de 2,08 ± 0.59 mm d⁻¹ para esse bioma. Entretanto, com medições desse balanço entre 2013 e 2018 em FA, Rodrigues *et al.* (2021) encontraram uma ET média diária variando de 1,40 a 1,80 mm d⁻¹ sob condições secas, valores similares aos nossos nos períodos de estiagem no início e no final do ano. Através de medições de balanço de energia de 2014 a 2015 no bioma CT, Silva *et al.* (2017) encontraram valores diários médios para ET variando de 0,98 mm d⁻¹ na estação seca a 1,96 mm d⁻¹ na estação chuvosa. Também com medições de balanço de energia no bioma CT de 2014 a 2015, Marques *et al.* (2020) reportaram valores diários médios para ET variando de 0,20 a 0,30 mm d⁻¹, durante a período seco, até uma faixa entre 1,70 e 2,60 mm d⁻¹ no período chuvoso. Esses valores para o bioma CT são similares aos da corrente pesquisa, considerando o valor médio anual de 1.65 ± 0.54 mm d⁻¹.

3.3. Balanço hídrico em larga escala

Para o balanço hídrico (BH), os valores diários da ET foram extrapolados para totais de 16 dias, Figura 4 apresenta os valores médios dos pixels e desvios padrões (DP) nessa escala temporal ao

longo do ano para os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT), dentro da região do SEALBA, no período de 2007 a 2021, em termos de dia juliano (DJ).

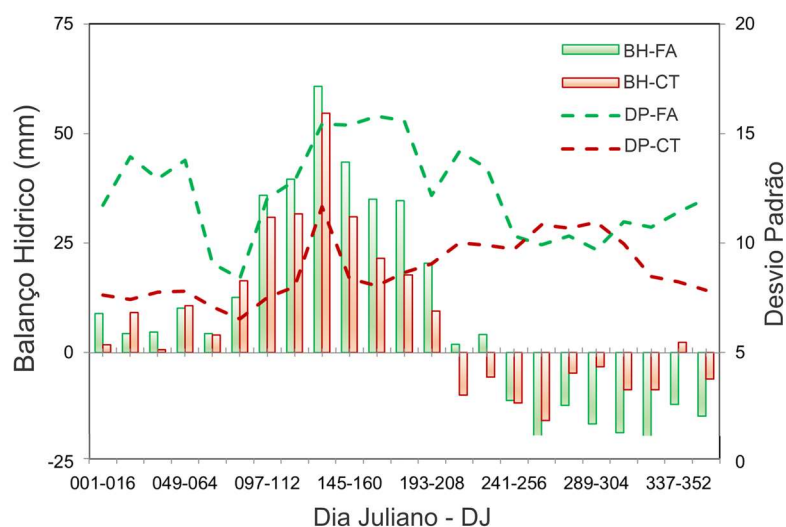


Figura 4 – Valores médios do balanço hídrico (BH) e desvios padrões (DP) na escala de 16 dias ao longo do ano no período de 2007 a 2021, para os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) dentro do SEALBA, em termos de dias julianos (DJ).

Para o bioma FA, os valores positivos mais elevados de 61 mm de BH na escala de 16 dias, ocorrem sob elevados valores de P de 62 mm com uma ET correspondente de 31 mm em maio (DJ 129-144). Os mais negativos, chegando a -21 mm, acontecem em setembro (DJ 257-272), com P de 21 mm e ET de 42 mm. Na escala anual, BH para o bioma FA é de 164 mm. Os períodos com máximos e mínimos valores para o bioma CT são também respectivamente em maio (DJ 129-144), com BH de 55 mm sob P de 80 mm e ET de 25 mm, e setembro (DJ 257-272), com BH de -16 mm sob P de 18 mm e ET de 34 mm. Na escala anual, o bioma CT com BH de 168 mm, tem uma disponibilidade de água ligeiramente maior que para o bioma FA, com diferença de 2%, devido ao fato de que em FA, mesmo que aconteça maiores quantidades de chuvas, as taxas da ET são mais elevadas. Deve-se considerar que o bioma CT no Brasil, cobrindo uma maior área sob condições mais secas, é bem maior que a porção que ocupa no SEALBA, onde envolve áreas de transição com o bioma FA.

Elevadas quantidades de chuvas em conjunto com baixas transferências de vapor d'água, concentram os valores positivos de BH entre março e agosto (DJ 081-224) em ambos os biomas, FA e CT, dentro do SEALBA, condição favorável para agricultura de sequeiro. Entretanto, do final de junho para a segunda metade de dezembro (DJ 209-265) ocorrem os valores negativos de BH, o que indica necessidade de irrigação para os estágios críticos das culturas agrícolas. Os maiores e menores valores da ET são explicados respectivamente pelas maiores e menores quantidades de chuvas, mas quando a umidade na zona das raízes não é um fator limitante, como no meio do ano, as largas taxas da ET no bioma CT quando comparadas com aquelas para FA, podem ser devidas a uma maior energia disponível (SENEVIRATNE *et al.*, 2010), desde que nesse período, nenhum dos biomas estão sob condições de escassez hídrica dentro da região do SEALBA.

4. CONCLUSÕES

Foi demonstrada a viabilidade de aplicação do algoritmo SAFER com o produto reflectância MODIS MOD13Q1 em conjunto com dados climáticos interpolados para o monitoramento dos componentes do balanço hídrico em regiões de crescimento agrícola com biomas distintos, tomando-se a região do SEALBA como referência. Tanto para os biomas Floresta Atlântica (FA) como

Caatinga (CT) nessa região, há irregularidade na distribuição das chuvas ao longo do ano, entretanto, maiores precipitações ocorrem em FA quando comparadas com CT. De acordo com os valores de desvio padrão (DP), FA apresenta maiores variações espaciais e temporais nas chuvas do que CT. Como para as precipitações, grandes variações espaciais e temporais também ocorrem nas taxas de evapotranspiração em ambos os biomas ao longo do ano, mas com valores menores para CT que representam 79% daqueles para FA.

Fazendo a contabilidade entre a precipitação e a evapotranspiração atual dentro do SEALBA, na escala anual o bioma CT tem 2% a mais de água da chuva disponível com relação a FA. Mesmo que este último bioma tenha maiores quantidades de chuvas, suas elevadas taxas de evapotranspiração reduzem o balanço hídrico anual. Entretanto deve-se considerar que o bioma CT no Brasil cobre áreas secas bem maiores que aquelas nos limites do SEALBA, onde envolve regiões de transição entre os biomas FA e CT. Através do balanço hídrico, ficou evidenciado que as melhores condições hídricas são de abril a setembro em ambos os biomas, sendo este período recomendado para a agricultura de sequeiro. Por outro lado, pelos valores negativos do balanço hídrico no período de junho a dezembro, recomenda-se o uso de irrigação suplementar nos estágios críticos das culturas agrícolas.

Embora a modelagem tendo sido testada em uma região específica, a aplicabilidade do uso conjunto de imagens de satélites e dados climáticos interpolados apresenta grande potencial para implementação de um sistema de monitoramento operacional dos componentes do balanço hídrico em larga escala, com possibilidade de replicações dos métodos em quaisquer condições ambientais após possíveis necessidades de calibrações das equações de regressão.

REFERÊNCIAS

BEUCHLE, R.; GRECCHI, R.C.; SHIMABUKURO, Y.E.; SELIGER, R.; EVA, H.D.; SANO, E., ACHARD, F. (2015). “*Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach*”. Applied Geography 58, PP. 116-127.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. 2023. Disponível em <<https://www.sosma.org.br/conheca/mata-atlantica/>>. Acesso em: 24 de jan de 2023.

MARQUES, T.V.; MENDES, K; MUTTI. P.; MEDEIROS, S.; SILVA, L.; PEREZ-MARIN, A.M.; CAMPOS, S.; LÚCIO, P.S.; LIMA, K.; REIS, J. dos; RAMOS, T.M.; SILVA, D.F. da; OLIVEIRA, C.P.; COSTA, G.B.; ANTONINO, A.C.D.; MENEZES, R.S.C.; SANTOS e SILVA, C.M., BEZERRA, B. (2020). “*Environmental and biophysical controls of evapotranspiration from Seasonally Dry Tropical Forests (Caatinga) in the Brazilian Semiarid*”. Agricultural and Forest Meteorology 287, pp. 107957.

NYOLEI, D.; NSAALI, M.; MINAYA, V.; van GRIENSVEN, A.; MBILINYI, B.; DIELS, J.H.; KAHIMBA, F. (2019). “*High resolution mapping of agricultural water productivity using SEBAL in a cultivated African catchment, Tanzania*”. Physics and Chemistry of the Earth 112, pp. 36–39.

OLIVEIRA, M.L.; SANTOS, C.A.C. dos; OLIVEIRA, G. DE; SILVA, M.T.; SILVA, B.B. da; CUNHA, J.E.B.L.; RUHOFF, A.; SANTOS, C.A.G. (2022). “*Remote sensing-based assessment of land degradation and drought impacts over terrestrial ecosystems in Northeastern Brazil*”. Science of the Total Environment 835, pp. 155490, 2022.

PEREIRA, D.R.; MELLO, C.R. de; SILVA, A.M. da; YANAGI, S.N.M. (2010). “*Evapotranspiration and estimation of aerodynamic and stomatal conductance in a fragment of Atlantic Forest in Mantiqueira range region*”. MG. *Cerne* 16, pp. 32–40.

RODRIGUES, A.F.; MELLO, C.R. de; TERRA, M.C.N.S.; BESKOW, S. (2021). “*Water balance of an Atlantic Forest remnant under a prolonged drought period*”. *Ciência Agrotecnica* 45, pp. e008421.

SENEVIRATNE, S.I.; CORTI, T.; DAVIN, E.L.; HIRSCHI, M.; JAEGER, E.B.; LEHNER, I.; ORLOWSKY, B.; TEULING, A.J. (2010). “*Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review*”. *Earth Science Review* 99, pp. 125–161.

SILVA, P. F. da; LIMA, J.R. de S; ANTONINO, A.C.D.; SOUZA, R.; SOUZA, E.S. de; SILVA, J.R.I.; ALVES, E.M. (2017). “*Seasonal patterns of carbon dioxide, water, and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil*”. *Journal of Arid Environments* 147, pp. 71–82.

TEIXEIRA, A.H. de C (2010). “*Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco River basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation*”. *Remote Sensing* 2, pp. 1287–1319.

TEIXEIRA, A.H. de C; BASTIAANSEN, W.G.M.; AHMAD, M.D.; MOURA, M.S.B.; BOS., M.G. (2008). “*Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil*”. *Journal of Hydrology* 362, pp. 110–127.

TEIXEIRA A.H. de C.; TAKEMURA, C.M.; LEIVAS, J.F.; PACHECO, E.P.; BAYMA-SILVA, G.; GARÇON, E.A.M. (2020). “*Water productivity monitoring by using geotechnological tools in contrasting social and environmental conditions: Applications in the São Francisco River basin, Brazil*”. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 18, pp. 100296.

WAGLE, P.; BHATTARAI, N.; GOWDA, P.H.; KAKANI, V.G. (2017). “*Performance of five surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in high biomass sorghum*”. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 128, pp. 192–203.

YANG, Y.; GUAN, H.; BATELAAN, O.; MCVICAR, T. R.; LONG, D.; PIAO, S.; LIANG, W.; LIU, B.; JIN, Z.; SIMMONS, C.T. (2016). “*Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems*”. *Scientific Reports* 6, pp. 1-8.

ZHANG, L; QIAO, N.; HUANG, C.; WANG, S. (2019). “*Monitoring drought effects on vegetation productivity using satellite solar-induced chlorophyll fluorescence*”. *Remote Sensing* 11, pp. 1-18.

AGRADECIMENTOS - À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida para o mestrado do primeiro autor, a qual foi fundamental para viabilizar essa pesquisa e contribuir para o avanço do conhecimento na área de aplicação do sensoriamento remoto nos recursos hídricos.