

## PARÂMETROS DO BALANÇO HÍDRICO ESTIMADOS VIA SENSORIAMENTO REMOTO EM BACIA HIDROGRÁFICA DO SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO

Frederico Abraão Costa Lins<sup>1</sup>, Jhon Lennon Bezerra da Silva<sup>1</sup>, Abelardo Antônio de Assunção Montenegro<sup>2</sup>, Thayná Alice Brito Almeida<sup>3</sup>, Geber Barbosa de Albuquerque Moura<sup>2</sup>, Pedro Henrique Dias Batista<sup>1</sup>

**RESUMO:** Objetivou-se monitorar e avaliar a distribuição espacial de parâmetros do balanço hídrico à superfície como, a umidade do solo, o índice de área foliar (IAF) e a evapotranspiração utilizando imagens de satélite. A área de estudo é a bacia hidrográfica do Alto Ipanema, Pernambuco. As imagens orbitais do satélite Landsat-8 foram processadas, e os índices biofísicos foram determinados pelo *Surface Energy Balance Algorithms for Land* (SEBAL). Foram gerados mapas temáticos de umidade, IAF e da evapotranspiração da bacia hidrográfica. Os resultados apontaram altos valores do IAF, detectados nas altitudes mais elevadas e quando observado volumes de chuva antecedente à passagem do satélite, chegando a  $6,00 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ . Esse comportamento também favoreceu ao aumento da umidade do solo, com valores de até 1,00. A maior temperatura e a precipitação antecedente ao 21/08/2019, favoreceu ao incremento da evapotranspiração. O sensoriamento remoto permitiu estimar parâmetros do balanço hídrico na bacia hidrográfica do Alto Ipanema.

**PALAVRAS-CHAVE:** umidade do solo, IAF, evapotranspiração.

## WATER BALANCE PARAMETERS ESTIMATED BY REMOTE SENSING IN A PERNAMBUCO SEMIARID HYDROGRAPHY BASIN

**ABSTRACT:** This study aimed to monitor and evaluate the spatial distribution of surface water balance parameters such as soil moisture, leaf area index (LAI) and evapotranspiration using satellite images. The study area is the Alto Ipanema hydrography basin, Pernambuco.

<sup>1</sup> Mestre em Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFRPE, Departamento de Engenharia Agrícola. Av. D. Manoel de Medeiros, SN; Dois Irmãos, Recife, PE; CEP: 52171-900. E-mail: frederico.lins@ufrpe.br; jhonlennoigt@hotmail.com

<sup>2</sup> Professor titular, Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFRPE, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, PE. E-mail: montenegro.ufrpe@gmail.com; geber.moura@ufrpe.br

<sup>3</sup> Mestranda em Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFRPE, Departamento de Engenharia Agrícola. Recife, PE; E-mail: thayna\_tau@hotmail.com

\* O presente trabalho foi realizado com apoio da CAPES - Código de Financiamento 001; FACEPE e CNPq.

The orbital images of the Landsat-8 satellite were processed and the biophysical indices were determined by the Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL). Thematic maps of moisture, IAF and evapotranspiration of the watershed were generated. The results showed high IAF values, detected in the higher altitudes and when observed rainfall volumes prior to the passage of the satellite, reaching  $6.00 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ . This behavior also favored the increase of soil moisture, with values up to 1.00. The higher temperature and precipitation preceding the imaging day (08/21/2019) favored the increase of evapotranspiration. Remote sensing was able to estimate water balance parameters in the Alto Ipanema basin.

**KEYWORDS:** soil moisture, LAI, evapotranspiration.

## INTRODUÇÃO

As bacias hidrográficas compreendem as principais unidades para gestão, planejamento e manejo dos recursos hídricos, pois sabe-se que a disponibilidade hídrica afeta diretamente o desenvolvimento de uma região. Dessa forma, o monitoramento de bacias hidrográficas é ainda mais relevante em regiões semiáridas, onde há uma grande escassez de recursos hídricos.

O geoprocessamento e as técnicas de sensoriamento remoto têm sido ferramentas de grande utilidade no fornecimento de informações para o gerenciamento dos recursos hídricos através de métodos indiretos de avaliação de variáveis biofísicas à superfície terrestre. As técnicas de modelagem incrementam confiabilidade dos balanços hídricos e de energia.

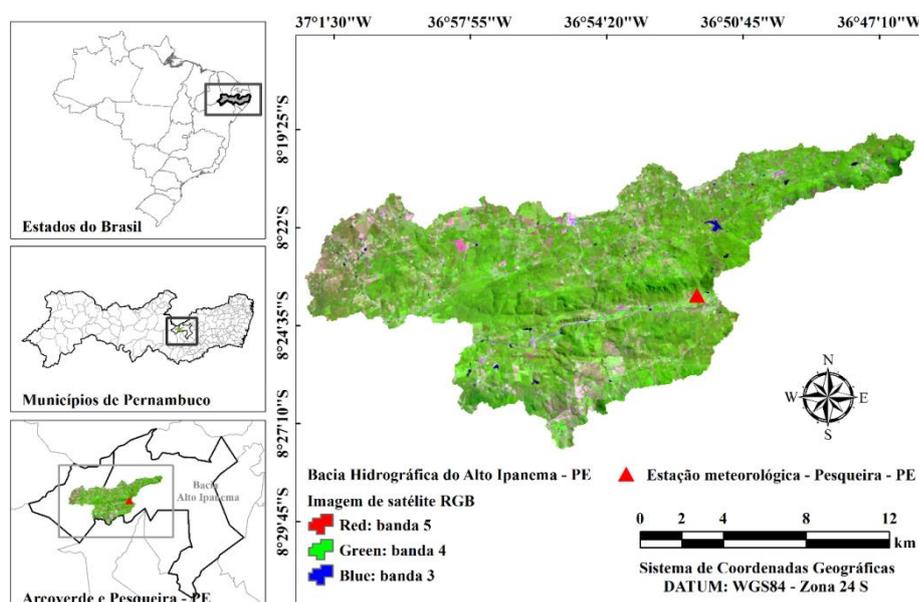
A modelagem espaço-temporal por sensoriamento remoto pode suprir necessidades importantes no fornecimento de dados do ambiente natural de uma bacia hidrográfica, como também sobre a agricultura destas regiões, melhorando inclusive os sistemas produtivos. Em destaque, pode-se obter parâmetros como a cobertura vegetal, evapotranspiração e umidade sobre os diversos usos e ocupações do solo de uma bacia.

Lins et al. (2017) destacaram que a evapotranspiração real está diretamente associada à capacidade da vegetação em absorver a umidade do solo por meio das raízes e perdê-la principalmente via foliar para atmosfera. Silva et al. (2015) destacam a umidade do solo como variável indispensável para o entendimento de processos hidrológicos e naturais no tempo e no espaço, e citam a importância do monitoramento e a modelagem desta no subsídio para ações de manejo e conservação do solo. Tal qual a umidade é influenciada diretamente pelo tipo de cobertura do solo.

Neste contexto, objetivou-se monitorar e avaliar a distribuição espacial de parâmetros do balanço hídrico à superfície como, a umidade relativa do solo, o índice de área foliar e a evapotranspiração real diária nos diferentes usos do solo de uma bacia hidrográfica do semiárido brasileiro, com o uso do geoprocessamento e técnicas de sensoriamento remoto.

## MATERIAL E MÉTODOS

A área do presente estudo é a bacia hidrográfica do Alto Ipanema (Figura 1), localizada nas seguintes coordenadas, entre os paralelos de 08° 20' S e 08° 30' S, e entre os meridianos de 36° 47' W e 37° 01' W, com altitude variando entre 600 e 1.000 m. A bacia Alto Ipanema está situada, mais especificamente, dentre os municípios de Arcoverde e Pesqueira, Pernambuco, regiões semiáridas do Nordeste brasileiro. De acordo com Santos et al. (2011), a bacia possui uma precipitação média anual de 607 mm, temperatura média de 23 °C e evapotranspiração potencial próxima de 2.000 mm ano<sup>-1</sup>. A vegetação predominante na região é a Caatinga hipoxerófila (Montenegro & Montenegro, 2006).



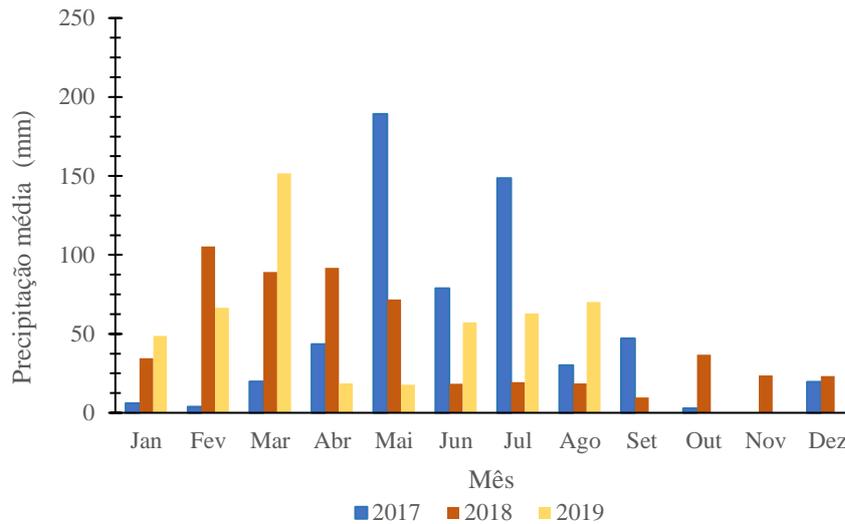
**Figura 1.** Mapa de localização espacial da área de estudo, bacia hidrográfica do Alto Ipanema, Pernambuco, Brasil. Imagem do satélite Landsat-8 OLI de resolução espacial de 30 m, apresentada em falsa cor, bandas multiespectrais 5; 4 e 3, imageada no dia 21/08/2019.

Os dados meteorológicos de superfície foram coletados pela estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Tabela 1), localizada na própria área de estudo. Temperatura ( $T_{ar}$ , °C), umidade relativa (UR, %), pressão atmosférica do ar ( $P_o$ , kPa),

velocidade do vento a 10 metros de altura ( $u_{10m}$ ,  $m s^{-1}$ ), ambos instantâneos. Também foi coletado a radiação solar global, média diária ( $R_{s\ 24h}$ ,  $W m^{-2}$ ) e a precipitação pluviométrica média (mm, Figura 2).

**Tabela 1.** Dados meteorológicas de superfície no horário da passagem do satélite Landsat-8.

Data	Horário	$T_{ar}$ (°C)	UR (%)	$P_o$ (kPa)	$u_{10m}$ ( $m s^{-1}$ )	$R_{s\ 24h}$ , $W m^{-2}$ )
15/08/2017	09h35min	20,14	79,08	94,02	1,60	187,50
21/08/2019	09h35min	23,25	62,00	93,60	3,70	260,35



**Figura 2.** Precipitação média mensal para a bacia hidrográfica do Alto Ipanema, entre os anos de 2017 e 2019.

O presente estudo foi desenvolvido por meio de duas imagens do satélite Landsat-8 de sensores OLI/TIRS (*Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor*). As imagens foram fornecidas pela base de dados espacial da NASA/USGS (*National Aeronautics and Space Administration/United States Geological Survey*). Foi realizado o processamento digital pelo *Surface Energy Balance Algorithms for Land* (SEBAL). O SEBAL utiliza-se de um procedimento numérico iterativo através das bandas multiespectrais. A partir deste sistema de modelagem espaço-temporal determinou-se os mapas temáticos dos índices biofísicos à superfície terrestre. Foi necessário converter os níveis de cinza das bandas multiespectrais em radiância e refletância através de coeficientes de calibração disponibilizados pela NASA/USGS. Em cada banda do Landsat-8 OLI foi determinada a radiância espectral de acordo com a Equação 1 (Chander et al., 2009).

$$L_b = Add_{rad} + Mult_{rad} \times ND_b \quad (1)$$

em que,  $L_b$  - radiância espectral ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ), baseada nos termos aditivo ( $Add_{rad}$ ) e multiplicativo ( $Mult_{rad}$ ) (NASAUSGS); ND - intensidade do pixel (número digital entre 0 e 65.535 níveis de cinza, alto nível de detalhamento da imagem).

Deste mesmo modo, também, foi determinada a refletância monocromática para cada banda do Landsat-8 OLI de acordo com a Equação 2 (Chander et al., 2009).

$$r_b = \frac{(Add_{ref} + Mult_{ref} \times ND_b)}{\cos \theta \times d_r} \quad (2)$$

em que,  $r_b$  - refletância monocromática ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ), baseada nos termos aditivo ( $Add_{ref}$ ) e multiplicativo ( $Mult_{ref}$ ) (NASA/USGS);  $\theta$  - ângulo zenital solar, fornecido pela NASA/USGS;  $d_r$  - quadrado da razão entre as distâncias média e instantânea entre a Terra e o Sol em dado dia do ano imageado (Iqbal, 1983).

A partir da imagem de refletância do Landsat-8 determinou-se o índice de área foliar (IAF,  $m^2 m^{-2}$ ) de acordo com a Equação 3 (Allen et al., 2007).

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (3)$$

O fluxo de calor sensível (H) ( $W m^{-2}$ ) é a etapa cerne do algoritmo SEBAL, para o seu processamento é necessário o conhecimento dos chamados pixels frio e quente na área de estudo. Baseado na velocidade do vento e na temperatura da superfície ( $T_s$ ), o fluxo de calor sensível foi estimado usando uma calibração interna da diferença da temperatura entre dois níveis da superfície de acordo com a Equação 4 (Bastiaanssen, 2000).

$$H = \rho \times c_p \frac{(a + b \times T_s)}{r_{ah}} \quad (4)$$

em que,  $\rho$  - massa específica do ar ( $kg m^{-3}$ );  $c_p$  - calor específico do ar, com pressão constante ( $1004 J kg^{-1} K^{-1}$ ); “a” e “b” - constantes de calibração da diferença de temperatura entre duas alturas.

A partir da fração evaporativa instantânea (Equação 5), aproximadamente igual a fração evaporativa diária ( $FE_{24h}$ ), foi determinado a umidade relativa do solo ( $\theta/\theta_{sat}$ ) (Equação 6),

que é o comportamento da umidade do solo em toda zona radicular nos diferentes manejos do solo na bacia hidrográfica (Bastiaanssen, 2000; Scott et al., 2003).

$$FE_{inst.} = \left( \frac{LE}{R_n - G} \right) \Rightarrow FE_{24h} = \frac{LE_{24h}}{R_n 24h} \quad (5)$$

em que,  $FE_{inst.}$  - fração evaporativa;  $LE$  - fluxo de calor latente instantâneo e diário ( $W m^{-2}$ );  $R_n$  - saldo de radiação instantâneo e diário ( $W m^{-2}$ );  $G$  - fluxo de calor no solo ( $W m^{-2}$ ).

O valor da umidade relativa do solo varia entre “0” (solo seco) e “1” (solo saturado). Scott et al. (2003) desenvolveram uma padronização da umidade do solo ( $\theta$ ) com umidade saturada do solo ( $\theta_{sat}$ ), podendo ser aplicada de forma direta, sem modificação e calibração a uma extensa gama de solos.

$$\theta/\theta_{sat} = e^{[(FE_{inst.} - 1,0)/0,421]} \quad (6)$$

Também, como produto final do presente estudo foi estimada para a bacia hidrográfica do Alto Ipanema a evapotranspiração real diária ( $ET_r$  diária), que foi determinada de acordo com a Equação 7 (Bastiaanssen, 2000).

$$ET_r \text{ diária} = \frac{86400 \times FE_{inst.} \times R_n 24h}{2450000} \quad (7)$$

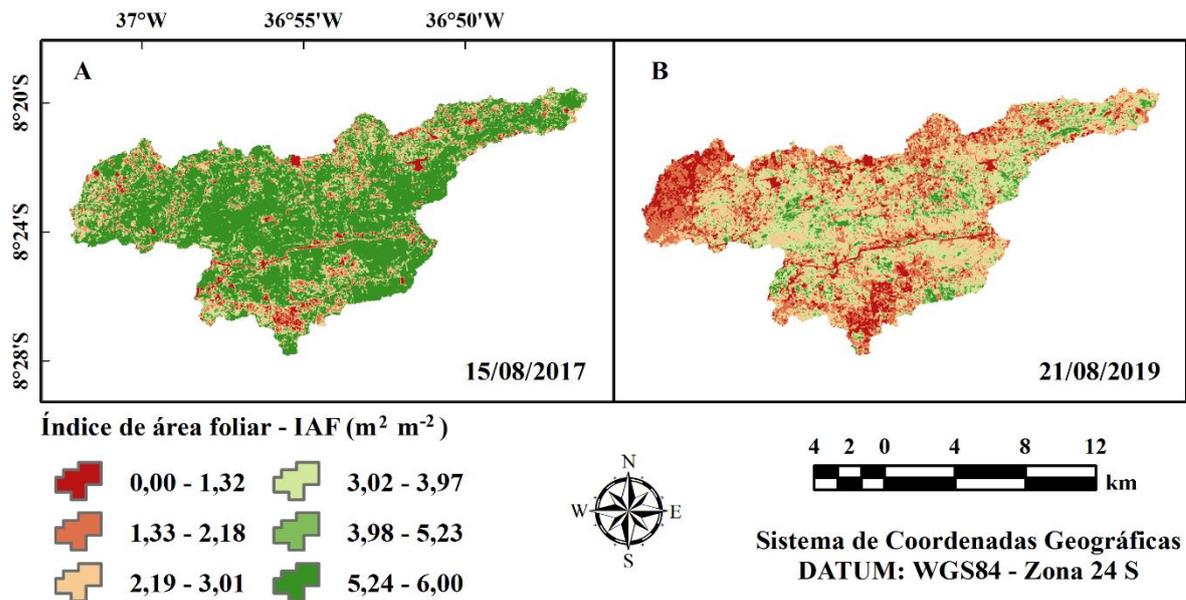
em que, os valores 86400 e 2450000 correspondem a transformação do  $LE$  em  $mm \text{ dia}^{-1}$ .

Os resultados dos mapas temáticos foram submetidos a avaliação estatística, por medidas de tendência central (média) e dispersão (mínimo, máximo, desvio padrão - DP e coeficiente de variação - CV). Também foi avaliado a variabilidade espaço-temporal dos mapas temáticos de acordo com os critérios de Warrick & Nielsen (1980): baixa variabilidade –  $CV < 12\%$ ; média variabilidade –  $12 < CV < 60\%$  e alta variabilidade –  $CV > 60\%$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

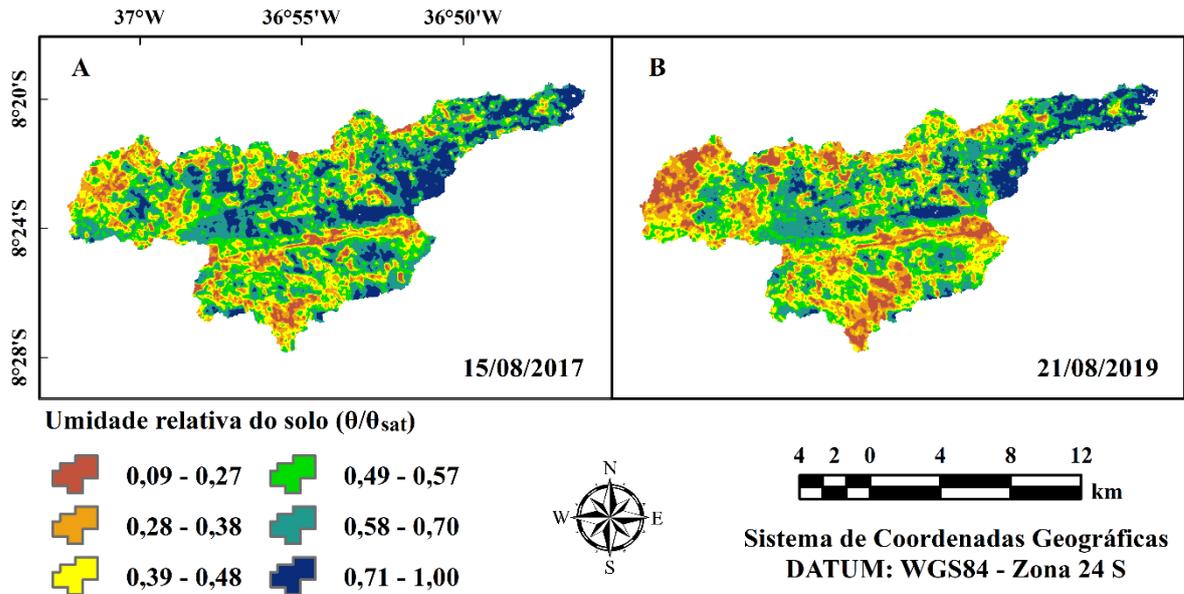
Na Figura 3 está ilustrado o mapa temático da distribuição espacial do índice de área foliar (IAF) na bacia do Alto Ipanema nos dias 15/08/2017 e 21/08/2019, variando entre os valores de 0,00 e 6,00  $m^2 m^{-2}$ . A bacia destaca em sua caracterização espacial uma vegetação de Caatinga densa, rala e intermediária. Apresentando também áreas de solo exposto com valores de IAF em zero. A imagem do dia 15/08/2017 (Figura 3A) apresentou alto índice

vegetativo em boa parte da bacia, influenciado pela precipitação antecedente do trimestre anterior (Figura 2), o que contribuiu com o incremento de umidade do solo, consequentemente a formação da biomassa vegetal. Por outro lado, o dia 21/08/2019 (Figura 3B) mostrou-se afetado pelas baixas precipitações na região, conforme ilustrado no gráfico da precipitação média da Figura 2, onde o trimestre anterior proporcionou menores volumes de chuvas, ressaltando que o ano de 2018 também teve baixas precipitações quando comparado aos demais. Nesse contexto, explica-se a menor capacidade de recuperação e formação do dossel foliar da vegetação de Caatínca da Figura 3B.



**Figura 3.** Distribuição espacial do índice de área foliar na bacia hidrográfica do Alto Ipanema, nos dias de imageamento: 15/08/2015 (A) e 21/08/2019 (B).

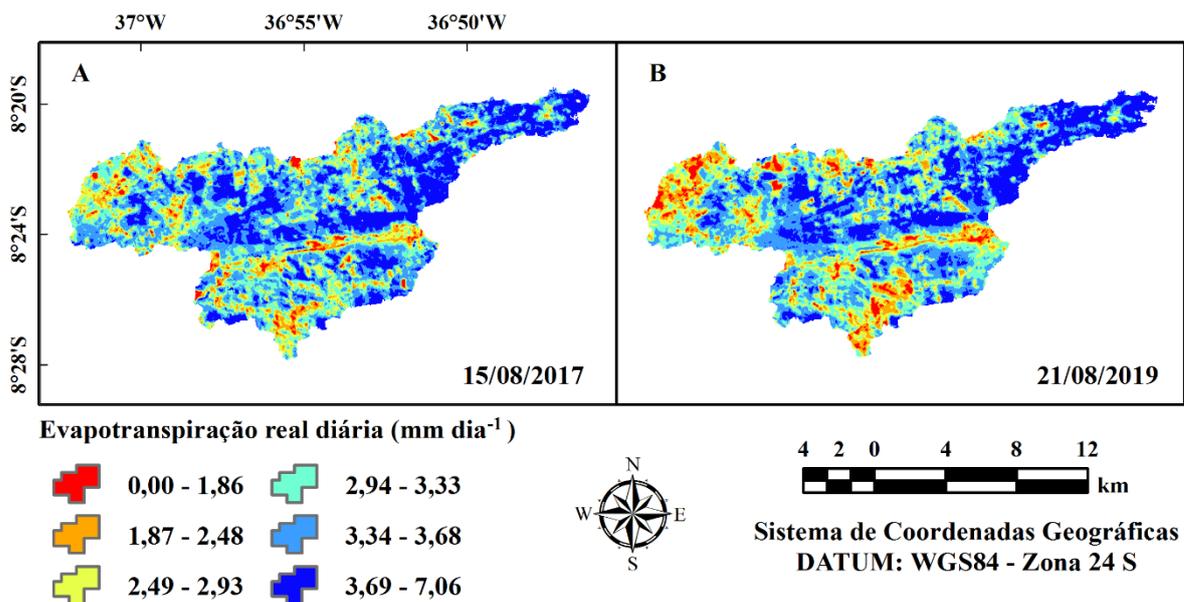
Na Figura 4 está ilustrado o mapa temático da distribuição espacial da umidade relativa do solo na bacia hidrográfica do Alto Ipanema nos dias 15/08/2017 e 21/08/2019, com valores entre 0,00 e 1,00. A presença expressiva da cobertura vegetal da imagem do dia 15/08/2017 já favorecida pelas precipitações antecedentes, influenciou diretamente a umidade do solo, com incremento nos seus valores (Figura 4A).



**Figura 4.** Distribuição espacial da umidade relativa do solo na bacia hidrográfica do Alto Ipanema, nos dias de imageamento: 15/08/2015 (A) e 21/08/2019 (B).

A imagem do dia 21/08/2019 (Figura 4B) apresentou comportamento diretamente proporcional ao mapa do IAF. Com a redução da precipitação na bacia, no trimestre anterior, a cobertura vegetal foi menos resiliente (redução das atividades fotossintéticas), destacando assim baixos valores do IAF, favorecendo principalmente a diminuição da umidade do solo.

Na Figura 5 está ilustrado o mapa temático da distribuição espacial da evapotranspiração real diária na bacia hidrográfica do Alto Ipanema nos dias 15/08/2017 e 21/08/2019, com valores entre 0,00 e 7,06 mm dia<sup>-1</sup>.



**Figura 5.** Distribuição espacial da evapotranspiração real diária na bacia hidrográfica do Alto Ipanema, nos dias de imageamento: 15/08/2015 (A) e 21/08/2019 (B).

Percebe-se que o mapa da  $ET_r$  diária não seguiu o padrão de comportamento dos mapas do IAF e da umidade. Apesar da maior precipitação antecedente do trimestre anterior, o dia 15/08/2017 (Figura 5A) apresentou uma média da  $ET_r$  diária, em geral, abaixo do dia 21/08/2019 (Figura 5B). Este comportamento está associado diretamente com a maior temperatura (Tabela 1) e a maior precipitação próxima a passagem do satélite, que foi observada justamente para o dia 21/08/2019 que teve a maior evapotranspiração média diária, no valor de 4,66 (Tabela 2). Na Tabela 2 apresenta-se a avaliação estatística da análise quantitativa dos índices biofísicas do balanço hídrico do Alto Ipanema. Os mapas temáticos apresentaram um padrão de comportamento espacial de média variabilidade, conforme valores do CV (16,20 a 45,99%).

**Tabela 2.** Parâmetros estatísticos dos índices biofísicas do balanço hídrico na bacia hidrográfica do Alto Ipanema.

Data da imagem	Umidade relativa do solo ( $\theta/\theta_{sat}$ )				
	Mínima	Máxima	Média	DP	CV (%)
15/08/2017	0,00	5,98	4,71	1,76	37,37
21/08/2019	0,00	6,00	2,37	1,09	45,99
Data da imagem	Umidade relativa do solo ( $\theta/\theta_{sat}$ )				
	Mínima	Máxima	Média	DP	CV (%)
15/08/2017	0,09	0,99	0,66	0,14	21,21
21/08/2019	0,10	1,00	0,61	0,17	27,86
Data da imagem	Evapotranspiração real diária ( $ET_r$ 24h)				
	Mínima	Máxima	Média	DP	CV (%)
15/08/2017	0,00	4,80	3,27	0,53	16,20
21/08/2019	0,17	7,06	4,66	0,93	19,95

DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação.

A análise quantitativa (Tabela 2) e espacial (Figuras 3, 4 e 5) dos parâmetros do balanço hídrico destacaram o padrão de comportamento característico da Caatinga na bacia hidrográfica do Alto Ipanema. Os resultados mostraram que as regiões do semiárido brasileiro possui comportamento peculiar, em resposta, principalmente, à presença e/ou ausência dos eventos de chuvas. A vegetação de Caatinga respondeu proporcionalmente à precipitação, corroborando com a pesquisa de Campos et al. (2019), que estudaram o balanço de energia à superfície de uma área preservada com cobertura vegetal de Caatinga no semiárido brasileiro, e observaram durante os eventos de chuva o aumento da produtividade da biomassa vegetal. Menezes et al. (2013) estudando a dinâmica da umidade do solo em uma sub-bacia do semiárido brasileiro, destacaram que a umidade não é recuperada na ocorrência das primeiras chuvas após período de seca, quando se tem alto déficit hídrico.

## CONCLUSÕES

O sensoriamento remoto permitiu realizar o monitoramento espacial da bacia hidrográfica do Alto Ipanema, destacando a dinâmica e o padrão de comportamento dos parâmetros biofísicos do balanço hídrico, que foram influenciados pela precipitação e temperatura.

Os padrões de comportamento e distribuição dos mapas temáticos da umidade relativa do solo associou-se diretamente aos padrões do índice de área foliar, ambos diretamente relacionados com a ausência e/ou presença da precipitação na bacia hidrográfica.

A evapotranspiração real diária teve respostas diretamente influenciadas pela variação da temperatura e a precipitação próxima a passagem do satélite.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) – Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, p. 380-394, 2007.

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of hydrology**, v. 229, p. 87-100, 2000.

CAMPOS, S.; MENDES, K. R.; SILVA, L. L.; MUTTI, P. R.; MEDEIROS, S. S.; AMORIM, L. B.; ... & LUCIO, P. S. Closure and partitioning of the energy balance in a preserved area of a Brazilian seasonally dry tropical forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 271, p. 398-412, 2019.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 893-903, 2009.

LINS, F. A. C.; SANTOS ARAÚJO, D. C.; SILVA, J. L. B.; LOPES, P. M. O.; OLIVEIRA, J. D. A.; SILVA, A. T. C. S. G. Estimativa de parâmetros biofísicos e evapotranspiração real no semiárido pernambucano utilizando sensoriamento remoto. **Irriga**, v. 1, p. 64-75, 2017.

MENEZES, J. A. L.; SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, J. R. L. Comportamento temporal da umidade do solo sob Caatinga e solo descoberto na Bacia

Experimental do Jatobá, Pernambuco. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 2, p. 45-51, 2013.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 30-37, 2006.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, D. D. Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo (TDR). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 670-679, 2011.

SCOTT, C. A.; BASTIAANSEN, W. G.; AHMAD, M. U. D. Mapping root zone soil moisture using remotely sensed optical imagery. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 129, p. 326-335, 2003.

SILVA, J. R. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTEIRO, A. L. N.; SILVA JÚNIOR, V. D. Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, p. 293-303, 2015.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL D, ed. **Applications of soil physics**. New York, Academic Press. 1980. 350p.