

## APLICAÇÃO DO ALGORITMO SAFER PARA MONITORAMENTO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NOS BIOMAS BRASILEIROS

Data de aceite: 01/07/2021

Data de submissão: 19/06/2021

**Antônio Heriberto de Castro Teixeira**

Universidade Federal de Sergipe (PRORH)  
São Cristóvão-SE  
<http://lattes.cnpq.br/9956312513672760>

**Janice Freitas Leivas**

Embrapa Territorial  
Campinas-SP  
<http://lattes.cnpq.br/6479273687148473>

**Celina Maki Takemura**

Embrapa Territorial  
Campinas-SP  
<http://lattes.cnpq.br/1249856748676359>

**Edlene Aparecida Monteiro Garçon**

Embrapa Territorial  
Campinas-SP  
<http://lattes.cnpq.br/3552453539628334>

**RESUMO:** O algoritmo SAFER (Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving) foi usado para análises da evapotranspiração atual (ET) em larga escala, nas diferentes regiões e biomas no Brasil, através da união de sensoriamento remoto e uma rede de estações meteorológicas, para o ano de 2016. Variações nos valores da ET entre as regiões e biomas foram fortemente detectadas, com taxas médias diárias trimestrais acima  $3,0 \text{ mm dia}^{-1}$  na região Sul, com os limites superiores no bioma Pampa, e abaixo de  $1,5 \text{ mm dia}^{-1}$  na região Nordeste, com limites inferiores

no bioma Caatinga. A modelagem com uso do produto reflectância do satélite MODIS em conjunto com dados climáticos interpolados apresentou aplicabilidade para monitoramento dos fluxos hídricos na escala espacial de 250 m sob distintas condições termo hídricas ao longo do ano.

**PALAVRAS-CHAVE:** Modelagem, geotecnologias, produção de biomassa, recursos hídricos.

### SAFER APPLICATION FOR EVAPOTRANSPIRATION MONITORING IN BRAZILIAN BIOMES

**ABSTRACT:** The SAFER (Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving) algorithm and the radiation use efficiency (RUE) model were coupled to test large-scale remote sensing environmental indices for monitoring water and vegetation conditions in distinct geographic regions and biomes of Brazil. For this task, MODIS reflectance products and gridded weather data were used involving different thermo-hydrological conditions of the year 2016. Variations of ET values among regions and biomes were strongly detected, with average quarterly rates above  $3.00 \text{ mm d}^{-1}$ , and below  $1.50$  in the South (S) and Northeast (NE) geographic regions, being these limits related to the Pampa (PP) and Caatinga biomes concentrated in S and NE, respectively. The large-scale modelling presented applicability for monitoring water and vegetation parameters at a 250-m spatial resolution under different Brazilian environmental conditions along a year.

**KEYWORDS:** Geotechnologies, evapotranspiration, biomass production, water balance.

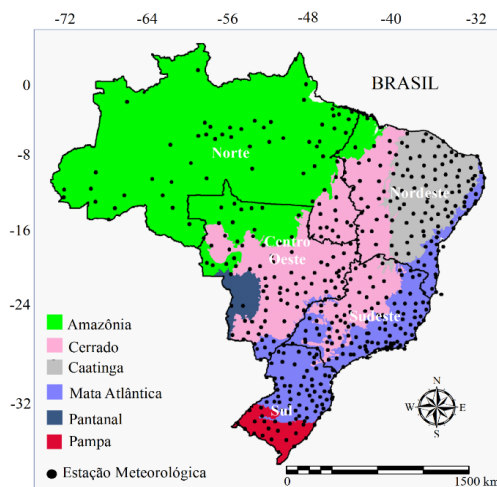
## INTRODUÇÃO

Em algumas regiões de países em desenvolvimento, como consequência das mudanças climáticas e de uso da terra, a demanda hídrica pode exceder o suprimento de água, e quando aumenta a poluição dos rios, maior escassez hídrica é esperada. Estas mudanças afetam as taxas da evapotranspiração atual (ET), o que deve ser considerado para uma exploração sustentável dos recursos hídricos (Teixeira et al., 2020).

O uso do sensoriamento remoto é um meio viável para determinação das taxas da ET. O algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) foi elaborado por Teixeira (2010) em região de Caatinga e posteriormente validados em diferentes biomas nas regiões brasileiros (Leivas et al., 2015a,b; Teixeira et al., 2014, 2015, 2020, Araujo et al., 2019). No trabalho corrente, aplicamos o SAFER com produtos MODIS e dados de uma rede de estações meteorológicas, para análises da ET nas regiões e biomas brasileiros. O sucesso desta aplicação além de útil para as políticas de nacionais, tem potencial de uso em outros países, necessitando, provavelmente, de apenas calibrações nas equações de regressão.

## MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta a localização das 491 estações meteorológicas usadas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET – [www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br)), em conjunto com parâmetros obtidos por sensoriamento remoto, com detalhes para as regiões e biomas do Brasil.



Os dados climáticos foram interpolados pelo método “movimento da média” e usados para o cálculo da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) pelo método de Penman-Monteith

(Allen et al., 1998). Foram usadas as reflectâncias das bandas 1 e 2 do produto MOD13Q1, com resolução espacial de 250 m e temporal de 16 dias. Os valores de 16 dias foram agrupados para as análises trimestrais da ET nas diferentes regiões e biomas brasileiros.

Detalhes da modelagem pelo SAFER são apresentados por Teixeira et al. (2020), sendo aqui descritas apenas as equações principais.

Com o SAFER a razão da ET para a ET<sub>0</sub> é modelada como:

$$\frac{ET}{ET_0} = \exp \left[ a_{sf} + b_{sf} \left( \frac{T_0}{\alpha_0 \text{NDVI}} \right) \right] \frac{ET_{0\text{ano}}}{5} \quad (1)$$

onde  $T_0$  é a temperatura da superfície estimada como resíduo no balanço de radiação,  $\alpha_0$  é o albedo da superfície e NDVI é Índice da Diferença de Vegetação Normalizado, e  $a_{sf}$  e  $b_{sf}$  são os coeficientes de regressão originalmente encontrados para Caatinga e  $\frac{ET_{0\text{ano}}}{5}$  é um fator de correção, considerando a demanda atmosférica dos outros biomas, com o denominador 5 mm dia<sup>-1</sup> sendo a média diária da ET anual na ocasião da elaboração do algoritmo.

A Eq. 1 não funciona para corpos livres de água (NDVI < 0), então o conceito de evapotranspiração de equilíbrio – ET<sub>eq</sub> (Raupach, 2001) é introduzido no SAFER:

$$ET_{eq} = 0.035 \left( \frac{\Delta (R_n - G)}{\Delta + \gamma} \right) \quad (2)$$

em que  $\Delta$  é a inclinação da curava de relação entre a pressão de saturação do vapor e a temperatura média do ar ( $T_a$ ),  $R_n$  é o saldo de radiação obtido pela equação de Slob,  $G$  é o fluxo de calor no interior da superfície considerado como uma fração de  $R_n$ , e  $\gamma$  é a constante psicrométrica.

Através de funções condicionais aplicadas aos valores de NDVI, a ET foi então obtida:

$$ET = \frac{ET}{ET_0} ET_{024} \text{ ou } ET_{eq} \quad (3)$$

onde a razão  $\frac{ET}{ET_0}$  é modelada pela Eq. 1 e  $ET_{024}$  é a evapotranspiração de referência diária calculada.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 apresenta as médias trimestrais dos pixels para os parâmetros climáticos atuantes no processo de evapotranspiração em cada região do Brasil durante o ano de 2016.

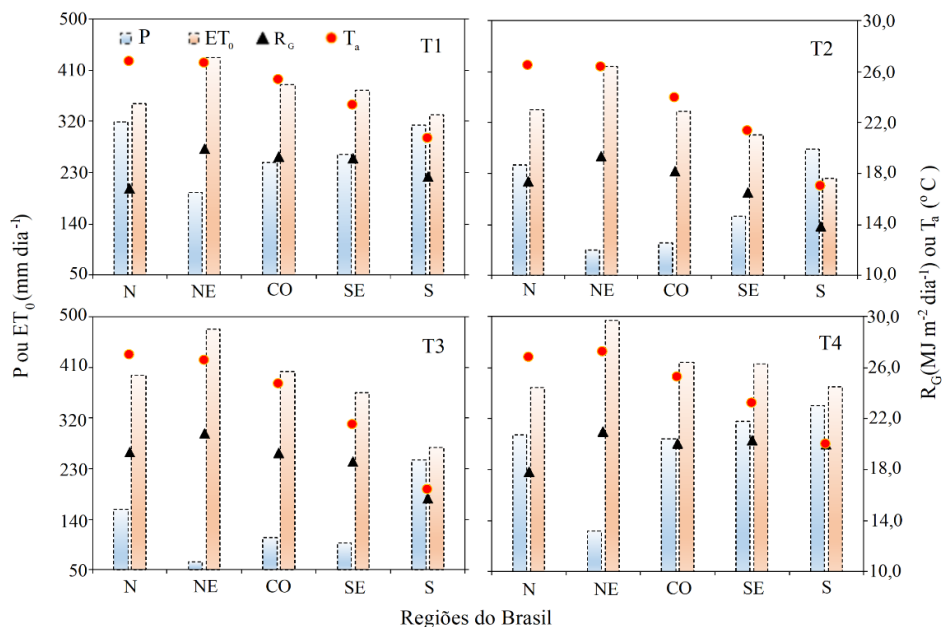


Figura 2 – Médias dos parâmetros climáticos trimestrais para cada região do Brasil, durante o ano de 2016. P – Totais de precipitação, ET<sub>0</sub> – Totais de evapotranspiração de referência; R<sub>G</sub> – Médias da radiação solar global incidente; T<sub>a</sub> – Médias da temperatura do ar.

As região mais chuvosa foi a Sul (S), com total trimestral (T) de P acima de 340 mm no quarto trimestre (T4), seguida da Norte (N), com 319 mm em T1, Sudeste (SE), com 315 mm em T4, Centro Oeste (CO), com 284 mm em T4, e Nordeste (NE), com 195 mm em T1. Esta última região apresentou as menores quantidade de chuvas, com limite da média de P inferior a 64 mm em T3. Os totais médios anuais variaram de 475 mm em NE para 1174 mm em S. Em geral, a demanda atmosférica não seguiu o comportamento das chuvas, sendo os valores máximos de ET<sub>0</sub> em T4 na região NE, quando a média trimestral ficou acima de 490 mm, mas com P atendendo apenas 25% da ET<sub>0</sub>. O valor trimestral médio inferior a 230 mm aconteceu na região S, com P representando 123% da ET<sub>0</sub>. Considerando os valores anuais de ET<sub>0</sub>, P atendeu de 26 a 98 % nas regiões NE e S, respectivamente.

Comportamentos distintos ao longo do ano também ocorreram entre R<sub>G</sub> e T<sub>a</sub>. Enquanto seus valores máximos na região NE ocorreram em T3 e T4, os mínimos na região S foram em T2 e T3, constatando-se claramente o tempo de atraso com relação ao aquecimento da superfície e do ar. Apesar das regiões N e NE apresentarem diferentes níveis de R<sub>G</sub>, com valores superiores em NE, os valores trimestrais de T<sub>a</sub> foram similares, consequência provável de diferenças no balanço de radiação entre seus respectivos biomas. Maiores níveis de R<sub>G</sub> foram para NE e SE, enquanto os menores foram para a região S. Com relação a T<sub>a</sub>, os maiores valores foram para N e NE. Os períodos em que ocorreram os limites superiores e inferiores desses parâmetros estão respectivamente

relacionados aos eventos de culminação do Sol e solstício de inverno nestas regiões.

A Figura 3 apresenta as distribuições espaciais da ET no Brasil, juntamente com suas médias e desvios padrões para cada região.

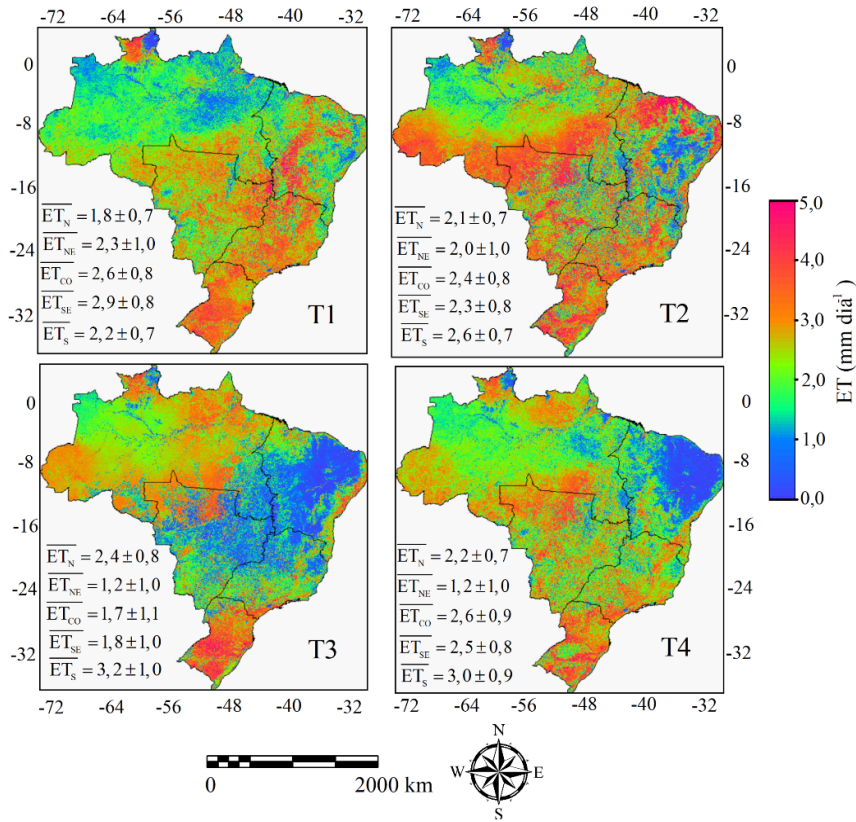


Figura 3 – Distribuições espaciais da evapotranspiração atual (ET) no Brasil, juntamente com os valores médios e desvios padrões para as regiões Norte (N), Nordeste (NE), Centro Oeste (CO), Sudeste (SE) e Sul (S).

As variações espaço-temporais nos valores da ET no Brasil são claras entre os trimestres e regiões. Os maiores valores para a região Norte (N) foram para o terceiro trimestre (T3), acima de 3,0 mm dia<sup>-1</sup>, enquanto os menores foram para o primeiro (T1), abaixo de 2,0 mm dia<sup>-1</sup>. Na região Nordeste (NE), as menores taxas foram registradas em T3 e T4, quando os valores ficaram abaixo de 1,5 mm dia<sup>-1</sup>, enquanto que as maiores ocorreram em T1, acima de 2,0 mm dia<sup>-1</sup>. Na região Centro Oeste (CO), os maiores valores da ET foram verificadas em T1 e T4, acima de 2,5 mm dia<sup>-1</sup>, e os menores foram em T3, com estes abaixo de 2,0 mm dia<sup>-1</sup>. No Sudeste (SE), as maiores taxas aconteceram em T1, acima de 2,5 mm dia<sup>-1</sup> e os menores em T3, abaixo de 2,0 mm dia<sup>-1</sup>. A região Sul (S) apresentou os maiores valores da ET, acima de 3,0 mm dia<sup>-1</sup> em T3 e T4, enquanto

os menores foram em T1, mas ainda com média acima de 2,0 mm dia<sup>-1</sup>. Os níveis da ET acompanharam a disponibilidade de água da chuva, independentemente da região considerada (ver também Fig. 2).

Separando-se as taxas da ET por bioma no Brasil, a Tabela 1 mostra as médias e desvios padrões para cada um deles, durante o ano de 2016.

| Trimestre/<br>Bioma   | T1<br>(mm dia <sup>-1</sup> ) | T2<br>(mm dia <sup>-1</sup> ) | T3<br>(mm dia <sup>-1</sup> ) | T4<br>(mm dia <sup>-1</sup> ) |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| <b>Amazônia</b>       | 1,9 ± 0,8                     | 2,2 ± 0,7                     | 2,4 ± 0,7                     | 2,3 ± 0,7                     |
| <b>Cerrado</b>        | 2,7 ± 0,9                     | 2,2 ± 0,9                     | 1,3 ± 0,9                     | 2,2 ± 0,9                     |
| <b>Pantanal</b>       | 2,2 ± 0,8                     | 2,3 ± 0,7                     | 1,9 ± 0,8                     | 2,4 ± 0,9                     |
| <b>Mata Atlântica</b> | 2,8 ± 0,8                     | 2,4 ± 0,8                     | 2,5 ± 1,1                     | 2,7 ± 0,9                     |
| <b>Caatinga</b>       | 2,4 ± 1,0                     | 1,9 ± 1,1                     | 0,8 ± 0,8                     | 0,8 ± 0,8                     |
| <b>Pampa</b>          | 3,2 ± 0,7                     | 2,6 ± 0,8                     | 3,2 ± 1,0                     | 3,0 ± 1,0                     |

Tabela 1 – Médias e desvios padrões para a evapotranspiração atual (ET) nos biomas brasileiros durante o ano de 2016.

Para o bioma amazônico, as maiores taxas da ET ocorreram em T3, enquanto as menores foram em T1, quando ficaram abaixo de 2,0 mm dia<sup>-1</sup>. Neste bioma, Leivas et al. (2015a) usando o SAFER com imagens RapidEye do mês de julho, obtiveram taxas da ET em torno de 3,2 mm.dia<sup>-1</sup> em área de floresta, enquanto nas áreas agrícolas, estas foram de 1,9 mm.dia<sup>-1</sup>, as quais estão dentro da faixa representada pela média e desvios padrão em T3 no estudo corrente.

No Cerrado, os limites superiores aconteceram em T1, enquanto os inferiores, abaixo de 1,5 mm dia<sup>-1</sup>, foram em T3. Neste bioma, Teixeira et al. (2014), usando o SAFER com imagens MODIS ao longo do ano de 2012, reportaram médias quinzenais da ET variando de 1,1 ± 0,5 mm dia<sup>-1</sup> em áreas sem cultivos agrícolas até 3,0 ± 1,1 mm dia<sup>-1</sup> em áreas com agricultura, abrangendo a faixa de valores para este bioma apresentada na Tabela 1.

No Pantanal, as taxas mais elevadas ocorreram em T4 e as mais baixas em T3, inferiores a 2,0 mm dia<sup>-1</sup>. Através de estudo de balanço de energia com imagens MODIS no Pantanal, Teixeira et al (2015), reportaram valores menores de ET em 2012, variando de 1,3 ± 0,4 mm dia<sup>-1</sup> a 1,7 ± 0,5 mm dia<sup>-1</sup>, entretanto as diferenças podem está relacionadas a distintas condições climáticas.

Na Mata Atlântica os valores médios da ET foram mais constantes ao longo do ano, em geral acima de 2,0 mm dia<sup>-1</sup>. Teixeira et al. (2020) encontraram valores médios diários variando de 1,6 a 2,5 mm dia<sup>-1</sup> para a Mata Atlântica, comparáveis com os obtidos no atual estudo.

Para o bioma Caatinga é que se constata maiores contrastes ao longo ano, com faixa da ET abaixo de 1,0 mm dia<sup>-1</sup> em T3 e T4, após o período de chuvas, e valores acima

de 2,0 mm dia<sup>-1</sup> durante a estação chuvosa. As espécies deste bioma respondem forte às precipitações. Araújo et al (2019), analisando uma série de 2010 a 2017, registraram uma variação nas taxas médias quinzenais da ET de 0,04 ± 0,23 mm dia<sup>-1</sup> a 3,15 ± 0,95 mm dia<sup>-1</sup> de acordo com as quantidades de chuvas.

Os maiores valores de ET foram para o bioma Pampa em T1, acima de 3,0 mm dia<sup>-1</sup>. Neste bioma, Leivas et al. (2015b) encontraram taxas médias da ET para a cultura do arroz entre 1,8 ± 0,8 mm dia<sup>-1</sup> a 2,3 ± 1,0 mm dia<sup>-1</sup>, inferiores as taxas da Tabela 1, mas específicos para a cultura.

A disponibilidade de chuvas causa variação dos biomas brasileiros, explicando os limites da ET entre as regiões Sul e Nordeste, onde se concentram respectivamente as espécies dos ecossistemas Pampa e Caatinga.

## CONCLUSÕES

Demonstramos a aplicabilidade do algoritmo SAFER com imagens de satélites para o monitoramento da evapotranspiração atual (ET) nos biomas brasileiros em cada região do Brasil. O uso da reflectância em produtos MODIS em conjunto com grades de dados climáticos diários sobressai-se como uma ferramenta eficiente para o monitoramento operacional dos fluxos hídricos ao longo do ano, na escala espacial de 250 m, com detalhamento suficiente para análises nos diferentes ecossistemas. A determinação da ET determinada nesta escala, associada à quantificação de outros dados hidrológicos, destaca-se com grande potencial para subsídio a políticas públicas relacionadas ao manejo e conservação dos recursos hídricos do Brasil, podendo a metodologia ser testada em outros países.

## REFERÊNCIAS

ARAUJO, L.M.; TEIXEIRA, A.H. de C.; BASSOI, L.H. (2019) “*Evapotranspiration and biomass modelling in the Pontal Sul Irrigation Scheme*”. International Journal of Remote Sensing 1, pp. 1 – 13.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998). “*Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements*”. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy.

LEIVAS, J.F.; TEIXEIRA, A.H. de C.; ANDRADE, R.G.; SILVA, G.B.; NOGUEIRA, S.F.; SPINELLI, L. (2015a). “*Aplicação do modelo agrometeorológico espectral SAFER e imagens RapidEye na FLONA Tapajós*”. In anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015, João Pessoa-PB, pp. 2552 – 2558.

LEIVAS, J.F.; TEIXEIRA, A.H. de C.; ANDRADE, R.G.; VICTORIA, D. de C.; SILVA, G.B.; BOLFE, E.L. (2015b). “*Application of agrometeorological spectral model in rice area in southern Brazil*”. Proceedings of SPIE 9637, pp.96372B-1 – 96372B-8.

RAUPASCH, M.R. (2001). “*Combination theory and equilibrium evaporation*”. Quarterly Journal of the

Royal Meteorological Society 127, pp. 1149-1181.

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.; VICTORIA, D. de C.; ANDRADE, R.G.; LEIVAS, J.F.; BOLFE, E.L.; CRUZ, C.R. (2014). “*Coupling MODIS images and agrometeorological data for agricultural water productivity analyses in the Mato Grosso state, Brazil*”. Proceedings of SPIE 9239, pp.92390W-1 – 92390W-14.

TEIXEIRA, A.H. de C.; PADOVANI, C.R.; ANDRADE, R.G.; LEIVAS, J.F.; VICTORIA, D. de C.; GALDINO, S. (2015). “*Use of MODIS Images to Quantify the Radiation and Energy Balances in the Brazilian Pantanal*”. Remote Sensing 7, pp.14597 – 14619, 2015.

TEIXEIRA, A.H. de C.; TAKEMURA, C.M.; LEIVAS, J.F.; PACHECO, E.P.; SILVA, G.B.; GARCON, 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. 1 – 9.