

SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO MANEJO DA IRRIGAÇÃO EM ÁREAS COM ESCASSEZ DE DADOS: ESTUDO DE CASO EM PIVÔ CENTRAL EM ITATINGA-SP*

PEDRO HENRIQUE JANDREICE MAGNONI¹; CÉSAR DE OLIVEIRA FERREIRA SILVA¹ E RODRIGO LILLA MANZIONE²

¹ Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Avenida Universitária, nº 3780, Altos do Paraíso, 18610-034, Botucatu, São Paulo, Brasil, pedrohjmagnoni@gmail.com; cesaroliveira.f.silva@gmail.com.

² Departamento de Engenharia de Biosistemas, Faculdade de Ciências e Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rua Domingos da Costa Lopes, 780, CEP 17602496, Tupã – SP, Brasil. E-mail: lilla.manzione@unesp.br.

*Este artigo é proveniente das dissertações de mestrado dos dois primeiros autores.

1 RESUMO

Ferramentas baseadas em sensoriamento remoto possibilitam o monitoramento do balanço hídrico da água em diferentes resoluções espaciais e temporais. Ainda assim, modelos que exigem dados in-situ impossibilitam sua aplicação em áreas com escassez de dados. No sentido de lidar com esse desafio, o presente trabalho apresenta uma abordagem de escolha do momento de irrigar, pelo balanço hídrico da água no solo, baseada em estimativa da evapotranspiração real (ET_A) obtida com o uso conjunto de imagens multiespectrais do sensor MSI/SENTINEL-2 e dados de uma estação meteorológica pública. A área de estudo foi um pivô central localizado no município de Itatinga-SP. Para a tomada de decisão do momento de irrigar, com base em um manejo por lâmina de irrigação fixa, foi feita a interpolação da fração evapotranspirativa entre os dias com imagens disponíveis para obter a ET_A nos dias sem imagens por meio do seu produto com a evapotranspiração de referência. Essa abordagem captou variações climáticas essenciais para a estimativa do balanço hídrico em dias sem imagem. Destaca-se nessa aplicação conjunta sua capacidade de ser realizada sem necessitar de parâmetros específicos da cultura, do microclima ou do relevo, tornando-se interessante para regiões com escassez de dados.

Palavras-chave: evapotranspiração, momento de irrigar, agriwater.

**MAGNONI, P. H. J.; SILVA, C. O. F.; MANZIONE, R. L.
REMOTE SENSING APPLIED TO IRRIGATION MANAGEMENT IN AREAS
WITH LACK OF DATA: A CASE STUDY IN A CENTRAL PIVOT IN ITATINGA-SP**

2 ABSTRACT

Remote sensing-based tools allow the monitoring of water budgets over different spatial and temporal resolutions. Nevertheless, some models require in situ data, preventing their application in areas with a lack of data. To address this challenge, this work presents an approach for irrigation scheduling, based on soil water budget estimation using actual

evapotranspiration (ET_A) obtained using MSI/SENTINEL-2 multispectral images and data from a public meteorological station. The study area consisted of a central pivot located in the municipality of Itatinga-SP, Brazil. For decision-making of irrigation scheduling, considering a fixed irrigation rate, the evapotranspiration fraction was interpolated between the days with available images to obtain the ET_A on the days without images using its product with the reference evapotranspiration. This approach captured essential climate variations for estimating the water budget on non-image days. Noteworthy in this joint application is its suitability to be performed not requiring crop-, microclimate- or relief-specific parameters, making it useful for regions with a lack of data.

Keywords: evapotranspiration, irrigation scheduling, agriwater.

3 INTRODUÇÃO

A distribuição das áreas com irrigação propriamente dita (sem considerar áreas fertirrigadas) o Brasil totaliza 5,3 milhões de hectares equipados para irrigação, com as culturas em pivôs centrais representando 27% deste total (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2021). Embora o primeiro pivô central só tenha sido implantado em 1979, esse sistema foi responsável por quase 40% do aumento anual dos sistemas de irrigação nas últimas duas décadas (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2019). Para que essa expansão da área irrigada ao longo do país seja sustentável é necessário implementar práticas de manejo da irrigação.

Uma das práticas de manejo sustentável da irrigação é a correta tomada de decisão do momento para irrigar. Ela é baseada no ciclo, na evapotranspiração da cultura e na disponibilidade de água no solo instantânea. Sendo assim, o balanço hídrico no solo é um bom indicador para essa tomada de decisão (GOMES, 2013). O intervalo de irrigação líquida pode ser realizado a partir de uma lâmina líquida fixa baseada em condições climáticas locais e características da cultura, onde, determina-se uma lâmina fixa para repor ao solo uma taxa correspondente ao consumo hídrico acumulado em um período variável, ou um turno de rega fixo, que corresponde a determinação de um intervalo de tempo fixo

para realização da irrigação sempre com a mesma frequência (CONCEIÇÃO, 2005; GOMES, 2013). Monitorando o balanço hídrico por meio das entradas (chuva e irrigação) e saídas (evapotranspiração de cultura ou real) é possível decidir o momento de irrigar tomando como base o intervalo de irrigação líquida.

O balanço hídrico é uma relação de entradas e saídas do sistema água-planta-solo e seus componentes têm diversas formas de serem estimados com modelos que utilizam diferentes variáveis de entrada. Com isso, a escolha da estratégia de modelagem pode ser limitada pela disponibilidade de dados. Para lidar com esse desafio, ferramentas de sensoriamento remoto, principalmente as baseadas em imagens obtidas por sensores multiespectrais embarcados em satélites orbitais, podem ser aplicados em modelagem de parâmetros hidrológicos do balanço hídrico em regiões com escassez de dados in-situ (MAGNONI; SILVA; MANZIONE, 2020). Silva; Manzione; Albuquerque Filho (2019a) realizaram uma revisão de produtos de sensoriamento remoto para o manejo da irrigação, discutindo produtos e plataformas atuais dentro desta linha de pesquisa. Uma das benesses possíveis em utilizar ferramentas geoespaciais é a de integrar monitoramento com ações em campo. Por exemplo, para aplicações em outorga de água para irrigação e desenvolvimento de calendários agrícolas,

a evapotranspiração real obtida por modelagem com imagens de satélite possibilita monitorar o balanço hídrico e a disponibilidade de água no solo para assim se antecipar a eventos de estresse hídrico e mitigá-los (BASTIAANSEN; HARSHADEEP, 2005).

No Brasil, a Agência Nacional de Águas (ANA) lançou um estudo inédito de estimativa de evapotranspiração real através da automatização do modelo Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) (SENAY, 2018) com uso do Google Earth Engine, ferramenta de computação em nuvem para processamento de dados geoespaciais (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2020). Esse produto é gerado para o todo o território brasileiro, utilizando imagens multiespectrais do sensor OLI/LANDSAT-7 e OLI/LANDSAT -8, e é uma proposta para suprir a carência de dados sobre evapotranspiração.

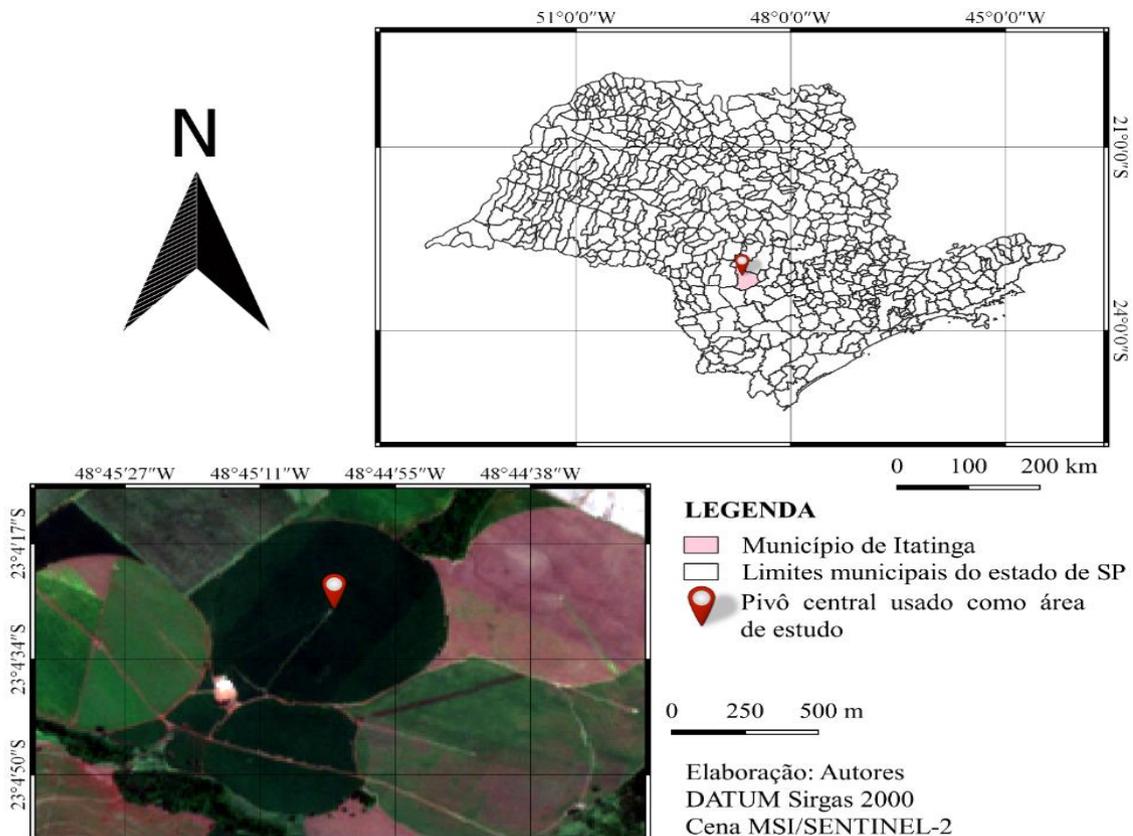
O presente artigo propõe uma estratégia de tomada de decisão do momento de irrigar, voltado a regiões com escassez de dados, baseada no uso de modelagem da ET_A por sensoriamento remoto conjuntamente a dados agrometeorológicos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A área de estudo constitui um pivô localizado no município de Itatinga – SP. O clima na região, segundo a classificação climática de Köppen (1936), é definido como tropical de altitude (Cwa) com verões chuvosos e invernos secos. O pivô avaliado possui em torno de 50 ha e localiza-se na latitude $23^{\circ} 4' 26,67''$ S e longitude $48^{\circ} 45' 2,65''$ O, área rural do município, como indicado na Figura 1.

Figura 1. Área de estudo localizada no município de Itatinga-SP.



4.2 Dados utilizados

Para o processamento das imagens de satélite e aplicação do SAFER foi utilizado o pacote *agriwater*, desenvolvido por Silva; Teixeira; Manzione (2019) em ambiente de programação da linguagem de programação R. Por meio deste pacote um usuário pode, dentre outros componentes do balanço de energia, estimar a fração evapotranspirativa (ET_A/ET_0) e a ET_A espacializada para imagens dos sensores/satélite OLI/LANDSAT8, MODIS/TERRA, MODIS/AQUA e MSI/SENTINEL-2 associadas a dados de uma ou mais estações meteorológicas. Os dados de entrada são uma máscara shapefile da área de estudo, conjuntos de dados de evapotranspiração de referência (ET_0), radiação solar global (R_G) e temperatura média do ar (T_A) e refletâncias dos satélites SENTINEL-2 ou TERRA/AQUA ou números digitais do LANDSAT-8.

Para utilizar o pacote *agriwater*, 6 cenas do MSI/SENTINEL-2 referentes as datas de imagens sem cobertura por nuvens disponíveis foram usadas: 10/01/2019 (dia juliano (DJ) 10), 30/01/2019 (DJ 30), 09/02/2019 (DJ 40), 26/03/2019 (DJ 85), 20/04/2019 (DJ 110) e 05/05/2019 (DJ 125). As imagens multiespectrais foram obtidas gratuitamente por meio da página da internet do USGS – Earth Explorer (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2013).

Uma estação meteorológica pública, inserida na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (localizada na Latitude 23° 2' 50,62" S e Longitude 48° 38' 18,77" O), a aproximadamente 11 km de distância da área de estudo forneceu dados de radiação solar global (R_G), temperatura média do ar (T_A) e evapotranspiração de referência (ET_0) utilizados em associação as informações das bandas multiespectrais do MSI/SENTINEL-2 para modelagem da ET_A .

4.3 Modelagem da evapotranspiração real (ET_A)

Os sensores remotos embarcados em satélite orbital detectam a radiação eletromagnética refletida e emitida pela superfície da Terra e da atmosfera, a qual é interpretada no espectro eletromagnético em função do comprimento de onda. Esses dados são disponibilizados em arquivos matriciais (raster) e necessitam tratamento numérico para serem interpretados em avaliações ambientais e agronômicas como na modelagem da ET_A . O modelo “Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving” (SAFER) tem como principais componentes o albedo de superfície (α_0), temperatura de superfície (T_{sup}) e o Índice de Diferença Normalizada de Vegetação (NDVI). Para se obter esses componentes é necessário uma série de cálculos, por pixel, iniciada pela conversão das reflectâncias em valores de albedo.

O albedo de superfície (α_0) foi estimado pela Equação 1 utilizando os coeficientes propostos por Silva; Teixeira; Manzione (2019) para as bandas 2, 3, 4 e 8 do sensor MSI/SENTINEL-2:

$$\alpha_0 = b\alpha_p + c \quad (1)$$

Onde b e c são coeficientes de regressão, que para um período de 24 horas foram considerados como 1,70 e 0,13, obtidos de medidas de campo e satélite (TEIXEIRA *et al.*, 2008; TEIXEIRA *et al.*, 2014a; TEIXEIRA *et al.*, 2014b) e foi calibrado com $R^2 = 0,96$ (TEIXEIRA, 2010). Sendo o albedo planetário (α_p) obtido com uma ponderação (Equação 2) das reflectâncias no espectro do visível e infravermelho próximo utilizando os coeficientes propostos por Silva; Teixeira; Manzione (2019):

$$\alpha_p = \sum w_{band} r_{band} \quad (2)$$

O NDVI é obtido a partir da Equação 3:

$$NDVI = \frac{\alpha_{P(NIR)} - \alpha_{P(RED)}}{\alpha_{P(NIR)} + \alpha_{P(RED)}} \quad (3)$$

Onde where $\alpha_{P(NIR)}$ e $\alpha_{P(RED)}$ representam a reflectância ao longo do comprimento de onda das regiões do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (RED) dentro do espectro solar, respectivamente.

Para obtenção da temperatura de superfície (T_{sup}) utilizou-se o método residual (SILVA; MANZIONE; ALBUQUERQUE FILHO, 2018), apresentada pela Equação 4:

$$T_{sup} = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_A \sigma T_A^4 - a_L \tau_{sw}}{\varepsilon_S \sigma}} \quad (4)$$

Sendo ε_A e ε_S respectivamente as emissividades atmosférica e superficial, a_L é o coeficiente de regressão do saldo de radiação de ondas longas, cujo desenvolvimento matemático está disponível em Silva; Teixeira; Manzione (2019), τ_{sw} é a transmissividade atmosférica (considerada como 44% da radiação solar global, R_G), T_A é a temperatura média do ar em 24 horas de medição e σ a constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$). A Equação 4 é uma versão com redução de termos derivada do método residual baseado no saldo de radiação pela Equação de Slob apresentada em Teixeira *et al.* (2014b).

A razão entre a ET_A e a ET_o , denominada como fração evapotranspirativa foi calculada pela Equação 5 (TEIXEIRA, 2010):

$$\frac{ET_A}{ET_o} = \exp \left[e + f \left(\frac{T_{sup}}{\alpha_0 \cdot NDVI} \right) \right] \quad (5)$$

Onde α_0 corresponde ao albedo da superfície, T_{sup} a temperatura de superfície, e e e f são coeficientes de regressão, sendo 1,8 e -0,008, respectivamente, seguindo Silva; Manzione; Albuquerque Filho (2018).

Estudos em outras regiões utilizaram, com sucesso, outros coeficientes que melhor se adequavam às condições climáticas e ambientais locais, como, por exemplo, Hernandez *et al.* (2014) e Coaguila *et al.* (2017) que utilizaram $a = 1$ na região do Noroeste Paulista. Vale destacar que esses coeficientes não são fixos ao se utilizar o pacote agriwater, sendo possível calibrar esses coeficientes de acordo com dados medidos de ET_A bem como realizar análises de sensibilidade (SILVA; TEIXEIRA; MANZIONE, 2019).

A partir da obtenção da ET_A/ET_o obtêm-se a ET_A pela Equação 6:

$$ET_A = \frac{ET_A}{ET_o} ET_o \quad (6)$$

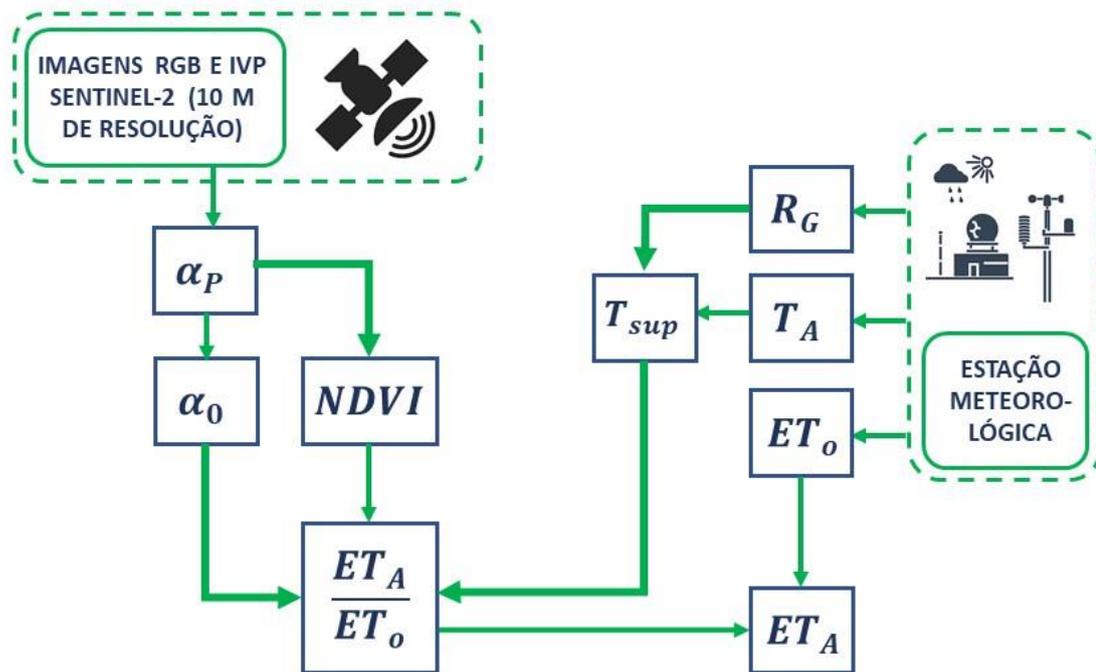
A ET_A/ET_o em culturas irrigadas, como pivôs centrais, sem estresse ambiental e hídrico, pode ser aproximada ao coeficiente de cultura (K_C) (ALLEN *et al.*, 1998). Em vegetação natural a fração evapotranspirativa indica o grau de umidade na zona das raízes das plantas e pode ser usada para caracterizar condições de estresse hídrico (TEIXEIRA *et al.*, 2017; SILVA; TEIXEIRA; MANZIONE, 2019). Uma das vantagens no uso do modelo SAFER, em comparação ao “Surface Energy Balance Algorithm for Land” (SEBAL) e “Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internal Calibration” (METRIC), é a de não necessitar como dados de entrada parâmetros microclimáticos como velocidade do vento (a 2 metros) e umidade relativa do ar e tampouco modelo digital de terreno e a definição de pixels “quentes” e “frios”, ou seja, também não é necessário que em uma mesma imagem de satélite hajam dois pontos com condições hídricas extremas e opostas (SILVA; TEIXEIRA; MANZIONE, 2019; SILVA; MANZIONE; ALBUQUERQUE FILHO, 2019b).

Como o MSI/SENTINEL-2 tem resolução temporal de aproximadamente 5 dias, aplicamos uma interpolação linear da fração ET_A/ET_o nos dias sem imagem,

dentro do intervalo de tempo de revisita do satélite, para sua aplicação na Equação 6 com dados medidos de ET_o , para obter assim a ET_A em dias sem imagem disponível. Esse princípio já foi aplicado para interpolação da ET_A em dias sem imagens no trabalho de Silva; Manzione e Albuquerque Filho (2019a).

A Figura 2 mostra as etapas do cálculo da estimativa da fração evapotranspirativa (ET_A/ET_o) pelo modelo SAFER e sua conversão em ET_A no pacote agrewater, desde o cálculo do albedo planetário até a obtenção da fração evapotranspirativa.

Figura 2. Fluxograma para estimar a ET_A/ET_o e a ET_A pela aplicação do algoritmo SAFER no pacote agrewater.



4.4 Abordagem para tomada de decisão do momento de irrigar

Tomando como limite uma lâmina ou turno de rega fixo, a partir do momento que o déficit hídrico é detectado, pode-se realizar a irrigação para suprir a demanda (CONCEIÇÃO, 2005). O balanço hídrico da água no solo tem como principais componentes a evapotranspiração real ou de cultura (como principal saída de água do sistema água-solo-plantas) e a precipitação (como principal entrada). Assim, primeiramente foi realizado o balanço diário espacializado do consumo hídrico (C) pela diferença entre a ET_A e a precipitação ($Prec$)

na localidade do pivô, seguindo a Equação 7:

$$C = ET_A - Prec \quad (7)$$

Para simular a aplicação da metodologia em uma situação prática, por meio da modelagem da ET_A/ET_o referente ao DJ 10, extrapolou-se a ET_A do DJ 11 ao 20 com os respectivos dados de ET_o obtidos da estação meteorológica. Em seguida, considerando um manejo por lâmina fixa de irrigação de 20 mm (valor hipotético), calculou-se a necessidade de irrigação líquida pelo somatório de C em escala diária até que fosse atingido o limiar (20 mm),

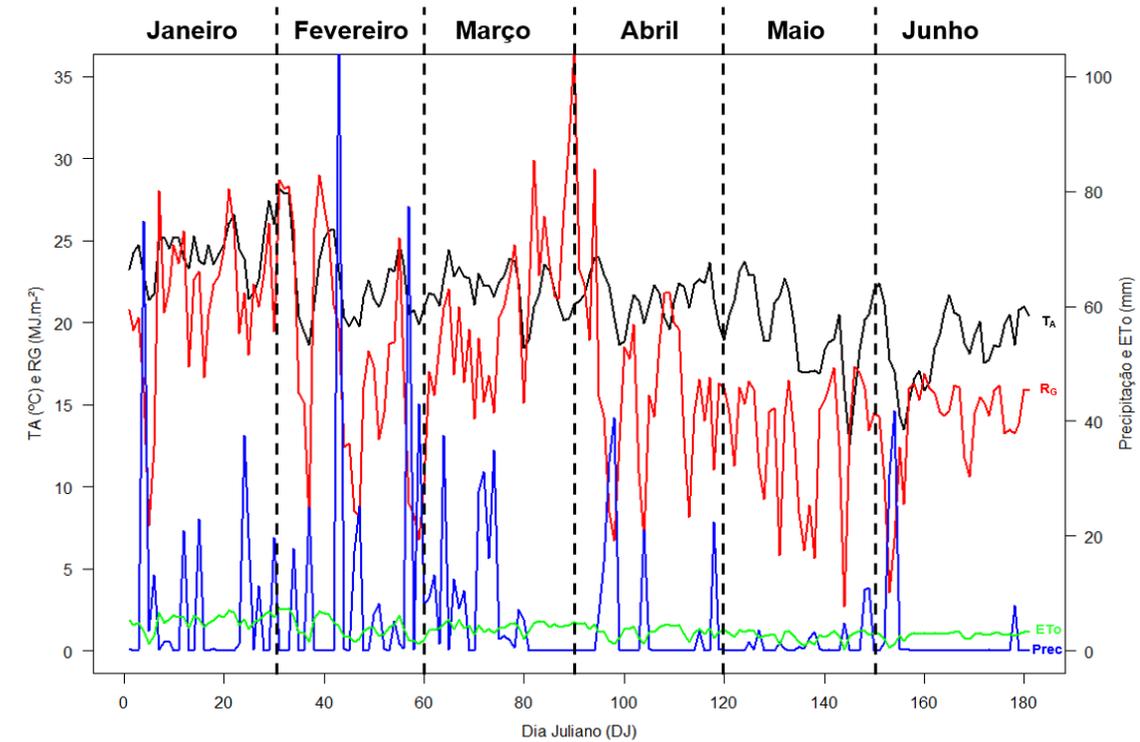
sendo esse considerado o momento de realizar a irrigação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise dos dados agrometeorológicos

A Figura 3 expõe as condições climáticas do início do mês de janeiro de 2019 (DJ 1) até o dia 31 de junho (DJ 180).

Figura 3. Condições climáticas de precipitação (Prec), radiação solar (R_G), temperatura média (T_A) e evapotranspiração de referência (ET_o) medidas na estação meteorológica.



A precipitação (Prec) e a radiação global (R_G) foram os dados de maior variabilidade durante o período estudado. Com exceção do mês de maio, os demais meses apresentaram um balanço hídrico positivo entre a chuva precipitada e a

evapotranspiração de referência. A Tabela 1 apresenta os valores máximos, mínimos e médios mensais das variáveis agrometeorológicas monitoradas pela estação automática.

Tabela 1. Valores máximos, mínimos e médios mensais acumulados das variáveis monitoradas de janeiro a junho de 2019.

	T_A (°C)	R_G (MJ.m ⁻²)	Prec (mm)	ET_o (mm)
Máximo	24,33	664,83	343,01	162,78
Mínimo	18,53	402,56	40,86	81,36
Média	21,40	517,33	178,05	110,83

5.2 Modelagem da evapotranspiração real

A Figura 4 expõe a distribuição espacial da fração evapotranspirativa no pivô central em diferentes DJ das cenas MSI/SENTINEL-2. Ressalta-se que a modelagem foi realizada em toda a cena do

satélite e posteriormente foi feito o recorte do pivô central.

A Tabela 2 apresenta a média e o desvio padrão da ET_A/ET_o calculado no recorte do pivô nas cenas do MSI/SENTINEL-2. Optou-se por calcular estas métricas após recorte para evitar influência de pixels de fora do pivô.

Figura 4. ET_A/ET_o estimada espacialmente no pivô-central.

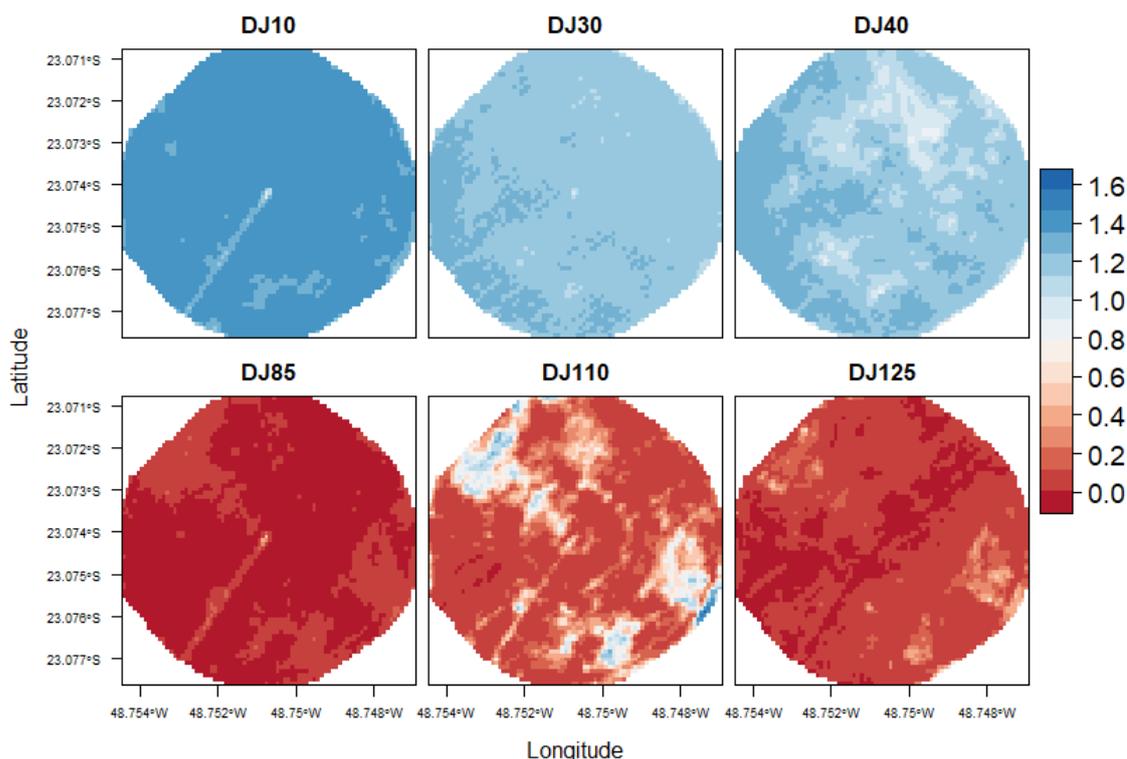


Tabela 2. Valores médios e desvio padrão da ET_A/ET_o estimada nos pixels internos ao pivô na cena MSI/SENTINEL-2.

DJ	Média ± Desvio Padrão
10	1,38±0,03
30	1,20±0,03
40	1,17±0,08
85	0,006±0,02
110	0,23±0,27
125	0,04±0,07

Os maiores valores de ET_A/ET_o foram encontrados nos DJ 10, 30 e 40. Observa-se baixo desvio padrão da fração para estes dias, que aponta uniformidade deste parâmetro no pivô. Na tabela 2 observa-se a redução gradual dos valores

médios de ET_A/ET_o do DJ 10 ao 40. Os DJ 85, 110 e 125 apresentam baixos valores de ET_A/ET_o já que se trata de um período com bastante solo exposto.

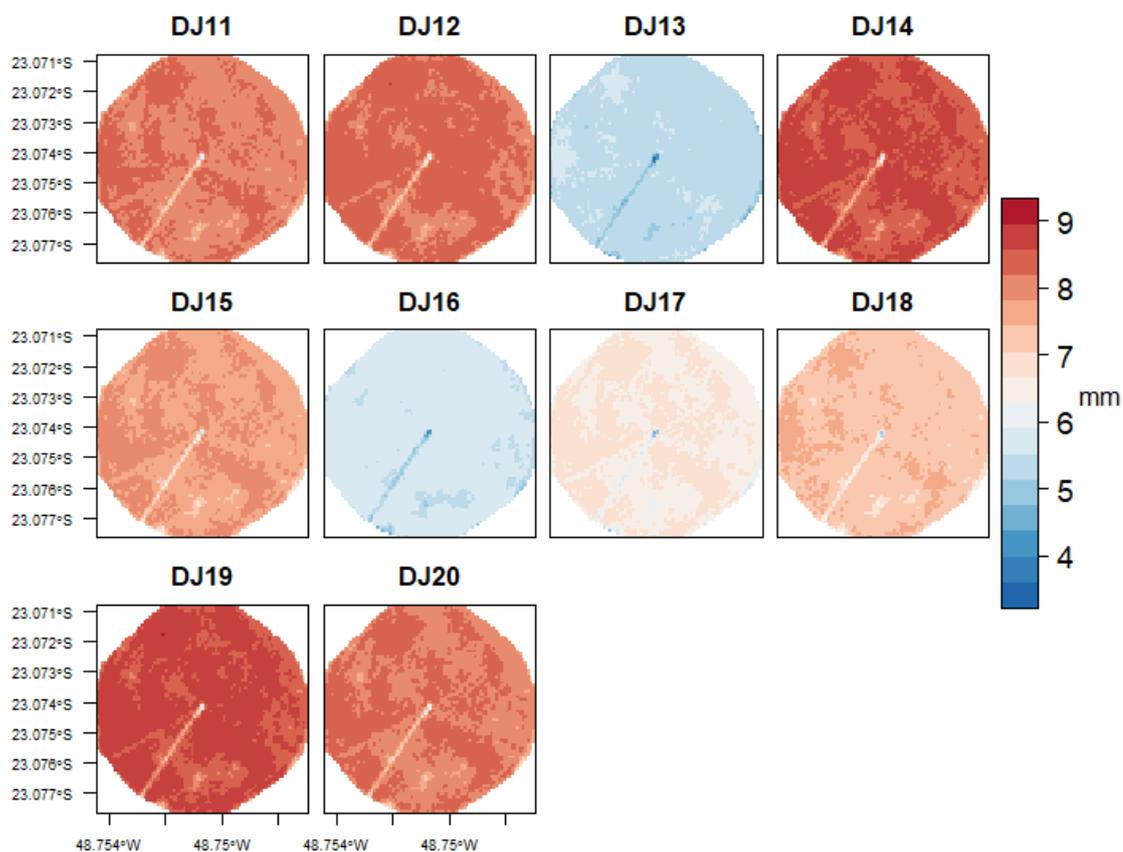
A variação no ciclo fenológico influencia a modelagem já que diferentes

estádios vegetativos apresentam diferentes estruturas do dossel que irão variar a rugosidade superficial, implicando em mudanças na velocidade do vento que influenciam os fluxos de calor, o que causa alterações na refletância, e consequentemente na modelagem da evapotranspiração (FIORIO et al., 2018). Vale então destacar que, apesar de não ser considerada na modelagem nenhum parâmetro específico de cultura, o modelo SAFER foi capaz de captar a evolução temporal da planta e com isso gerar evidências sobre o comportamento evapotranspirativo ao longo das fases fenológicas, independente de conhecimento prévio da cultura.

A Figura 5 apresenta a interpolação da ET_A no pivô do DJ 11 ao 20, obtida pela Equação 6. Este procedimento tem incerteza embutida na estimativa da ET_A/ET_o nos dias com imagem disponível, porém, com a utilização de dados de ET_o medidos nos dias sem imagem disponível, é possível reduzir a incerteza como um todo. Isso ocorre, pois,

utilizando a interpolação da ET_A/ET_o , de forma análoga ao K_C com ET_o medida, é possível captar variações climáticas dos dias sem imagem, por exemplo, no caso de uma chuva no dia seguinte a passagem do satélite. Essa abordagem é menos incerta do que, por exemplo, a interpolação da ET_A , pois, nesse caso as variações climáticas não são captadas e se considera uma variação linear ao longo dos dias sem imagem de satélite.

Os DJ 13 e 16 da Figura 5 foram os dias com menor ET_A diária observada no período, ambos estimados após eventos de precipitação registrados pela estação meteorológica nos DJ 12 e 15. É interessante observar o efeito da precipitação nas estimativas da ET_A (da Figura 5) nos dias seguintes a estes eventos, bem como seu impacto nos valores de T_A , R_G e ET_o (Tabela 3). Caso a interpolação fosse realizada diretamente com os valores de ET_A , essa variação climática não seria captada, pois ela é inserida na modelagem por meio dos valores diários de ET_o .

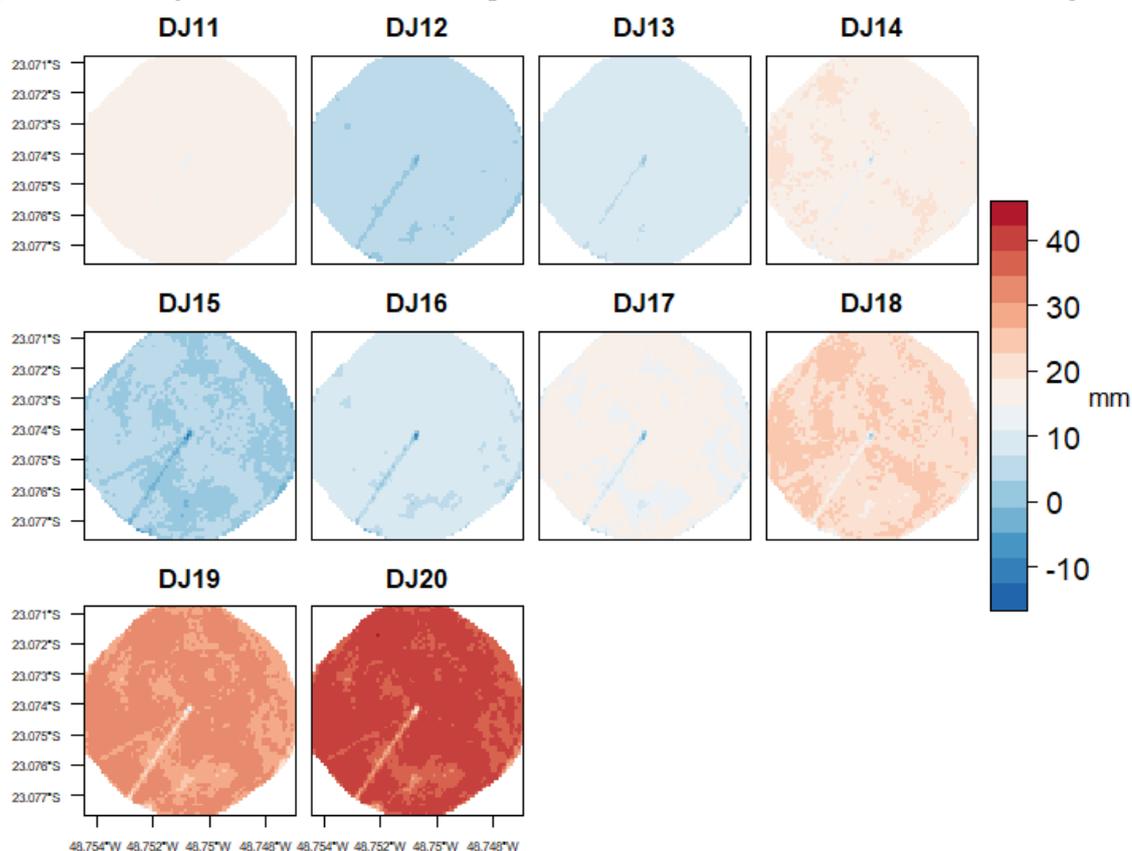
Figura 5. ET_A diária estimada no pivô entre os DJ 11 ao 20.**Tabela 3.** Valores diários de T_A, R_G, Prec e ET_o entre os DJ 11 e 20.

DJ	T _A (°C)	R _G (MJ.m ⁻²)	Prec (mm)	ET _o (mm)
11	25,19	23,58	0,00	5,84
12	23,92	25,56	20,87	5,92
13	23,29	17,30	0,00	3,90
14	25,29	22,65	0,00	6,15
15	23,77	23,13	22,91	5,58
16	23,54	16,68	0,15	4,06
17	24,74	20,49	0,00	4,77
18	23,56	22,36	0,29	5,27
19	24,21	22,86	0,00	6,18
20	24,74	24,43	0,00	5,86

5.3 Momento de irrigar

Com balanço diário espacializado do consumo hídrico (Equação 7) obteve-se a sua evolução no pivô no período entre o DJ

11 e 20 (Figura 6) permitindo identificar déficit ou superávit hídrico.

Figura 6. Evolução do consumo hídrico para a tomada de decisão do momento de irrigar.

As oscilações da ET_A acumulada ocorrem em função dos eventos de precipitação, e quando o acumulado ultrapassa o limite de déficit hídrico da lâmina fixa pré-estabelecida de 20 mm o mecanismo de irrigação deverá ser ativado para suprir a demanda hídrica.

Apesar da não possibilidade de validação dos dados da ET_A estimados pela falta de dados observados no pivô, além da dificuldade operacional para possuir medições desta variável, por meio deste estudo mostra-se o potencial de aplicação do sensoriamento remoto no manejo da irrigação de forma espacializada, utilizando imagens multiespectrais como fonte de entrada no balanço hídrico da água no solo, para auxiliar a escolha do momento de realizar a irrigação líquida, procedimento geralmente realizado a partir de estimativas/medições pontuais que também apresentam incertezas.

6 CONCLUSÃO

A estimativa do balanço hídrico utilizando dados diários de precipitação acoplados a evapotranspiração real (ET_A) diária estimada via interpolação a partir dos dias com imagens de satélite disponíveis captou as variações climáticas locais e mostrou potencial para direcionar a tomada de decisão do momento de irrigar em áreas com escassez de dados.

O potencial que se destaca nessa aplicação conjunta é sua capacidade de ser realizada sem necessitar de parâmetros específicos da cultura, do microclima ou do relevo, tornando-se interessante para regiões com escassez de dados.

Novos estudos em áreas experimentais monitoradas in situ deverão ser realizados em estudos futuros para validar essa abordagem e promover maior segurança em sua utilização prática.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos professores doutores João Saad e Sérgio Campos por participarem como banca avaliadora da qualificação do primeiro autor no programa de mestrado em Agronomia – Irrigação e Drenagem da FCA – UNESP/Botucatu, tendo contribuído com

ideias para posterior elaboração deste trabalho, e a Rildo Moreira, diretor da Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, por disponibilizar acesso aos dados meteorológicos. Assim como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudos (Processo 134361/2018-0) concedida ao primeiro autor.

8 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Atlas irrigação 2021**: Uso da água na Agricultura irrigada. 2. ed. Brasília, DF: ANA, 2021. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/1b19cbb4-10fa-4be4-96db-b3dcd8975db0>. Acesso em: 7 maio 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Estimativas de evapotranspiração real por sensoriamento remoto no Brasil**. Brasília, DF: ANA, 2020. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes/23-estimativas-de-evapotranspiracao-real-por-sensoriamento-remoto>. Acesso em: 8 maio 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil (1985-2017)**. Brasília, DF: Embrapa Milho e Sorgo, 2019.

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

BASTIAANSEN, W. G. M.; HARSHADEEP, N. R. Managing scarce water resources in Asia: The nature of the problem and can remote sensing help? **Irrigation and Drainage Systems**, Nova York, v. 19, n. 3-4, p. 269-284, 2005.

COAGUILA, D. N.; HERNANDEZ, F. B.; TEIXEIRA, A. H. D. C.; FRANCO, R. A.; LEIVAS, J. F. Water productivity using SAFER-Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving in watershed. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 8, p. 524-529, 2017.

CONCEIÇÃO, M. A. F. Manejo da irrigação. *In*: TESSMAN, D. J. **Sistema de Produção de Uva de Mesa no Norte do Paraná**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2005. v. 10, p. 25-41.

FIORIO, P. R.; COELHO, R. D.; BARROS, P. P. S.; BONILLA, M. Z.; GADY, A. P. B. Comportamento espectral de folhas da cana-de-açúcar na presença de déficit hídrico. **Irriga**, Botucatu, v. 23, n. 3, p. 609-621, 2018.

- GOMES, H. P. **Sistemas de irrigação: Eficiência energética**. João Pessoa: Editora da UFPB, 2013.
- HERNANDEZ, F. B. T.; NEALE, C. M. U.; TEIXEIRA, A. H. C.; TAGHVAEIAN, S. Determining large scale actual evapotranspiration using agrometeorological and remote sensing data in the northwest of São Paulo state, Brazil. **Acta Horticulturae**, Amsterdã, v. 1038, s. n., p. 263-270, 2014.
- KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. *In*: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. (ed.). **Handbuch der Klimatologie**. Berlin: Gebrüder Bornträger, 1936. p. 1-44.
- MAGNONI, P. H. J.; SILVA, C. O. F.; MANZIONE, R. L. Groundwater recharge and water table levels modelling using remotely sensed data and cloud-computing. **Sustainable Water Resources Management**, Nova York, v. 6, n. 6, p. 113, 2020.
- SENAY, G. B. Satellite Psychrometric Formulation of the Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) Model for Quantifying and Mapping Evapotranspiration. **Applied Engineering in Agriculture**, Saint Joseph, v. 34, n. 3, p. 555-566, 2018.
- SILVA, C. O. F.; TEIXEIRA, A. H. C. T.; MANZIONE, R. L. agriwater: An R package for spatial modelling of energy balance and actual evapotranspiration using satellite images and agrometeorological data. **Environmental Modelling & Software**, Amsterdã, v. 120, s. n., p. 104497, 2019.
- SILVA, C. O. F.; MANZIONE, R. L.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. Large-scale spatial modeling of crop coefficient and biomass production in agroecosystems in Southeast Brazil. **Horticulturae**, Basel, v. 4, n. 4, p. 44-64, 2018.
- SILVA, C. O. F.; MANZIONE, R. L.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. Sensoriamento remoto orbital para manejo da irrigação: uma revisão sistêmica. *In*: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 5, 2019, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: INOVAGRI, 2019a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.19266.12487>. Acesso em: 7 maio 2021.
- SILVA, C. O. F.; MANZIONE, R. L.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. Comparison of SAFER and METRIC-based actual evapotranspiration models in a subtropical area of Brazil. **Irriga**, Botucatu, v. 1, n. 1, Edição Especial Inovagri, p. 48-55, 2019b.
- TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; SCHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. A Comparative Study of Techniques for Modeling the Spatiotemporal Distribution of Heat and Moisture Fluxes in Different Agroecosystems in Brazil. *In*: PETROPOULOS, G. G. (org.). **Remote Sensing of Energy Fluxes and Soil Moisture Content**. 1. ed. Boca Raton: CRC Group; Taylor and Francis, 2014a. p. 169-179.
- TEIXEIRA, A. H. C.; REIS, J. B. R. S.; LEIVAS, J. F.; SILVA, G. B. S.; STRUIVING, T. B. Componentes da produtividade da água modelados por sensoriamento remoto em limoeiros irrigados de Minas Gerais. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 25, n. 1, p. 237-247, 2017.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; MOURA, M. S. B.; BOS, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, Amsterdã, v. 362, n. 1-2, p. 110-127, 2008.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; BOLFE, E. L. Energy balance with Landsat images in irrigated central pivots with corn crop in the São Paulo State, Brazil. **Proceedings of SPIE**, Washington, DC, v. 9239, p. 92390O-1-92390O-10, 2014b.

TEIXEIRA, A. H. C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing a Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, Basel, v. 2, n. 5, p. 1287-1319, 2010.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Earth Explorer**. Reston: U.S. Department of the Interior, 2013. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 8 maio 2021.