

**DANIELA ARAÚJO DE OLIVEIRA**

**MODELAGEM DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO NOROESTE PAULISTA  
UTILIZANDO O ALGORITMO SAFER**

**Botucatu  
2024**



**DANIELA ARAÚJO DE OLIVEIRA**

**MODELAGEM DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO NOROESTE PAULISTA  
UTILIZANDO O ALGORITMO SAFER**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutora em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

Orientador: Prof. Dr. Fernando Braz  
Tangerino Hernandez

**Botucatu**

**2024**

O48m

Oliveira, Daniela Araújo de  
Modelagem da evapotranspiração no Noroeste  
Paulista utilizando o algoritmo SAFER / Daniela  
Araújo de Oliveira. -- Botucatu, 2024  
80 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista  
(UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas,  
Botucatu

Orientador: Fernando Braz Tangerino Hernandez

1. Irrigação. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Eddy  
Covariance. 4. Evapotranspiração. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp.  
Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de  
Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: MODELAGEM DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO NOROESTE PAULISTA UTILIZANDO O ALGORITMO SAFER

AUTORA: DANIELA ARAUJO DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: FERNANDO BRAZ TANGERINO HERNANDEZ

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Irrigação e Drenagem), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. FERNANDO BRAZ TANGERINO HERNANDEZ (Participação Presencial)  
Fitossanidade Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira UNESP

Prof. Dr. JOSÉ ALVES JÚNIOR (Participação Presencial)  
Engenharia de Biosistemas / Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. PEDRO ROGÉRIO GIONGO (Participação Virtual)  
Engenharia Agrícola / Universidade Estadual de Goiás

Prof. Dr. JOÃO CARLOS CURY SAAD (Participação Presencial)  
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu UNESP

Pesquisador Doutor LINEU NEIVA RODRIGUES (Participação Virtual)  
Cerrados / EMBRAPA

Botucatu, 19 de março de 2024



Dedico este trabalho,  
ao meu querido pai, Nilson Grizoste de Oliveira.



## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida, pela minha saúde, por todos os momentos passados que me permitiram chegar até aqui e pelas pessoas que colocou no meu caminho.

A toda minha família, pelo amor e apoio incondicional em toda minha vida.

Ao Leandro, que sempre foi meu maior incentivador e por nunca ter me deixado desistir.

Ao Professor Dr. Fernando Braz Tangerino Hernandez pela orientação, confiança, paciência, amizade e conhecimento transmitido.

À Área de Hidráulica e Irrigação da UNESP Ilha Solteira que me acolheu e possibilitou a aprendizagem e crescimento pessoal e profissional, em especial aos amigos: Regiane, Pedro, Larissa e Diego.

Às amigas de república, que fizeram a caminhada mais leve e foram família em muitos momentos, principalmente, Juliana, Tainah, Eni e Camila.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio financeiro para a aquisição do sistema *Eddy Covariance* (Processo 166 404.229/2013-1, coordenado pelo Dr. Antônio Heriberto de Castro Teixeira) e pela Bolsa de Doutorado concedida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro na implantação da RANP - Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista (Processo 2009/52467-4).



## RESUMO

Com a necessidade de produzir mais alimentos, a agricultura irrigada é cada vez mais citada como forma de otimização das terras agricultáveis ao redor do mundo. O Brasil, como grande produtor mundial de diversas culturas e com potencial de aumento de suas áreas irrigadas, tem a possibilidade de expansão de produção junto à maximização dos recursos hídricos. Uma agricultura irrigada sustentável só é possível com o manejo da irrigação feito de forma adequada, ou seja, a aplicação de água deve ser realizada com base na necessidade hídrica das culturas de interesse. Neste cenário, a aplicação de algoritmos em imagens de satélite para estimativa da evapotranspiração vem sendo utilizados ao redor do mundo. Dentre esses algoritmos, destaca-se o SAFER (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving*), que surgiu, em meio a outros modelos, como um método simplificado para obtenção da evapotranspiração por sensoriamento remoto. Apesar de muito utilizado em diversas culturas e biomas brasileiros, alguns autores sugerem que o SAFER passe por calibrações e validações para melhor acurácia dos dados estimados. Uma das maneiras de realizar a calibração é por meio do sistema *Eddy covariance*, que mensura a evapotranspiração em campo, e assim, pode-se utilizar os dados mensurados no melhor ajuste dos coeficientes do SAFER. Assim, este trabalho teve por objetivo mensurar, avaliar e sobretudo calibrar o algoritmo SAFER nas culturas do milho e cana-de-açúcar na região Noroeste Paulista, combinando dados de sensoriamento remoto e medidas micrometeorológicas provindas do *Eddy covariance*. Na cultura da cana-de-açúcar foram determinados os coeficientes do SAFER como “a” igual a 0,05 e “b” igual a -0,002. Obtendo valores de RMSE de 0,77 mm dia<sup>-1</sup> e NSE de 0,56. Já para a cultura do milho, o valor de “a” observado foi de 1 e “b” de -0,003 e -0,0002 para os satélites Landsat 8 e Sentinel 2, respectivamente. Os valores de RMSE foram de 1,0 mm dia<sup>-1</sup> para o satélite Landsat 8 e 0,8 mm dia<sup>-1</sup> para o Sentinel 2, e NSE de 0,55 e 0,87 para o Landsat e Sentinel, respectivamente. Reitera-se que, é necessário a continuidade de estudos para melhor precisão da modelagem da evapotranspiração pelo algoritmo SAFER.

**Palavras-chave:** irrigação; sensoriamento remoto; *Eddy covariance*; necessidade hídrica.



## ABSTRACT

With the need to produce more food, irrigated agriculture is increasingly mentioned as a way to optimize arable land worldwide. Brazil, as a major global producer of various crops with the potential to expand its irrigated areas, has the possibility of increasing production while maximizing water resources. Sustainable irrigated agriculture is only possible with proper irrigation management, meaning water application should be based on the water needs of the target crops. In this scenario, the application of algorithms on satellite images for estimating evapotranspiration has been used worldwide. Among these algorithms, the SAFER (Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving) stands out. It emerged, among other models, as a simplified method for obtaining evapotranspiration through remote sensing. Despite being widely used in various Brazilian crops and biomes, some authors suggest that SAFER undergo calibrations and validations for better accuracy of the estimated data. One way to perform calibration is through the *Eddy covariance* system, which measures evapotranspiration in the field. Thus, the measured data can be used to better adjust SAFER coefficients. This study aimed to measure, evaluate, and especially, calibrate the SAFER algorithm in corn and sugarcane crops in the Northwestern region of São Paulo, combining remote sensing data and micrometeorological measurements from the *Eddy covariance*. For sugarcane cultivation, SAFER coefficients were determined as "a" equal to 0.05 and "b" equal to -0.002, with RMSE values of 0.77 mm day<sup>-1</sup> and NSE of 0.56. As for corn cultivation, the observed value of "a" was 1, and "b" was -0.003 and -0.0002 for Landsat 8 and Sentinel 2 satellites, respectively. The RMSE values were 1.0 mm day<sup>-1</sup> for Landsat 8 and 0.8 mm day<sup>-1</sup> for Sentinel 2, with NSE values of 0.55 and 0.87 for Landsat and Sentinel, respectively. It is emphasized that further studies are necessary for better precision in modeling evapotranspiration using the SAFER algorithm.

**Keywords:** irrigation; remote sensing; *Eddy covariance*; water requirements.



## LISTA DE FIGURAS

### Capítulo 1 - Aplicação e calibração do algoritmo SAFER na estimativa da evapotranspiração de cana-de-açúcar na região Noroeste do estado de São Paulo, Brasil

- Figura 1 - Localização da área de estudo.....26
- Figura 2 - Torre *Eddy Covariance* instalada em cana-de-açúcar no Noroeste Paulista.....27
- Figura 3 - Fluxograma esquemático para calcular a evapotranspiração ao aplicar o algoritmo SAFER.....31
- Figura 4 - Albedo de superfície ( $\alpha_0$ ) da cana-de-açúcar determinado por sensoriamento remoto.....33
- Figura 5 - Temperatura de superfície da cana-de-açúcar determinada por sensoriamento remoto.....34
- Figura 6 - NDVI da cana-de-açúcar determinado por sensoriamento remoto.....35
- Figura 7 - Relação entre albedo de superfície, temperatura de superfície, NDVI e evapotranspiração atual pelo algoritmo SAFER (SAFER\_ETa) .....36
- Figura 8 - Evapotranspiração estimada pelo SAFER (SAFER\_ETa) e pelo *Eddy Covariance* (EC\_ET), precipitação (P) e Irrigação (I) nas safras 2016/17 (A) e 2017/18 (B) em cana-de-açúcar com base em graus-dia acumulados (GDA) e dias após o corte (DAC).....37
- Figura 9 - Relação entre a ETa determinada pelo SAFER e a ET *Eddy Covariance* antes da calibração.....39
- Figura 10 - Relação entre a relação ET/ETo determinada pelo SAFER e a mensurada em campo antes da calibração.....41
- Figura 11 - Calibração dos coeficientes do algoritmo SAFER utilizando medições de satélite e dados de campo.....43
- Figura 12 - Relação entre a ETa determinada pelo SAFER e a ET *Eddy Covariance* após calibração.....44
- Figura 13 - Relação entre a relação ET/ETo determinada pelo SAFER e a mensurada em campo após calibração.....45

### Capítulo 2 - Ajuste do algoritmo SAFER para estimativa da evapotranspiração da cultura do milho no Noroeste Paulista

Figura 1 - Localização da área de estudo .....	55
Figura 2 - Torre do sistema <i>Eddy Covariance</i> instalada em campo.....	56
Figura 3 - Anemômetro sônico tridimensional integralizado com analisador de gás IRGASON®.....	56
Figura 4 - Densidade de fluxos de energia diários para a cultura do milho irrigada por pivô central em 2019 (A) e 2020 (B) determinados pelo sistema <i>Eddy covariance</i> . $R_n$ - Saldo de radiação, $LE$ - Fluxo de calor latente, $H$ - Fluxo de calor sensível, $G$ - Fluxo de calor no solo.....	62
Figura 5 - Fechamento do balanço de energia para a cultura do milho irrigada por pivô central em 2019 (A) e 2020 (B).....	63
Figura 6 - Calibração dos coeficientes do algoritmo SAFER para a cultura do milho utilizando medições de satélite e dados de campo para o Landsat 8 (A) e Sentinel 2 (B).....	65
Figura 7 - Relação entre a evapotranspiração atual determinada pelo SAFER ( $ET_a$ SAFER) e a evapotranspiração mensurada pelo <i>Eddy Covariance</i> ( $ET_a_{EC}$ ) para o Landsat 8 (A) e Sentinel 2 (B).....	66
Figura 8 - Armazenamento de água no solo para a cultura do milho irrigada por pivô central em 2019 (A) e 2020 (B).....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
EC	<i>Eddy covariance</i>
ET	Evapotranspiração
ETa	Evapotranspiração atual
ETc	Evapotranspiração de cultura
ETo	Evapotranspiração de referência
G	Fluxo de calor no solo
H	Fluxo de calor sensível
LE	Fluxo de calor latente
METRIC	<i>Mapping Evapotranspiration at High Resolution and with Internalized Calibration</i>
NDVI	Índice de vegetação por diferença normalizada
NSE	Coefficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe
RANP	Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista
Rg	Radiação global
RMSE	Raiz do erro médio quadrático
Rn	Saldo de radiação
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinação
SAFER	<i>Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving</i>
SEBAL	<i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i>
SSEBop	<i>Operational Simplified Surface Energy Balance</i>
S-SEBI	<i>Simplified Surface Energy Balance Index</i>
T0	Temperatura de superfície
UGRHIs	Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos
UNESP	Universidade Estadual Paulista
$\alpha_0$	Albedo de superfície



## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO 1 - APLICAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO ALGORITMO SAFER NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL.....</b>	<b>23</b>
1.1 INTRODUÇÃO .....	24
1.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	25
1.2.1 Área de estudo .....	25
1.2.2 <i>Eddy covariance</i> .....	26
1.2.3 <i>Simple Algorithm for Retrieving Evapotranspiration - SAFER</i> .....	28
1.2.4 Calibração do algoritmo SAFER.....	32
1.2.5 Parâmetros estatísticos .....	32
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	33
1.3.1 Calibração dos coeficientes “a” e “b” .....	42
1.4 CONCLUSÃO .....	46
REFERÊNCIAS .....	46
<b>CAPÍTULO 2 - AJUSTE DO ALGORITMO SAFER PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DO MILHO NO NOROESTE PAULISTA.....</b>	<b>52</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	53
2.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	54
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
2.4 CONCLUSÕES .....	69
REFERÊNCIAS .....	70
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>76</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>77</b>



## INTRODUÇÃO GERAL

Com o crescimento da população e a demanda por uma maior produção de alimentos, a prática da irrigação vem se tornando cada vez mais importante em áreas agricultáveis com potencial para agricultura irrigada, sendo necessário a maximização do uso dos recursos hídricos (MANTOVANI et al., 2012) e entendimento das variáveis do ciclo hidrológico.

O uso de sensoriamento remoto vem apresentando possibilidades para o alcance da quantificação correta da evapotranspiração (ET) em escala regional, por meio da aplicação de algoritmos em imagens de satélite. Nesse contexto, houve o desenvolvimento de diversos algoritmos para estimativa de ET, como por exemplo o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) desenvolvido por Bastiaanssen et al. (1998), o METRIC (*Mapping Evapotranspiration at High Resolution and with Internalized Calibration*) (ALLEN, TASUMI, TREZZA, 2007) que foi desenvolvido com a proposta de oferecer um melhor controle dos componentes do balanço de energia no solo, o S-SEBI (*Simplified Surface Energy Balance Index*) proposto por Roerink, Su e Menenti (2000), Senay et al (2013) desenvolveram o SSEBop (*Operational Simplified Surface Energy Balance*), que é o modelo utilizado nas estimativas do uso de água nos Estados Unidos e foi a escolha da Agência Nacional de Águas para a estimativa de ET no Brasil (ANA, 2020), o SAFER (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving*) (TEIXEIRA, 2010), entre outros.

O SAFER é um algoritmo que modela a evapotranspiração atual (ETa) a partir de variáveis obtidas por sensoriamento remoto, como o albedo, temperatura de superfície e NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), combinado com dados de estações meteorológicas ou agrometeorológicas, como a evapotranspiração de referência (ETo), temperatura do ar (Ta) e radiação global (Rg). Esse algoritmo possui as seguintes vantagens: não é obrigatório o uso da banda termal, tornando sua aplicação mais simples; não utiliza informações de classificação de culturas nem de condições de extrema seca; a estimativa de ETa é baseada exclusivamente mediante a equação do balanço de energia, portanto não há a necessidade do conhecimento do teor de água no solo ou dados da cobertura vegetal; e a obtenção dos valores de ETa é feita pixel a pixel, e essas informações podem ser extrapolados para uma região maior, diferencialmente do que ocorre com dados locais, tornando assim possível a

identificação de sua variabilidade espacial (TEIXEIRA, 2012; WARREN, 2013; SALES et al., 2017).

A aplicabilidade do SAFER para estimativa de evapotranspiração vem sendo utilizada em estudos em diferentes usos e ocupações do solo e em diversas localidades brasileiras, inclusive no Noroeste Paulista, como pode-se observar nos trabalhos de Teixeira et al. (2014), Teixeira et al. (2016), Coaguila et al. (2017), Oliveira et al. (2019) e Oliveira et al. (2021). Apesar de apresentar resultados satisfatórios em diferentes regiões do Brasil, alguns autores destacam o fato que os dados obtidos pelo algoritmo SAFER por vezes são subestimados em relação ao que é conhecido pela literatura e sugerem correções e calibrações de seus coeficientes para melhor estimativa de ET por meio de sensoriamento remoto (BISPO et al., 2019; VENÂNCIO, 2019; SOUZA et al., 2020; SAFRE, 2022).

A determinação da evapotranspiração em um ambiente cultivado também pode ser mensurada por métodos micrometeorológicos por meio da equação do balanço de energia, dado o princípio que o processo de evapotranspiração é realizado pela troca de energia da superfície cultivada, para isso, é necessário quantificar os componentes da equação do balanço, que são eles: saldo de radiação ( $R_n$ ), fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível na atmosfera (H) e fluxo de calor no solo (G) (TEIXEIRA, 2001). As medições locais dos componentes em campos cultivados ou vegetação nativa podem ser realizadas por diferentes métodos micrometeorológicos, entre eles, o *Eddy covariance* (EC) ou método das correlações turbulentas, razão de Bowen e o *Surface Renewal*. Entretanto, esses métodos proporcionam resultados pontuais, não sendo adequados quando o objetivo são grandes escalas.

O método da razão de Bowen é o mais utilizado em estudos com essa temática por apresentar baixo custo e facilidade de instalação do experimento, além de ser o pioneiro nos estudos de balanço de energia (BIUDES et al., 2009). A estimativa dos fluxos de calor latente e sensível obtida por essa técnica vem apresentando concordância com o observado pelo *Eddy covariance* e até mesmo com medidas lisimétricas (SILVA, FOLEGATTI, VILLA NOVA, 2005; ARRUDA et al., 2006). No entanto, alguns autores têm relatado limitações quanto ao uso da razão de Bowen, segundo Liu & Foken (2001) quando o valor da razão se aproxima de -1,0 apresenta fluxos com magnitudes extremamente inadequadas, Farias, Cuenca e Ek (1996) recomendaram descartar valores durante o pôr do sol e durante a noite, devido à dificuldade de estimar gradientes de temperatura e pressão de vapor d'água, e ainda

Angus e Watts (1984) destacam a necessidade de uma extensa bordadura para garantir estimativas consistentes dos fluxos acima de superfície vegetada.

O método das correlações turbulentas ou *Eddy covariance* (EC) vem sendo um dos métodos mais utilizados e aceitos para estudos sobre a troca de carbono, vapor d'água e energia entre a superfície vegetada e a atmosfera (BALDOCHI, 2003, KRISHNAN et al., 2012). Essa técnica permite obter os fluxos de calor sensível e latente medindo as flutuações de alta frequência na velocidade do vento, densidade do vapor e temperatura do ar, a partir das trocas turbulentas das variáveis entre a superfície e a atmosfera (SHUTTLEWORTH, 2007). O método das correlações turbulentas apresenta difícil interpretação dos resultados principalmente nos períodos noturnos, quando a turbulência é mais fraca (LEE et al., 1996). Além de ser um método oneroso, é uma técnica que exige vários sensores complexos e de alto custo.

O Noroeste do estado de São Paulo apresenta as maiores taxas de evapotranspiração do estado e alta variabilidade temporal de chuvas, ocasionando em um déficit hídrico anual de até oito meses, com períodos críticos de até 114 mm mensais, sendo assim, o volume de chuvas da região não é suficiente para atender sua demanda evapotranspirativa (SANTOS, HERNANDEZ, ROSSETTI, 2010; SILVA JUNIOR et al., 2018).

A região na qual o Noroeste Paulista está inserido é denominada de “Grandes Lagos”, por estar inserida entre os lagos de 4 grandes usinas hidrelétricas e se localiza entre três Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs), são elas: Turvo/Grande, Baixo Tietê e São José dos Dourados (ANA, 2023), logo há potencial para a expansão da agricultura cultivada sob sistemas de irrigação devido à oferta de recursos hídricos.

A combinação entre altas taxas de evapotranspiração e a disponibilidade de recursos hídricos vem despertando nos produtores da região o interesse em investir em sistemas de irrigação para garantia das produtividades das culturas, e a expansão dos sistemas de irrigação tipo pivô central ao longo dos anos é observada no Noroeste Paulista. De acordo com Amendola (2016) no ano 2000 a região possuía 86 equipamentos e área irrigada de 6.802 hectares e evoluiu para 13.331 hectares irrigados e 202 sistemas em 2015. A base de dados foi atualizada por Squizzato (2017), que encontrou o número de 344 sistemas de irrigação tipo pivô central ao final de 2016, com uma área irrigada acumulada de 16.501 hectares. Esses dados foram revisados e atualizados por Oliveira & Hernandez (2022), que constataram algumas

divergências de resultados devido aos pivôs do tipo rebocável, que podem ser usados para irrigar mais de uma área, sendo assim os números da irrigação no Noroeste Paulista passaram a ser 79 pivôs centrais no ano 2000, somando 6.662 hectares irrigados e 320 equipamentos em 2018, totalizando uma área irrigada de 17.135 hectares, com uma implantação média anual de 13 pivôs centrais e 582 hectares irrigados anualmente.

Para que o manejo da irrigação seja realizado de forma eficiente e satisfatória, o Irrigante deve possuir acesso a informações sobre as variáveis que poderão afetar a quantidade de água necessária a ser aplicada às plantas (ORTEGA, JUAN, TARJUELO, 2005), e assim fazer um melhor planejamento do uso dos recursos hídricos.

Assim, esse trabalho tem por objetivo aplicar, avaliar e, sobretudo, calibrar o algoritmo SAFER para estimar adequadamente a evapotranspiração atual (ETa), combinando dados de sensoriamento remoto com medidas micrometeorológicas provenientes do sistema *Eddy covariance*, na região Noroeste do estado de São Paulo, em diferentes culturas.

## CAPÍTULO 1

### APLICAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO ALGORITMO SAFER NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL

**RESUMO:** O objetivo desse estudo foi aplicar e avaliar o algoritmo *Simple Algorithm for Retrieving Evapotranspiration* (SAFER) na estimativa da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar na região Noroeste Paulista, a fim de calibrar seus coeficientes. Para isso, foram utilizados dados do satélite Landsat 8 combinados com medidas micrometeorológicas de campo provenientes do sistema *Eddy covariance*. O estudo foi desenvolvido em área comercial com cana tipo soca, durante as safras 2016/17 (4º corte) e 2017/18 (5º corte). Foram determinados novos coeficientes “a” e “b” para o SAFER, sendo 0,05 e -0,002, respectivamente. Após a calibração, a estimativa da evapotranspiração pelo SAFER obteve valores de R<sup>2</sup> igual a 0,51, RMSE de 0,77 mm dia<sup>-1</sup> e NSE igual a 0,56, quando comparados a medições do *Eddy covariance*.

**Palavras-chaves:** sensoriamento remoto, *Saccharum officinarum*, balanço de energia

**ABSTRACT:** The objective of this study was to apply and evaluate the Simple Algorithm for Retrieving Evapotranspiration (SAFER) in estimating evapotranspiration of sugarcane crops in the Northwestern region of São Paulo, aiming to calibrate its coefficients. To achieve this, Landsat 8 satellite data combined with field micrometeorological measurements from the *Eddy covariance* system were utilized. The study was conducted in a commercial area with ratoon cane during the 2016/17 (4th ratoon) and 2017/18 (5th ratoon) crop seasons. New coefficients "a" and "b" for SAFER were determined, being 0.05 and -0.002, respectively. Following calibration, the evapotranspiration estimate by SAFER achieved R<sup>2</sup> values of 0.51, RMSE of 0.77 mm day<sup>-1</sup>, and NSE of 0.56 when compared to *Eddy covariance* measurements.

**Keywords:** remote sensing, *Saccharum officinarum*, energy balance

## 1.1 INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca na produção de culturas bioenergéticas, com a cana-de-açúcar ocupando uma posição de destaque como sua principal cultura, sendo o país líder mundial na produção desse cultivo. A safra 2023/24 totalizou uma produção de 713,2 milhões de toneladas, sendo que 54% desse total provém do estado de São Paulo, o principal produtor nacional, detentor de quase 50% da área destinada à plantação da cultura no país (CONAB, 2024).

A restrição hídrica no solo afeta diretamente o rendimento das culturas, limitando a produtividade, pois o desenvolvimento vegetativo é proporcional a água transpirada pelas plantas (DALRI et al., 2008). No caso da cana-de-açúcar, a presença de água no solo afeta o estabelecimento da cultura ao longo do estágio vegetativo, e, quando esse fator é limitante, torna-se danoso para a cultura ao longo do seu ciclo produtivo (RAMESH, 2000).

A indisponibilidade hídrica não se limita apenas a regiões consideradas climaticamente secas, uma vez que regiões úmidas podem sofrer com a alta variabilidade de chuvas, tendo períodos com precipitações altas enquanto em outros não há precipitação suficiente para atender a demanda das culturas. Dessa forma, uma região que possui longos períodos de déficit hídrico no solo, pode prejudicar a produção vegetal, como é o caso da região Noroeste Paulista (SANTOS, HERNANDEZ, ROSSETTI, 2010).

Nesse cenário, a irrigação se torna indispensável para manter o potencial produtivo da cultura, estabelecido por sua genética, e não perder produtividade em razão da falta de água no solo. Sendo a evapotranspiração (ET) a principal saída de água do ciclo hidrológico, a compreensão desta variável se torna essencial para a agricultura, seja na gestão da irrigação, planejamento agrícola, eficiência no uso da água ou gestão de recursos naturais.

O cálculo da ET em escala regional pode ser realizado por meio de sensoriamento remoto com a aplicação de algoritmos em imagens de sensores orbitais. O SAFER (*Simple Algorithm for Retrieving Evapotranspiration*) (TEIXEIRA, et al., 2010; TEIXEIRA, et al., 2012) é um método que estima a ET real, também chamada de evapotranspiração atual (ETa), e tem como característica sua aplicação mais simplificada em relação a outros algoritmos conhecidos. Porém, apesar de

apresentar resultados satisfatórios em diferentes regiões do Brasil, alguns autores sugerem correções e calibrações no processamento das imagens para melhor precisão de dados (VENÂNCIO, 2019; SOUZA et al., 2020; SAFRE, 2022).

Os métodos micrometeorológicos podem melhorar a acurácia das técnicas baseadas em sensoriamento remoto. Dentre eles é destacado o sistema de correlações turbulentas ou *Eddy covariance* (EC), que é utilizado para medir diretamente as trocas de calor e gás entre a superfície e a atmosfera. Essa técnica permite estimar a evapotranspiração com precisão e por isso tem sido utilizado com frequência para comparação dos valores de evapotranspiração estimados por outros métodos e validação de modelos ou algoritmos de determinação de ET (WILSON et al., 2001; PAUWELS & SAMSON, 2006; LI et al., 2008, BISPO et al., 2022).

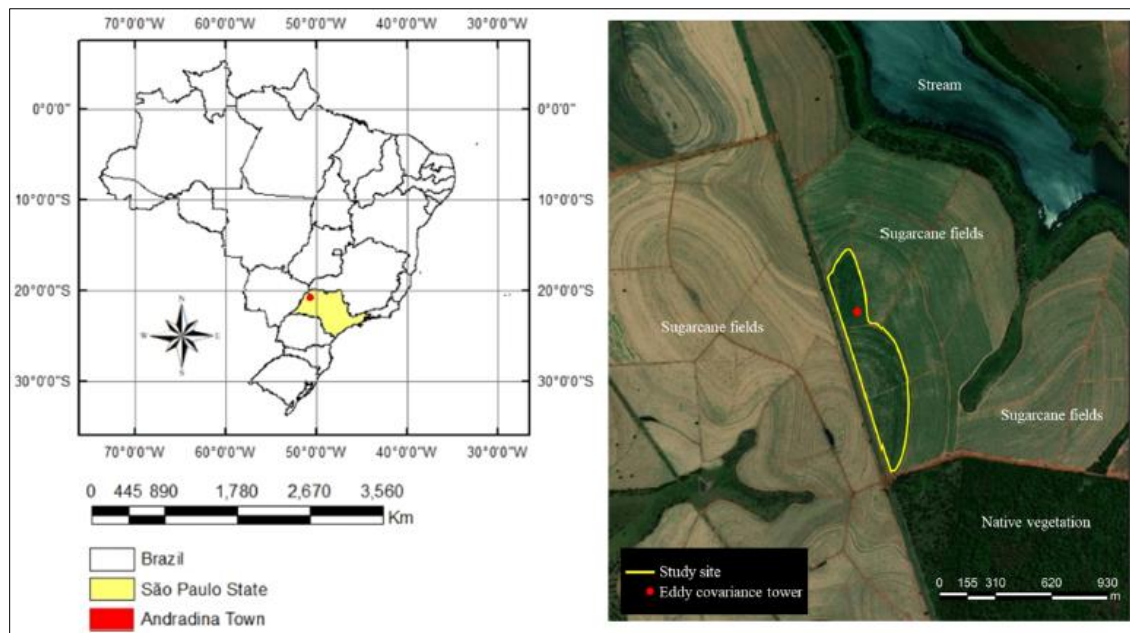
Assim, esse trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho e calibrar o algoritmo SAFER para estimar a evapotranspiração atual (ETa) da cana-de-açúcar, e para tanto, utilizou-se dados de sensoriamento remoto combinados com medidas micrometeorológicas provenientes do sistema *Eddy covariance*, em área comercial irrigada no Noroeste do estado de São Paulo.

## 1.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 1.2.1 Área de estudo

Este trabalho foi conduzido em área comercial de 7,86 hectares, localizada no município de Andradina-SP (latitude: 20° 43' 43" S, longitude: 51° 16' 30" O), com clima tropical com inverno seco (Aw), segundo classificação de Köppen (ROLIM et al., 2007) e tipo de solo Latossolo Vermelho Distrófico Típico (SANTOS et al., 2018) (Figura 1).

**Figura 1 – Localização da área de estudo**



Fonte: BISPO et al. (2022, p. 2).

No período que compreende este estudo, entre 27 de junho de 2016 e 28 de junho de 2018, a área estava cultivada com cana-de-açúcar tipo soca (4° e 5° cortes), variedade RB 966928, com sistema de plantio em linhas duplas, sendo o espaçamento entre linhas duplas de 1,5 m e entre linhas simples de 0,80 m. A área foi irrigada por gotejamento subsuperficial, enterrado a profundidade de 0,4 m abaixo de cada linha simples da cultura, com vazão de 1 L/h por emissor.

### 1.2.2 Eddy covariance

Durante as safras 2016/17 e 2017/18, os componentes do balanço de energia e dados micrometeorológicos foram coletados por meio de uma torre de fluxo *Eddy covariance* de 8 m de altura, instalada em campo com posição em razão da direção predominante do vento, como pode ser observado na Figura 2.

**Figura 2 – Torre *Eddy Covariance* instalada em cana-de-açúcar no Noroeste Paulista**



As variáveis turbulentas foram medidas por um anemômetro sônico tridimensional (componentes de vento e temperatura) integralizado com um analisador de gás infravermelho IRGASON (Campbell Scientific, Logan, Utah, EUA), acoplados a um datalogger CR 3000 (Campbell Scientific, Logan, Utah, EUA) para registro de 10 dados por segundo. Além destes, sensores de radiação (CNR4, Net radiometer - Kipp & Zonen, Delft, Holanda), precipitação (CS700-L, Hydrological Services Pty. Ltd., Sidney, Austrália) e fluxo de calor no solo (HFP01-L, Campbell Scientific, Inc. Logan, Utah, EUA) foram instalados, registrando dados em intervalos de 5 segundos com médias ou totalizações a cada 30 minutos.

Os dados brutos do sistema EC foram processados utilizando o *software* Eddy Pro Advanced (V 4.0 - LI-COR, Lincoln, NE, EUA), e para o preenchimento de falhas e particionamento de fluxo foi utilizado o *software* TOVI (V 2.0 - LI-COR, Lincoln, NE, EUA), aplicadas as metodologias descritas por Bispo (2020). Posteriormente, para converter os valores de fluxo em lâmina evapotranspirada foi utilizada a equação descrita por Aubinet et al. (2012):

$$EC_{ET} = 1800 \frac{LE}{10^3(3147.5 - 2.37Ta)} \quad (1)$$

Em que,  $EC_{ET}$  é a evapotranspiração calculada pelo EC (mm),  $LE$  é o fluxo de calor latente ( $W m^{-2}$ ), 1800 é o fator de conversão para segundos,  $(3147.5 - 2.37Ta)$

é o calor latente de vaporização de água ( $\text{KJ kg}^{-1}$ ), e  $T_a$  é temperatura do ar (K). Como os dados foram processados para cada 30 minutos, em dos valores de ET 30min.seguida foi feito o somatório dos valores de ET para obtenção da evapotranspiração diária da cultura.

### 1.2.3 Simple Algorithm for Retrieving Evapotranspiration - SAFER

Para a modelagem dos componentes obtidos por sensoriamento remoto, foram adquiridas imagens do satélite Landsat 8 das órbitas e ponto 222-74 e 223-74, no banco de imagens do *United States Geological Survey*, tendo como critério imagens totalmente livres de nuvens ao longo do período de estudo, totalizando 24 imagens, descritas na Tabela 1.

**Tabela 1 – Imagens do satélite Landsat 8 do período entre 27/06/2016 e 28/06/2018**

Ano	Data	DJ*	DAC**
2016	03/07; 19/07; 04/08; 13/08; 21/09; 23/10	185; 201; 217; 225; 265; 297	6; 22; 38; 47; 86; 118
2017	28/02; 16/03; 01/04; 03/05; 04/06; 06/07; 22/07; 07/08; 04/11	59; 75; 91; 123; 155; 187; 203; 219; 308	246; 262; 278; 310; 342; 09; 25; 41; 130
2018	23/01; 12/03; 19/03; 13/04; 29/04; 06/05; 15/05; 22/05; 23/06	23; 71; 78; 94; 119; 126; 135; 142; 174	210; 258; 265; 290; 306; 313; 322; 329; 361

\* Dia Juliano.

\*\* Dias após o corte da cana-de-açúcar.

Para o cálculo da evapotranspiração pelo algoritmo, aqui denominada  $ET_a$  (evapotranspiração atual), as imagens são processadas com correções georreferenciais, calibrações radiométricas e são inseridas informações biofísicas. Para converter os valores de números digitais do sensor orbital LANDSAT 8 para radiância e reflectância espectral, utilizou-se os coeficientes radiométricos

disponibilizados no arquivo de metadados das imagens para as bandas 2 a 7, 10 e 11, por meio das seguintes equações (CHANDER; MARKHAM, 2003):

$$L\lambda = \left( \frac{L_{max} - L_{min}}{255} \right) Q_{cal} + Q_{min} \quad (2)$$

Em que,  $L\lambda$  é a radiância de cada banda ( $W.m^{-2} .sr^{-1} .\mu m^{-1}$ );  $L_{max}$  é a radiância máxima ( $W.m^{-2} .sr^{-1} .\mu m^{-1}$ );  $L_{min}$  é a radiância mínima ( $W.m^{-2} .sr^{-1} .\mu m^{-1}$ );  $Q_{cal}$  é o valor quantizado e calibrado do pixel em nível de cinza (Número Digital - DN);  $Q_{min}$  é o valor mínimo do pixel em nível de cinza (DN), sendo estes números inteiros variando de 0 a 255.

Para cada banda é calculada a reflectância ( $\rho\lambda$ ) pela seguinte equação:

$$\rho\lambda = \frac{\pi L\lambda}{E_{sun\lambda} \cos Z E_0} \quad (3)$$

Em que,  $L\lambda$  é radiância de cada banda;  $E_{SUN\lambda}$  é irradiância espectral no topo da atmosfera (VAN HELLEMONT; RUDDICK 2014);  $\cos Z$  é o ângulo zenital;  $E_0$  é a razão das distancias Terra-Sol (real e média), que é obtida a partir da seguinte equação:

$$E_0 = 1,000110 + 0,034221 \cos(da) + 0,001280 (da) + 000,719 \cos(2da) + 0,00077 \sin(2da) \quad (4)$$

Em que,  $da$  é o ângulo diário, calculado a partir de:

$$da = (DJ - 1) \frac{2\pi}{365} \quad (5)$$

Em que,  $DJ$  é o dia juliano da imagem.

O albedo no topo da atmosfera foi calculado a partir da equação 6:

$$\alpha_{top} = \sum(\omega\lambda \rho\lambda) \quad (6)$$

Em que,  $\omega\lambda$  é o coeficiente de calibração para cada banda (Equação 7) e  $\rho\lambda$  é a reflectância.

$$\omega\lambda = \frac{E_{sun\lambda}}{\sum E_{sun\lambda}} \quad (7)$$

O albedo de superfície ( $\alpha_0$ ) foi obtido por meio da Equação 8, utilizando os coeficientes a e b propostos por Teixeira (2010), sendo 0,7 e 0,06, respectivamente.

$$\alpha_0 = a \alpha_{top} + b \quad (8)$$

A temperatura de brilho ( $T_{bright}$ ) (K) foi obtida pela seguinte equação:

$$T_{bright} = \frac{1260,56}{\ln\left(\frac{607,76}{L_{thermal}+1}\right)} \quad (9)$$

Em que  $L_{thermal}$  é radiância ( $L\lambda$ ) das bandas 10 (faixa espectral de 10,6 a 11,19  $\mu\text{m}$ ) e 11 (faixa espectral de 11,5 a 12,51  $\mu\text{m}$ ), com resolução espacial de 100 metros. Assim, calculou-se a temperatura de superfície ( $T_0$ ), em Kelvin, conforme a equação 10:

$$T_0 = 1,11 T_{bright} - 31,89 \quad (10)$$

Os dados do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foram obtidos de acordo com a equação representada a seguir:

$$NDVI = \frac{\rho_5 - \rho_4}{\rho_5 + \rho_4} \quad (11)$$

Em que  $\rho_5$  é a reflectância da banda do infravermelho próximo e  $\rho_4$  é a reflectância da banda do vermelho.

A partir dos dados de albedo de superfície, temperatura de superfície e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, o algoritmo SAFER estima a relação  $ET/ET_0$ , conforme é descrito na Equação 12 (TEIXEIRA, 2010):

$$ET/ET_0 = \exp\left[a + b \left(\frac{T_0}{\alpha_0 NDVI}\right)\right] \quad (12)$$

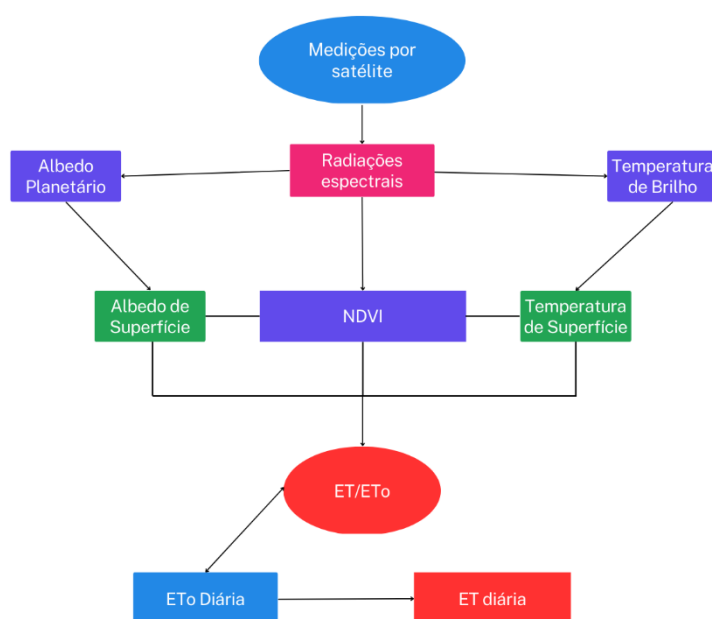
Em que a e b são coeficientes de regressão, utilizados a = 1,0, definido para a região Noroeste de São Paulo (HERNANDEZ et al., 2014), e b = -0,008 obtido originalmente por Teixeira (2010), antes da calibração.

Por fim, os valores da relação ET/ET<sub>o</sub> foram multiplicados pelos valores da evapotranspiração de referência diária (ET<sub>o</sub>) para determinação da evapotranspiração atual (ET<sub>a</sub>) (mm dia<sup>-1</sup>) por meio do algoritmo SAFER, como é demonstrado na Equação 13, representada a seguir:

$$ET_a = \frac{ET}{ET_o} ET_o \quad (13)$$

Um resumo de como é realizado o cálculo da evapotranspiração pelo algoritmo SAFER, é apresentado na Figura 3.

**Figura 3 – Fluxograma esquemático para calcular a evapotranspiração ao aplicar o algoritmo SAFER**



Fonte: TEIXEIRA (2010, p. 1295), adaptado.

Todas as variáveis agrometeorológicas utilizadas neste trabalho foram obtidas nas estações da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista (UNESP, 2022), inclusive a ET<sub>o</sub> calculada pela equação de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998). A RANP - Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista, possui oito estações

agrometeorológicas automáticas, localizadas em sete municípios da região. E tem seus dados disponibilizados de forma livre e gratuita através do site: <https://clima.feis.unesp.br> (UNESP, 2022).

Os dados de sensoriamento remoto foram processados no software Ilwis (3.4) e exportados para o ArcGIS (10.1) para extração dos dados de ETa e ET/ETo.

#### 1.2.4 Calibração do algoritmo SAFER

A calibração do modelo consiste em calcular os novos coeficientes “a” e “b” descritos na Equação 12. Para tal, utilizou-se a abordagem original exposta por Teixeira (2010), em que os valores são os coeficientes da regressão linear que tem como variáveis nos eixos x e y, respectivamente:

$$\frac{T_0}{\alpha_0 NDVI} \quad (14)$$

Em que, T<sub>0</sub> é a temperatura de superfície (K), α<sub>0</sub> é o albedo de superfície e NDVI é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.

$$\ln \frac{ET}{ET_0} \quad (15)$$

Em que, ln = logaritmo neperiano, ET = evapotranspiração calculada pelo *Eddy covariance* e ET<sub>0</sub> é a evapotranspiração de referência da estação agrometeorológica mais próxima da área de estudo, neste trabalho utilizou-se os dados da estação Itapura, SP (UNESP, 2022).

#### 1.2.5 Parâmetros estatísticos

A estimativa dos dados de evapotranspiração pelo SAFER foi realizada duas vezes, antes e após a calibração. Utilizou-se métodos estatísticos como o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>, Equação 16) entre as observações (ET *Eddy covariance*) e estimativas (ETa SAFER), raiz do erro médio quadrático (RMSE, Equação 17) e coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, Equação 18) para avaliar o desempenho do modelo em ambas as condições.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{y})^2} \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (17)$$

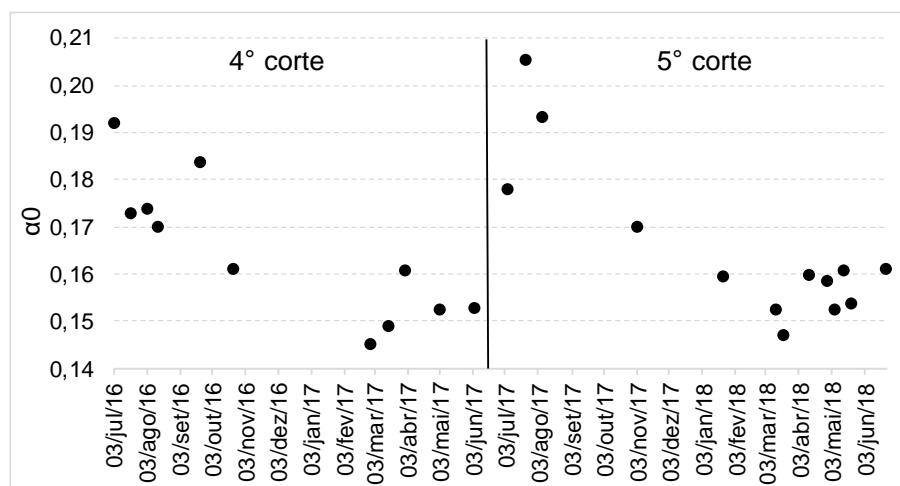
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (18)$$

Em que  $x$  e  $y$  são valores estimados e observados respectivamente, e  $\bar{y}$  e  $\bar{x}$  são as médias dos valores estimados e observados.

### 1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 4, 5 e 6 são apresentados os parâmetros utilizados na modelagem da evapotranspiração através do algoritmo SAFER. O balanço de energia, determina a quantidade de energia disponível para o aquecimento do ar e do solo e principalmente da evapotranspiração das culturas (SILVA, LOPES, AZEVEDO, 2005), e de acordo com Safre (2020) o balanço da radiação é dependente do albedo ( $\alpha_0$ ), temperatura ( $T_0$ ) e NDVI e varia de acordo com o tipo de vegetação e ciclo da cultura, de acordo com seus diferentes estádios vegetativos.

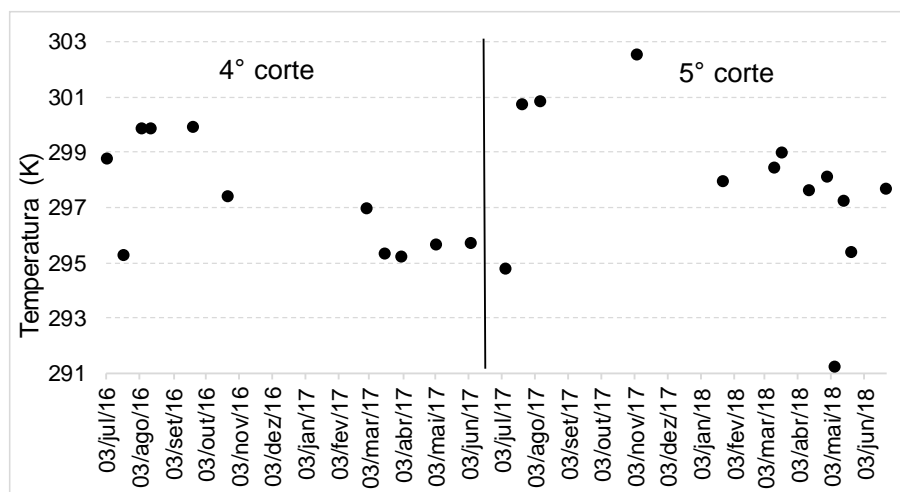
**Figura 4 – Albedo de superfície ( $\alpha_0$ ) da cana-de-açúcar determinado por sensoriamento remoto**



Na Figura 4 são apresentados os valores médios do albedo de toda área. Os valores médios encontrados na área variaram de 14,6 a 20,6% e foram obtidos em 28/02/2017 e 22/07/2017, respectivamente. Esses resultados corroboram com Giongo et al. (2010) que observaram valores de albedo de superfície entre 14,2 e 21,9% para cana-de-açúcar no estado de São Paulo, enquanto Oliveira et al. (2018) encontraram variações de 13 a 18% no mesmo estado.

Na Figura 5 é apresentada a variação da temperatura de superfície para o período dos dois anos de estudo. T0 variou de 291,26 K, em 08/05/2018, a 302,57 K, ocorrido em 04/11/2017. O pico pode estar associado a elevada temperatura do ar na região Noroeste Paulista ocorrida no dia da passagem do satélite, que teve registro de 34,1°C de temperatura máxima na estação agrometeorológica mais próxima da área de estudo (UNESP, 2022), e também pela diminuição da massa verde da cultura, visto que os valores máximos foram observados logo após os cortes. Já os valores mais baixos foram observados nos dias em que o sistema de irrigação foi acionado no talhão de estudo.

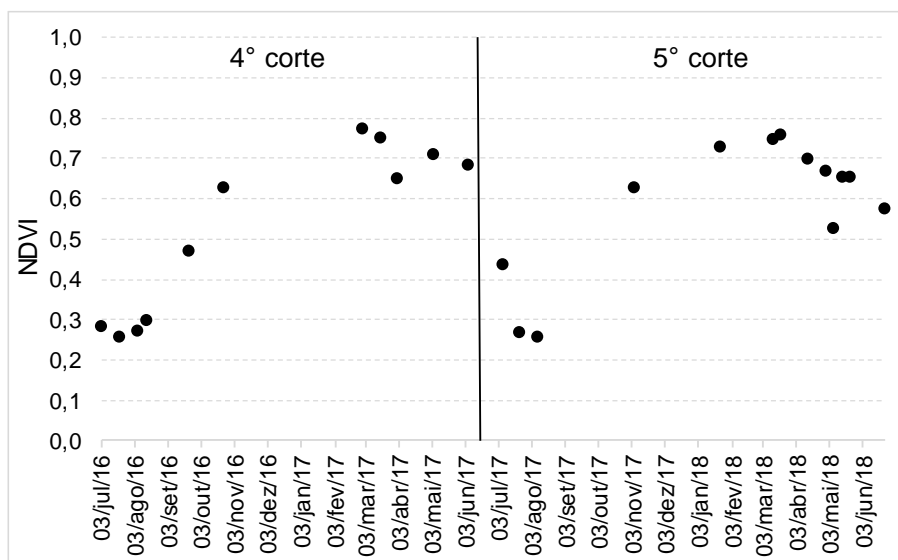
**Figura 5 – Temperatura de superfície da cana-de-açúcar determinada por sensoriamento remoto**



Os valores de NDVI foram similares nas duas safras, com os mais elevados na fase de crescimento máximo da cultura, quando estava totalmente estabelecida e os menores na fase de brotação e perfilhamento. Na safra 2016/17 o menor valor foi de 0,26 e o maior de 0,77. Na safra 2017/18 o menor valor observado foi também de 0,26

e o maior de 0,76 (Figura 6). Dados semelhantes de NDVI em campos de cana-de-açúcar no estado de São Paulo foram encontrados por Fernandes et al. (2017) e Lisboa et al. (2018).

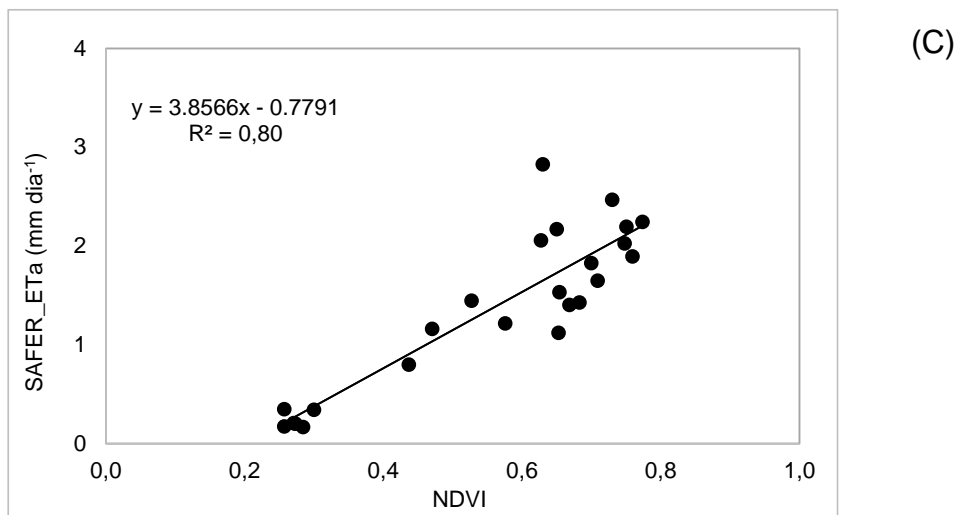
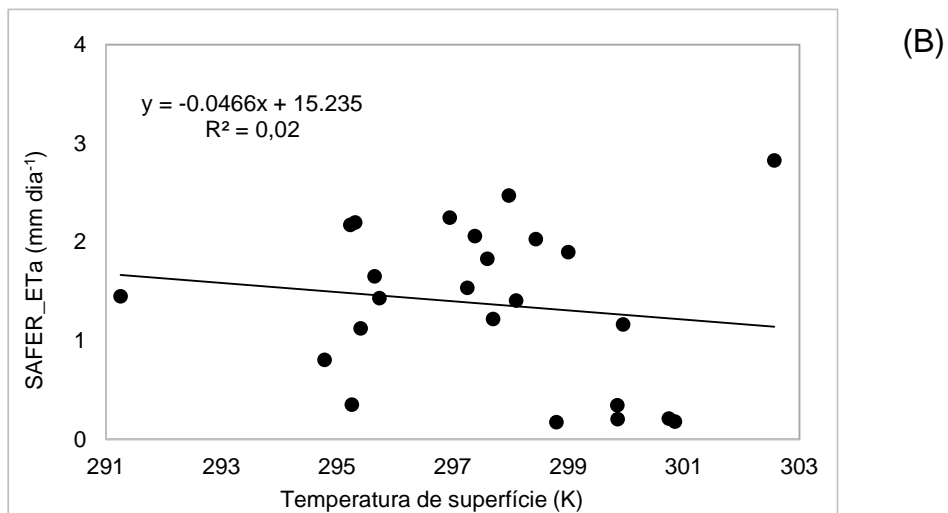
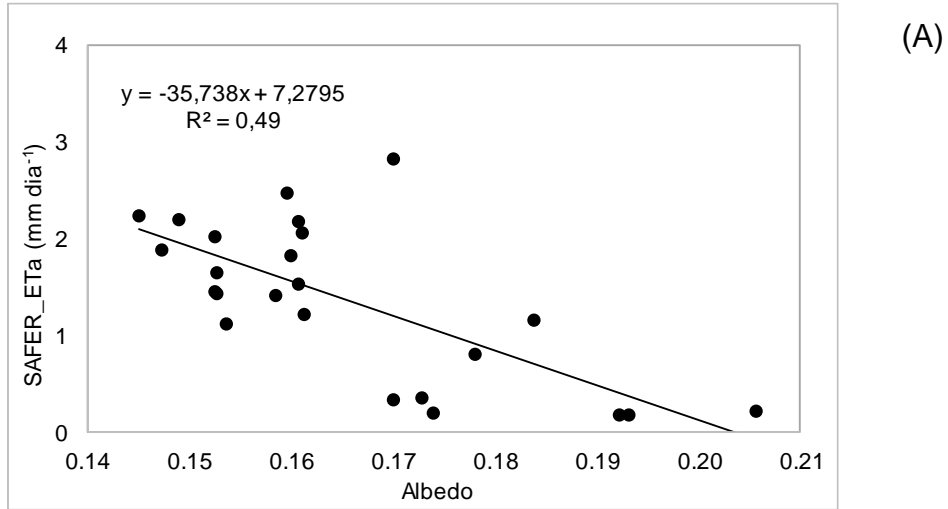
**Figura 6 – NDVI da cana-de-açúcar determinado por sensoriamento remoto**



Observa-se que no início da safra 2016/17, quando a cana-de-açúcar acabara de receber seu corte, o valor de NDVI estava próximo de 0,3 e depois ele decresce para o valor de 0,26 na imagem de satélite seguinte. Essa inconsistência no início do período de crescimento da cana-de-açúcar pode ser explicada por Molijn et al. (2019) que constataram a mesma tendência e afirmam ainda que o NDVI no início da safra não é indicativo de produção ou rendimento final.

As relações entre o  $\alpha_0$ ,  $T_0$  e NDVI e a ETa determinada pelo SAFER estão apresentadas na Figura 7. Observa-se que a relação dos dados de ETa estimados pelo algoritmo com a temperatura de superfície é inexistente (Figura 7B). Para os dados de albedo (Figura 7A) e NDVI (Figura 7C) o valor de  $R^2$  foi de 0,49 e 0,80, respectivamente. Assim, pode-se dizer que o modelo de regressão linear se ajusta bem aos dados de ETa e NDVI, tendo uma tendência positiva, ou seja, ao aumentar o NDVI da vegetação, a ETa também aumenta. Uma possível explicação é que uma cultura com vegetação saudável e disponibilidade de água no solo, absorve a luz vermelha nos pigmentos de clorofila enquanto refletem a radiação infravermelha próxima, aumentando sua taxa transpirativa, consequentemente a evapotranspiração entre a superfície e a atmosfera (SAFRE, 2022).

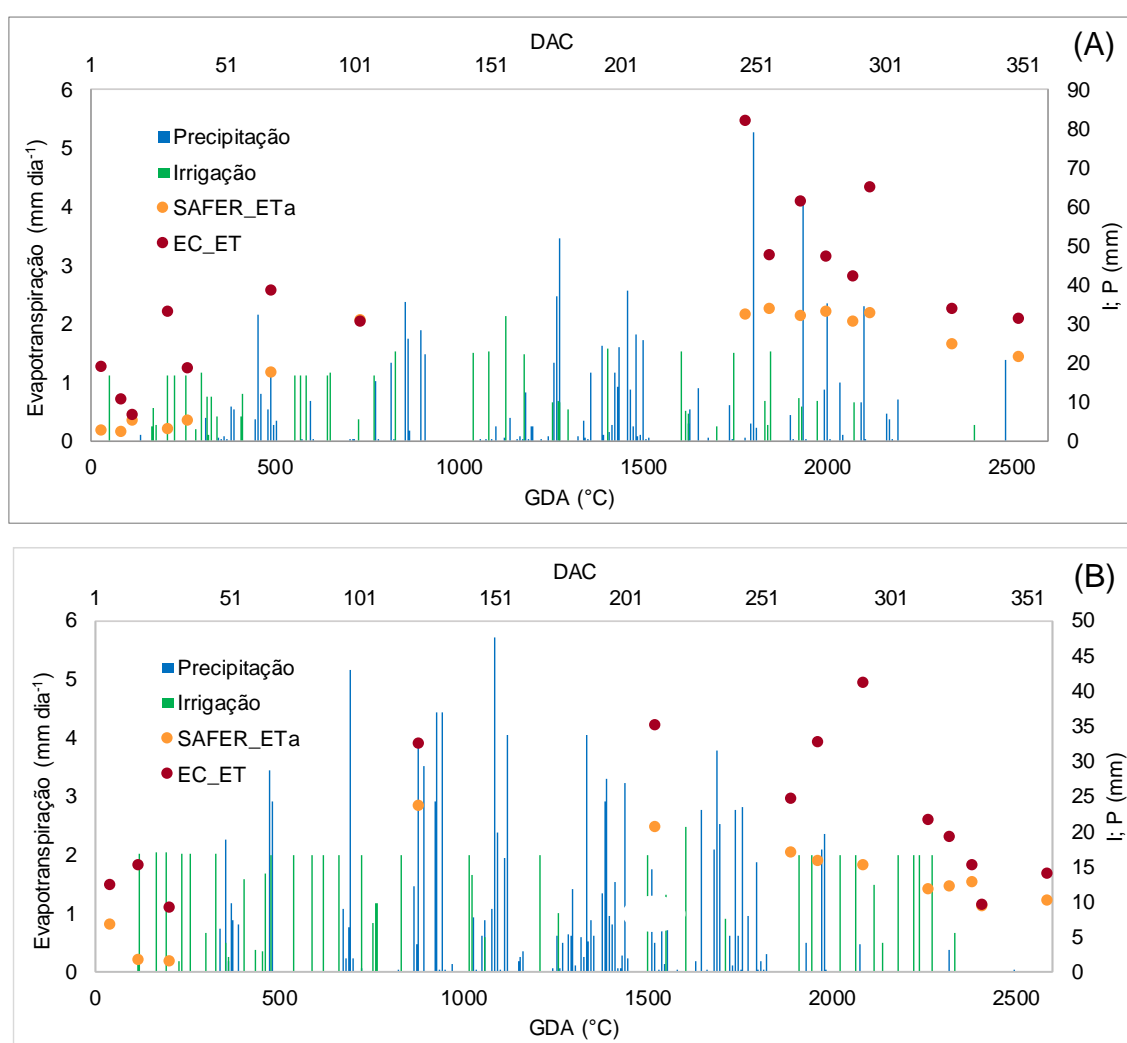
**Figura 7 – Relação entre albedo de superfície (A), temperatura de superfície (B), NDVI (C) e evapotranspiração atual pelo algoritmo SAFER (SAFER\_ETa)**



Besten et al. (2021) citam que o NDVI pode ser usado como base para um fator de ajuste nos cálculos de estimativa de evapotranspiração máxima da cultura da cana-de-açúcar.

As Figuras 8A e 8B mostram as variações da evapotranspiração estimada pelo SAFER (ETa) e pelo método *Eddy covariance* (EC\_ET) no quarto e quinto corte da cana-de-açúcar, respectivamente, assim como a quantidade de água recebida em cada safra, por meio da chuva e irrigação ao longo de seus graus-dia acumulados (GDA), em que foi utilizado a temperatura basal de 18°C.

**Figura 8 – Evapotranspiração estimada pelo SAFER (SAFER\_ETa) e pelo *Eddy covariance* (EC\_ET), precipitação (P) e Irrigação (I) nas safras 2016/17 (A) e 2017/18 (B) em cana-de-açúcar com base em graus-dia acumulados (GDA) e dias após o corte (DAC)**



Nota-se que embora as estimativas de ETa SAFER e EC\_ET no gráfico sigam a mesma tendência, há uma subestimativa da lâmina evapotranspirada estimada pelo algoritmo SAFER.

Enquanto, para os dois anos de dados, o valor máximo de ET estimada pelo EC nos dias de passagem do satélite foi de 4,94 mm dia<sup>-1</sup>, o SAFER estimou apenas 2,83 mm dia<sup>-1</sup>, corroborando com Oliveira et al. (2019). Já outros autores, observaram até 4,5 mm dia<sup>-1</sup> de evapotranspiração atual em cana irrigada pelo sistema pivô central no Noroeste Paulista, utilizando o mesmo algoritmo (OLIVEIRA et al., 2021).

Segundo Sales et al. (2018) o SAFER subestima a evapotranspiração quando há pouca cobertura vegetal sobre o solo, baixando os valores de NDVI e aumentando a T0, tendo como resultado baixos valores de R<sup>2</sup> e ETa. No entanto, observa-se em diversos trabalhos que a subestimativa dos dados não se dá apenas no início do ciclo das culturas e a sugestão de calibração regional dos coeficientes da equação 12 já vem sendo proposta por vários autores, como Souza (2016), Venancio (2019) e Safre (2022).

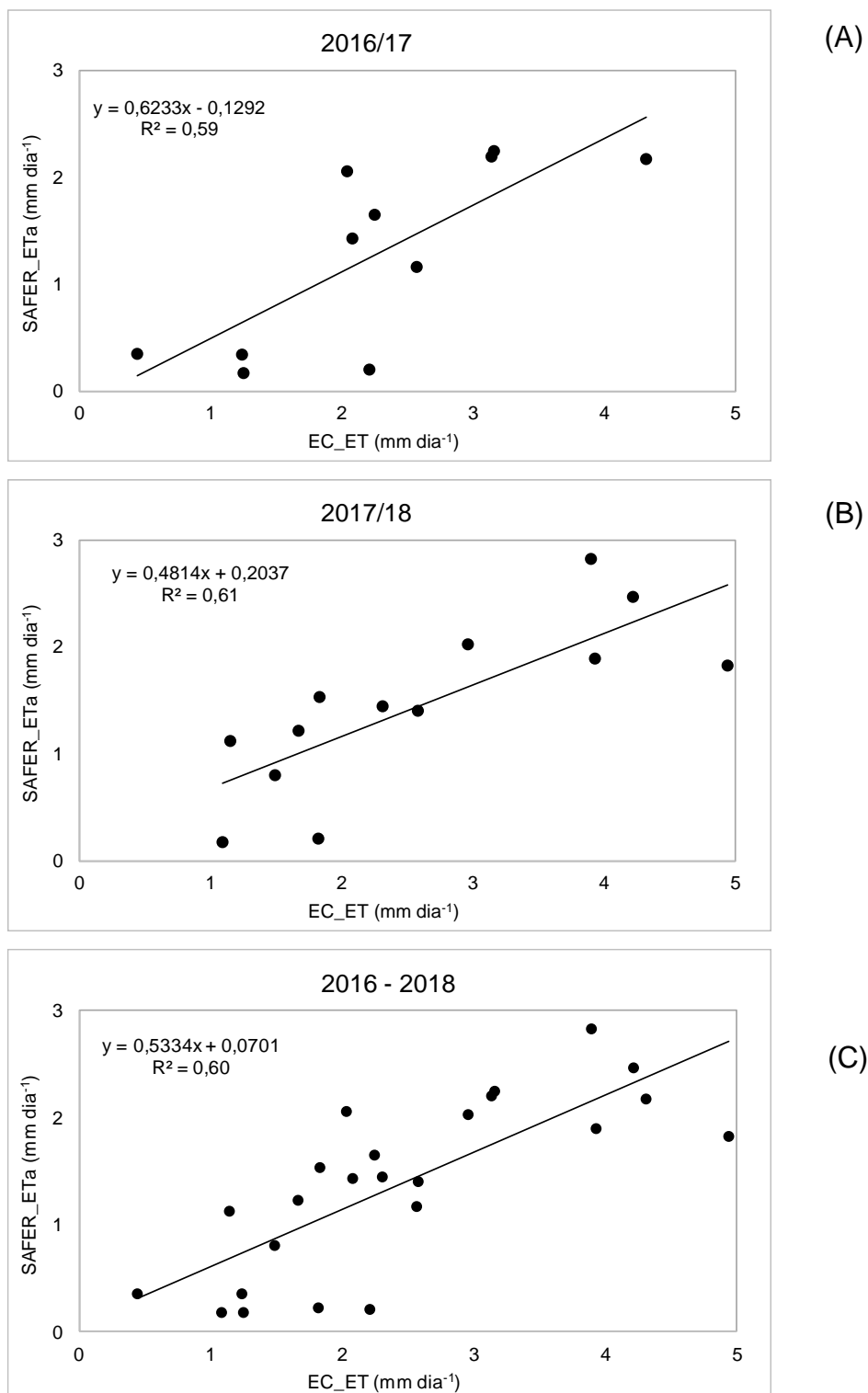
A área registrou uma precipitação total de 987 mm na safra 2016/17 e 975 mm na safra 2017/18. Além disso, recebeu 585 mm de água pelo sistema de irrigação no 4° corte e 560 mm no 5°, totalizando 1572 mm no primeiro ano deste estudo e 1535 mm no segundo. O volume total de irrigação mais precipitação anual para ambas as safras foi superior ao total de evapotranspiração. No entanto, como a região é caracterizada por volumosas chuvas de novembro a março e déficit hídrico nos outros meses (SILVA JUNIOR et al., 2018), e o armazenamento de água no solo é limitado, a área de estudo enfrentou deficiência hídrica durante parte do cultivo, mesmo com sistema de irrigação instalado.

Trata-se de área comercial, como detalhado nos trabalhos de Avilez (2018) e Bispo (2020), com o gotejamento subsuperficial não sendo capaz de atender toda a demanda evapotranspirativa da cultura, especialmente na fase de grande crescimento, levando ao déficit hídrico no solo, contribuindo para valores baixos de evapotranspiração, visto que, armazenamento de água no solo abaixo do crítico, pode limitar a capacidade evapotranspirativa das culturas.

Na Figura 9 é apresentada a regressão linear entre os valores da ETa estimada pelo SAFER e as medições do sistema *Eddy covariance*. Para a safra 2016/17 o valor de R<sup>2</sup> foi de 0,59 enquanto para a safra 2017/18 foi de 0,61 e utilizando os dois anos

de dados, obteve-se  $R^2$  igual a 0,6. Ainda que exista uma correlação positiva entre os dados, o SAFER subestima os valores de ET, como já citado anteriormente.

**Figura 9 – Relação entre a ETa determinada pelo SAFER e a ET *Eddy***  
**Covariance antes da calibração**



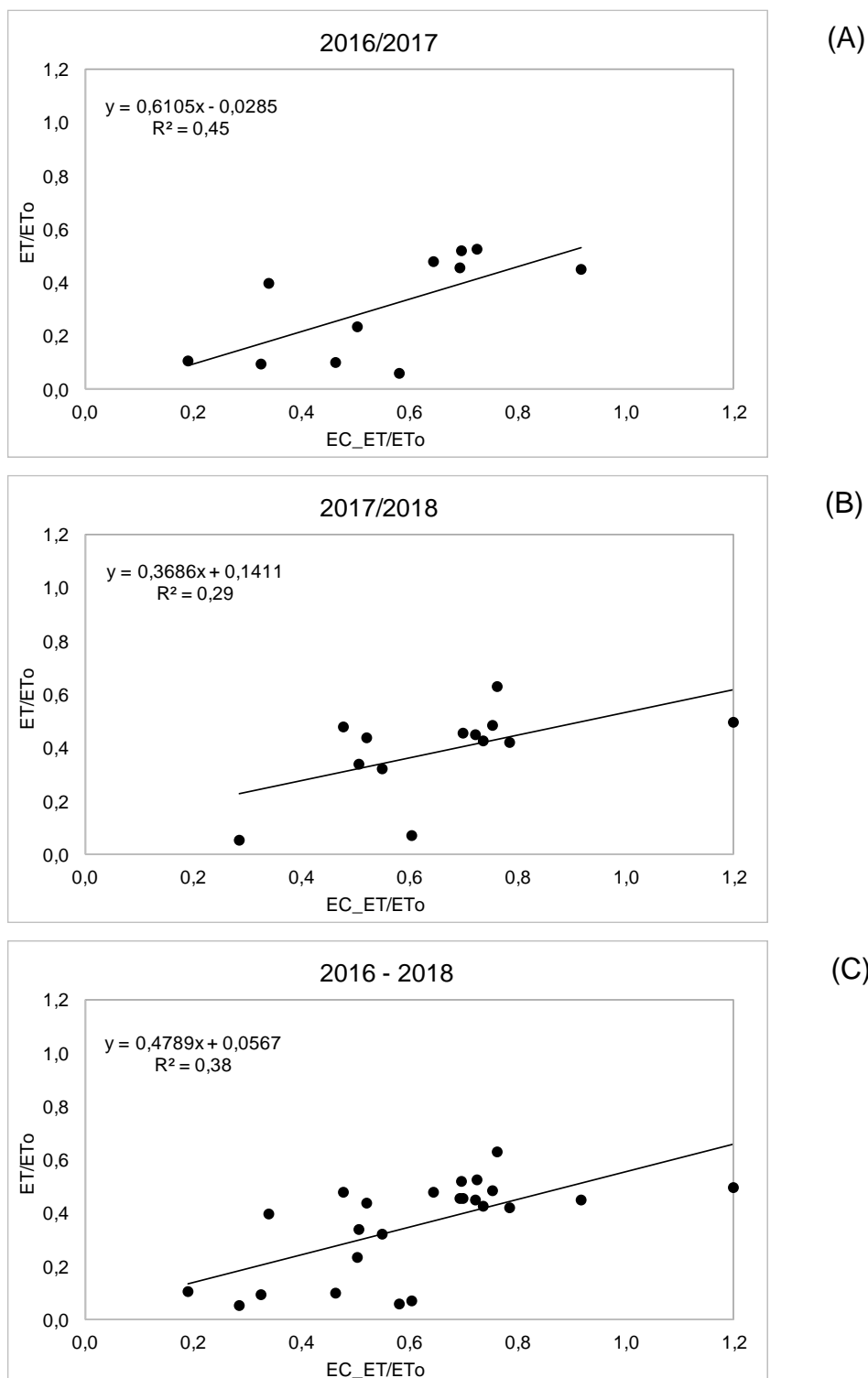
Em relação aos outros parâmetros estatísticos, observou-se um RMSE de 1,3 mm dia<sup>-1</sup>. A determinação do RMSE na comparação de estimativa de ET por algoritmos e por outros métodos vem sendo utilizada por vários autores, como Paço et al. (2014) e Silva et al. (2018), sendo considerado um RMSE satisfatório quando os resultados atingidos são inferiores a 1 mm dia<sup>-1</sup>.

O coeficiente de NSE varia entre  $-\infty$  e 1, sendo valores menores que 0 indicativos de que a média é um melhor preditor que o modelo, e um modelo com eficiência ótima tem coeficiente de valor 1 (GUPTA, SOROOSHIAN, YAPO, 1999). Portanto, nessas condições, a estimativa de ETa pelo algoritmo SAFER não atingiu valores significativos, já que o NSE encontrado foi de -0,28.

Miranda et al. (2017) observaram R<sup>2</sup> de 0,85 em escala diária entre os dados do SAFER e torre de fluxo em áreas de vegetação de caatinga. Entretanto, Ramos (2018) obteve um R<sup>2</sup> de 0,02 ao comparar a evapotranspiração do SAFER com torre micrometeorológica na cultura da cana-de-açúcar na região do Vale São Francisco, e a mesma subestimativa de dados foi apontada pelo autor. Fato inusitado, visto que o SAFER foi desenvolvido originalmente na região Nordeste, porém em áreas de estudo de frutíferas e caatinga (TEIXEIRA, 2010). Assim, devido às inconsistências encontradas na aplicação do SAFER, mesmo na mesma região, nota-se a possibilidade de o algoritmo precisar ser calibrado conforme a cultura aplicada, além do local de estudo.

A relação entre os dados da relação ET/ETo determinada pelo SAFER e calculada pela torre (EC\_ET/ETo) é apresentada na Figura 10. Foram encontrados valores de R<sup>2</sup> de 0,45 na safra de 4° corte, 0,29 no 5° corte, e 0,38 ao utilizar toda a massa de dados.

**Figura 10 - Relação entre a relação ET/ET<sub>o</sub> determinada pelo SAFER e a mensurada em campo antes da calibração**



Percebe-se que assim como a ET<sub>a</sub>, os valores da relação ET/ET<sub>o</sub> foram subestimados pelo algoritmo. Apenas na safra 2017/18 o valor máximo de 1,2 recomendado pelo Boletim FAO 56 (Allen et al., 1998) foi atingido pela relação

calculada na torre EC nos dias de imagens analisadas. Este é mais um possível indicativo de que a umidade no solo não foi adequada durante todo o período de crescimento da cultura, já que para o coeficiente de cultivo atingir seu máximo, a vegetação não pode sofrer restrições hídricas, fitossanitárias ou nutricionais. Os valores de RMSE e NSE foram 0,04 e -1,12, respectivamente.

Em pesquisa realizada com tomateiro industrial em Goiás, Sales et al. (2017) encontraram valores de  $R^2$  entre a relação ET/ET<sub>o</sub> do SAFER e método padrão FAO 56 de 0,98, declarando forte correlação entre os métodos. Já Da Silva et al. (2018), trabalhando com citros no Noroeste Paulista, evidenciaram a subestimativa da relação ET/ET<sub>o</sub> do algoritmo quanto comparada ao Boletim 56, e indicam a necessidade de mais estudos sobre o assunto. Em contrapartida, trabalhos como o de Marin et al. (2019) sugerem que os coeficientes de cultivo recomendados por Allen et al. (1998) devem ser revisados para fins de manejo de irrigação.

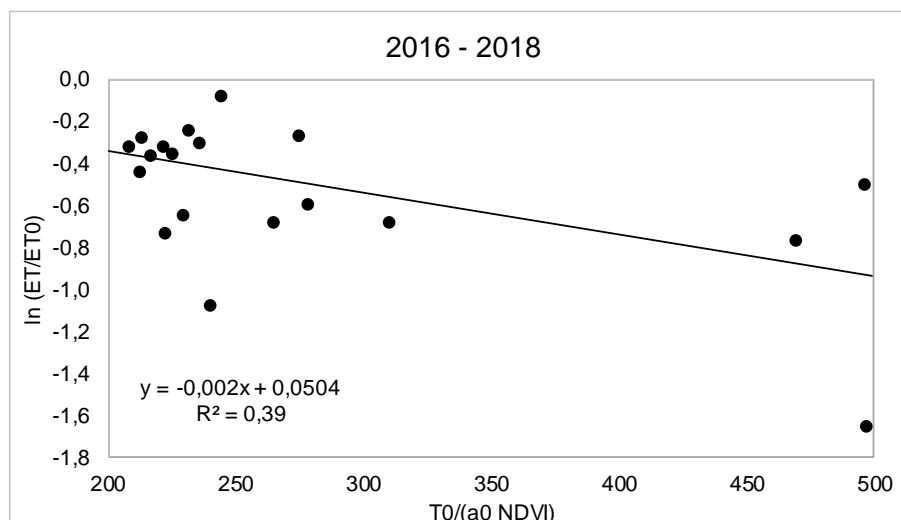
### 1.3.1 Calibração dos coeficientes “a” e “b”

Utilizando a metodologia proposta por Teixeira (2010) e detalhada nas equações 14 e 15 do presente trabalho, uma regressão linear foi implementada para determinação dos coeficientes “a” e “b” da equação 12. Foram utilizados todos os dados disponíveis dos dois anos de estudo para determinação. As variáveis apresentaram valor de  $R^2$  igual a 0,39. Os coeficientes determinados foram “a” igual a 0,05 e “b” de valor -0,002, como pode ser observado na Figura 11.

De forma empírica, Venâncio (2019) encontrou valores dos coeficientes “a” e “b” de 0,32 e -0,0013, respectivamente, para o SAFER na cultura do milho no Oeste do estado da Bahia. Também sem medidas de campo, Hernandez et al. (2014) propuseram o valor de 1,0 para o coeficiente “a” na região Noroeste Paulista, como foi utilizado na primeira parte desse trabalho.

Utilizando o sistema *Eddy covariance* para calibração do SAFER em campos de uva na Califórnia (EUA), Safre (2022) determinou os coeficientes de valor “a” igual a 0,1382 e “b” igual a -0,002. Lopes et al. (2021) utilizando para calibração o método da razão em Bowen ajustou os coeficientes para 0,55 e -0,0028, “a” e “b” respectivamente, nas culturas de inverno no Cerrado brasileiro.

**Figura 11 – Calibração dos coeficientes do algoritmo SAFER utilizando medições de satélite e dados de campo**

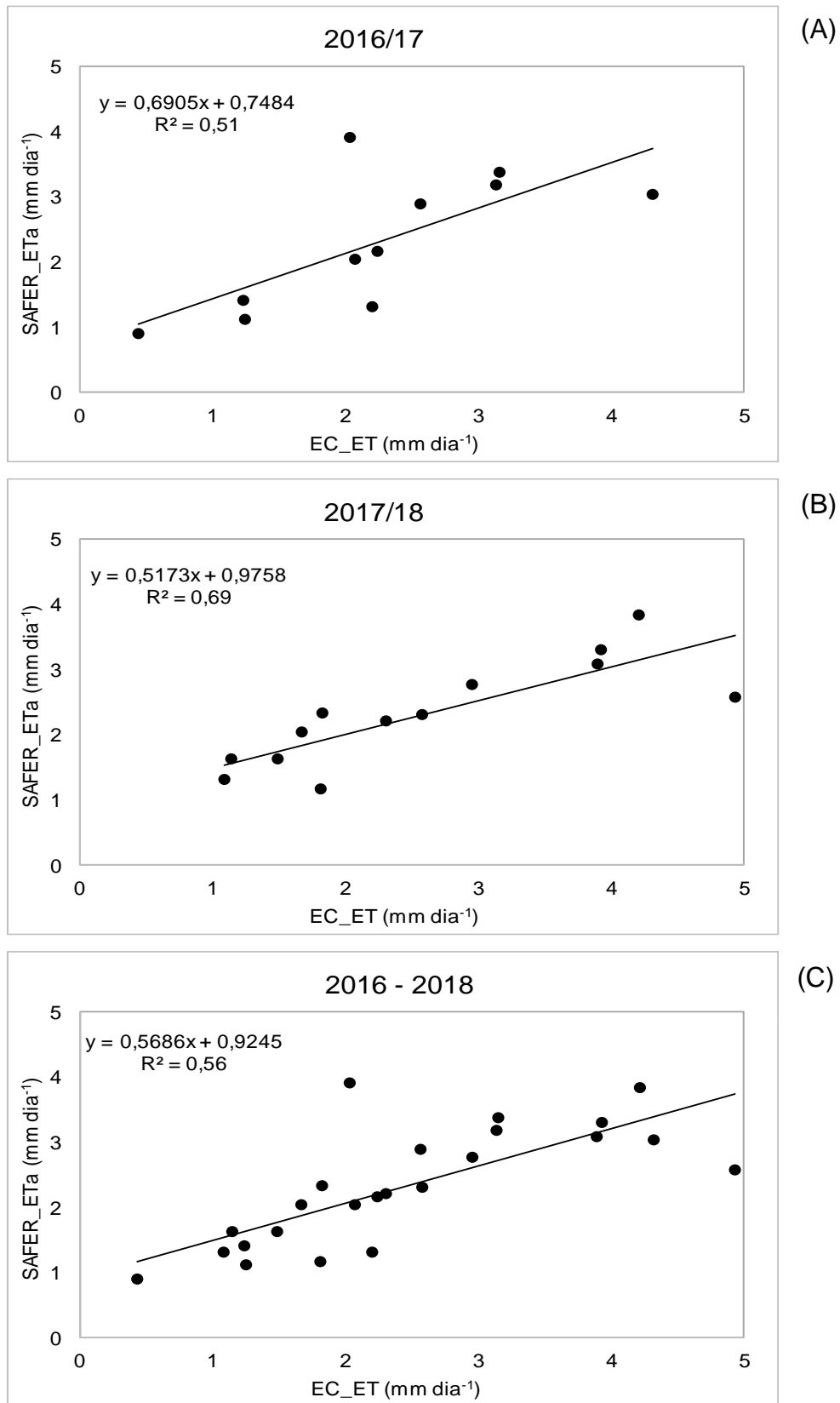


Na Figura 12 é apresentada a regressão entre os valores de evapotranspiração mensurados pelo EC e determinados pelo SAFER após calibração. O valor de  $R^2$  foi determinado em 0,56 para os dados totais. Já para a safra de quarto corte da cana-de-açúcar o  $R^2$  caiu de 0,59 para 0,51. Porém na safra 2017/18 os dados tiveram um melhor ajuste, passando de 0,61 para 0,69. Ressalva-se que mesmo após a calibração, os dados não atingirem valores de  $R^2$  próximos de 1, pode ser devido a quantidade de imagens de satélite utilizadas neste estudo.

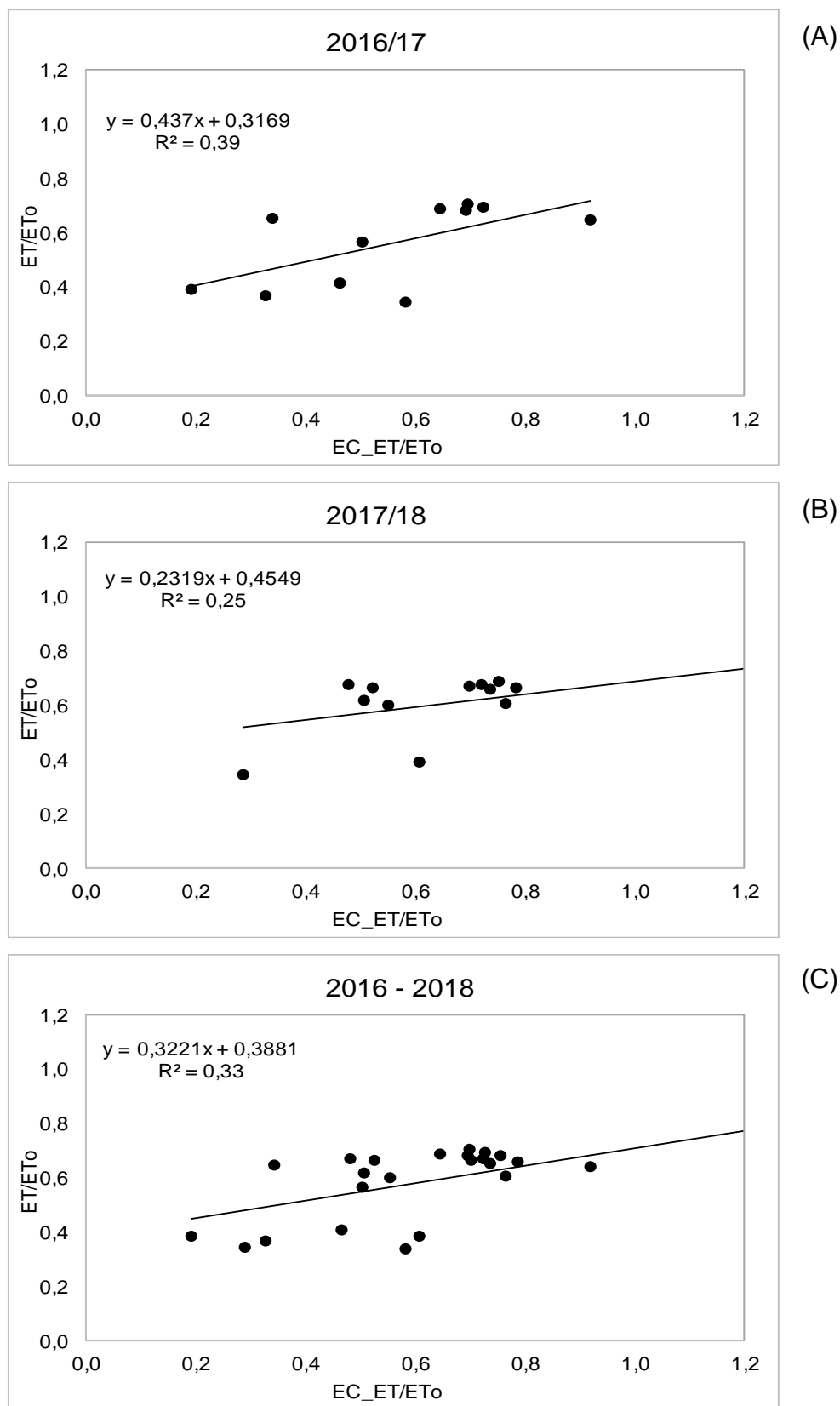
Ao total foi possível utilizar 24 imagens do Landsat no período estudado enquanto alguns autores sugerem uma amostra mínima de 40 unidades para estimar precisamente uma relação entre variáveis. Este é um problema recorrente ao se trabalhar com sensoriamento remoto, pois fica-se dependente das condições de sombreamento por nuvens sobre a área de estudo no momento da passagem do sensor orbital.

Já os dados da relação ET/ET<sub>0</sub> determinados pelo SAFER após a calibração e mensurados em campo estão apresentados na Figura 13.

Figura 12 – Relação entre ETa determinada pelo SAFER e ET *Eddy Covariance* após calibração dos coeficientes “a” e “b”



**Figura 13 – Relação entre a relação ET/ET<sub>o</sub> determinada pelo SAFER e a mensurada em campo após calibração**



Para os dados de evapotranspiração atual (Figura 12C), o valor do RMSE foi de  $0,77 \text{ mm dia}^{-1}$ , mostrando um melhor ajuste nos dados após a calibração. Já o coeficiente NSE atingiu 0,55, resultado considerado satisfatório de acordo com Moriasi et al. (2007). Ao calibrar o SAFER para a região da Califórnia, Safre (2022) encontrou coeficientes estatísticos semelhantes a este trabalho, com RMSE igual a  $0,7 \text{ mm dia}^{-1}$  e NSE igual a 0,56. Já Lopes et al. (2021) obtiveram RMSE de  $0,77 \text{ mm dia}^{-1}$  na cultura do feijão e  $0,58 \text{ mm dia}^{-1}$  para os campos de trigo no cerrado brasileiro.

No que se refere à relação ET/ET<sub>o</sub> (Figura 13) Os valores de R<sup>2</sup> ao se utilizar dados dos dois anos (13C) ficaram abaixo daqueles encontrados antes da calibração, porém, seguindo o mesmo que ocorreu com a ET<sub>a</sub>, os valores de RMSE e NSE foram mais satisfatórios, sendo 0,01 e 0,31, respectivamente, após o ajuste dos coeficientes “a” e “b”.

#### 1.4 CONCLUSÃO

Os valores de evapotranspiração atual e relação ET/ET<sub>o</sub> estimados pelo algoritmo SAFER foram inferiores àqueles mensurados em campo pelo sistema *Eddy covariance*, na cultura da cana-de-açúcar na região Noroeste Paulista.

Foram determinados novos coeficientes “a” e “b” para o algoritmo, sendo 0,05 e -0,002, respectivamente. O algoritmo SAFER na estimativa de ET, após a calibração de seus coeficientes, obteve valores de RMSE de  $0,77 \text{ mm dia}^{-1}$  e NSE igual a 0,56.

Enfatiza-se que o SAFER é uma ferramenta útil para estimativa da evapotranspiração em escala regional. Porém é necessária a continuidade de estudos relacionados a aplicação e calibração dessa técnica em localidade e/ou cultura de interesse.

#### REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

AUBINET, M.; VESALA, T.; PAPALE, D. *Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis*: **Springer Science & Business Media**, 2012. 438 p.

AVILEZ, A. M. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; BISPO, R. C.; GIOVANELLI, L. B. Necessidade hídrica da cana-de-açúcar no Noroeste Paulista. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial 30 anos PG Irriga, v.1, n.1, p.171-188, 2018.

BASTIAANSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRAM, H.; DAVIDS, G.; THORESON, B. P.; ALLEN, R. G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 131, n. 1, p. 85-93, 2005.

BESTEN, N. I.; KASSING, R. C.; MUCHANGA, E.; EARNSHAW, C.; JEU, R. A. M.; KARIMI, P.; VAN DER ZAAG, P. A novel approach to the use of earth observation to estimate daily evaporation in a sugarcane plantation in Xinavane, Mozambique. **Physics and Chemistry of the Earth**, n. 124 (102940), p. 1-11, 2021.

BISPO, R. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; GONÇALVES, I. Z.; NEALE, C. M. U.; TEIXEIRA, A. H. C. Remote sensing based evapotranspiration modeling for sugarcane in Brazil using a hybrid approach. **Agricultural Water Management**, v. 271 (107763), p. 1-10, 2022.

BISPO, R. C. **Medições e modelagem da evapotranspiração em cana-de-açúcar no Noroeste Paulista**. 2020, 94f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2020.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. **Ieee Transactions On Geoscience And Remote Sensing**, Piscataway, v.41, n.11, p.2674-2677, 2003

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTCIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, Brasília, DF, v. 11, n. 4, abril 2024.

DALRI, A. B.; CRUZ, R. L., GARCIA, C. J. B.; DUENHAS, L. H. Irrigação por gotejamento subsuperficial na produção e qualidade de cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 1, p. 1-11, janeiro-março, 2008.

FERNANDES, J. L.; EBECKEN, N. F. F.; ESQUERDO, J. C. D. M. Sugarcane yield prediction in Brazil using NDVI time series and neural networks ensemble. **International Journal Of Remote Sensing**, 2017, v. 38, n. 16, p. 4631-464, 2017.

GIONGO, P. R.; MOURA, G. B. A.; SILVA, B. B.; ROCHA, H. R.; MEDEIROS, S. R. R.; NAZARENO, A. C. Albedo à superfície a partir de imagens Landsat 5 em áreas de cana-de-açúcar e cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.3, p.279-287, 2010.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. **Journal of Hidrologic Engineering**, [s.l.] [s.n.], p. 135-143, 1999.

HERNANDEZ, F. B. T.; NEALE, C. M. U.; TEIXEIRA, A. H. C.; TAGHVAEIAN, S. Determining large scale actual evapotranspiration using agro-meteorological and remote sensing data in the Northwest of Sao Paulo State, Brazil. **Acta Horticulturae**, [s. l.], v.1038, p.263-270, 2014.

LISBOA, I. P.; DAMIAN, J. M.; CHERUBIN, M. R.; BARROS, P. P. S.; FIORIO, P. R.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Prediction of Sugarcane Yield Based on NDVI and Concentration of Leaf-Tissue Nutrients in Fields Managed with Straw Removal. **Agronomy**, v. 8, n.9, p.196, 2018. DOI: 10.3390/agronomy8090196

LI, S. E.; KANG, S. Z.; LI, F. S.; ZHANG, L. Evapotranspiration and crop coefficient of spring maize with plastic mulch using *eddy covariance* in northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 95, n.11, p. 1214-1222, 2008.

LOPES, J. D.; RODRIGUES, L. N.; SHERER-WARREN, M.; DE PAULA, A. C. P.; FERREIRA, T. R. Performance of the SAFER model in estimating actual evapotranspiration of wheat and bean irrigated crops in the central brazilian savannah. **Irriga**, Botucatu, v. 26, n. 3, p. 476-489, julho-setembro, 2021.

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; NASSIF, D. S. P.; VIANNA, M. S.; PILAU, F. G.; DA SILVA, E. H. F. M.; SOBENKO, L. R.; GONÇALVES, A. O.; PEREIRA, R. A. A.; CARVALHO, K. S. Revisiting the crop coefficient-reference evapotranspiration procedure for improving irrigation management. **Theoretical and Applied Climatology**, [s.l.], [s.n.], p. 1-9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02940-7>

MIRANDA, R. D. Q.; GALVÍNCIO, J. D.; MOURA, M. S. B.; JONES, C. A.; SRINIVASAN, R. Reliability of MODIS evapotranspiration products for heterogeneous dry forest: a study case of Caatinga. **Advances in Meteorology**, [S.L.], v. 2017, n. 14, p. 1-14, 2017.

MOLIJN, R. A., IANNINI, L., VIEIRA ROCHA, J., HANSSEN, R. F. Sugarcane productivity mapping through C-Band and L-Band SAR and optical satellite imagery. **Remote Sensing**, v. 11, n.9: 1109, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11091109>

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantifications of accuracy in watershed simulations. Transaction of the **American Society Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

OLIVEIRA, B. S.; MORAES, E. C.; CARRASCO-BENAVIDES, M.; BERTANI, G.; MATAVELI, G. A. V.; Improved Albedo Estimates Implemented in the METRIC Model for Modeling Energy Balance Fluxes and Evapotranspiration over Agricultural and Natural Areas in the Brazilian Cerrado. **Remote Sensing**, v. 10 (1181), p. 1-27, 2018. DOI: 10.3390/rs10081181

OLIVEIRA, D. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; BISPO, R. C.; GOMES, R. N.; TEIXEIRA, A. H. C. Estimativa da demanda de água da cultura da cana-de-açúcar irrigada utilizando sensoriamento remoto. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial - Inovagri, v. 1, n. 4, p. 678-686, dezembro, 2021.

OLIVEIRA, D. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; BISPO, R. C.; TEIXEIRA, A. H. C. Aplicação do algoritmo SAFER para determinação da evapotranspiração em canais irrigados por diferentes sistemas. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial Inovagri - notas técnicas, v. 1, n. 1, p. 1-7, outubro, 2019.

PAÇO, T. A., PÔÇAS, I., CUNHA, M., SILVESTRE, J. C., SANTOS, F. L., PAREDES, P., PEREIRA, L. S. Evapotranspiration and crop coefficients for a super intensive olive orchard. An application of SIMDualKc and METRIC models using ground and satellite observations. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 2067-2080, 2014.

PAUWELS, V. R. N.; SAMSON, R. Comparison of different methods to measure and model actual evapotranspiration rates for a wet sloping grassland. **Agricultural Water Management**, v. 82, p. 1-24, 2006.

RAMESH, P. Effect of different levels of drought during the formative phase on growth parameters and its relationship with dry matter accumulation in sugarcane. **Journal Agronomy and Crop Science**, v.185, p.83-89, 2000.

RAMOS, R. R. D. **Aplicação do Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving (SAFER) para a cana-de-açúcar no submédio do Vale do São Francisco Brasil**. 2018. 61 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2018.

ROLIM, G. S.; CAMARGO, M. B. P.; LANIA, D. G.; MORAES, J. F. L. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 66, n. 4, p. 711-720, 2007.

SAFRE, A. L. S. **Evapotranspiration and soil moisture estimation using different remote sensing platforms**. 2022, 114f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2022.

SALES, D. L. A.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W.; SOUZA, J. M. F. Estimativa de evapotranspiração e coeficiente de cultura do tomateiro industrial utilizando o algoritmo SAFER. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 3, p. 629-640, julho-setembro, 2017

SANTOS, G. O.; HERNANDEZ, F. B. T.; ROSSETTI, J. C. Balanço hídrico como ferramenta ao planejamento agropecuário para a região de Marinópolis, Noroeste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 4, n. 3, p. 142-149, 2010.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Embrapa, 5ª ed., Brasília, 2018, 356 p.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5 TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.13, n.2, p.201-211, 2005.

SILVA, B. B., MERCANTE, E., BOAS, M. A. V., WRUBLACK, S. C., OLDONI, L. V. Satellite-based ET estimation using Landsat 8 images and SEBAL model. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 49, n. 2, p. 221-227, 2018.

SILVA JUNIOR, J. F.; HERNANDEZ, F. B. T.; SILVA, I. P. F.; REIS, L. S.; TEIXEIRA, A. H. C. Estabelecimento dos meses críticos para a agricultura irrigada a partir do estudo do balanço hídrico. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, Tupã, v. 12, n. 2, p. 122- 131, 2018.

SILVA, Y. F.; FISCHER FILHO, J. A.; COELHO, A. P.; BARBOSA, A. M.; ÁGUAS, T. H.; ZANINI, J. R. HERNANDEZ, F. B. T. Comparação de modelagem espacial na cultura do citros. **Revista Ingeniería y Región**, v. 20, p. 95-102, 2018.

SOUZA, J. M. F.; JÚNIOR, J. A.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; MESQUITA, M. Validação do modelo SAFER na estimativa da evapotranspiração da cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v. 25, n. 2, p. 247-262, abril-junho, 2020.

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

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: George G. Petropoulos. (Org.). **Remote Sensing of Energy Fluxes and Soil Moisture Content**. 1ed. Boca Raton, Florida: CRC Group, Taylor and Francis, p. 169 - 191, 2014.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; SHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. **Modelagem espaçotemporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido brasileiro**. Documentos, 99, Campinas: EMBRAPA Monitoramento por Satélite. 2013. 32p.

UNESP - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. **Canal Clima UNESP Ilha Solteira**. Ilha Solteira - SP, 2022. Disponível em: <<http://clima.feis.unesp.br>>. Acesso em: 19 out. 2022

VANHELLEMONT, Q.; RUDDICK, K. Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 145, [S.N.], p. 105-115, 2014.

VENANCIO, L. P. **Remote sensing approaches for evapotranspiration and yield estimations on irrigated corn fields**. 2019, 155f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

WILSON, K. B.; HANSON, P. J.; MULHOLLAND, P. J.; BALDOCCHI, D. D.; WULLSCHLEGER, S. D. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, *Eddy covariance* and catchment water balance. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 106, n.2, p. 153-168, 2001.

## CAPÍTULO 2

### AJUSTE DO ALGORITMO SAFER PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DO MILHO NO NOROESTE PAULISTA

#### RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo ajustar os coeficientes do algoritmo SAFER (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving*) a fim de estimar a evapotranspiração da cultura do milho na região Noroeste Paulista. Para isso, foram utilizados dados in situ provenientes do método *Eddy covariance* combinados com dados dos sensores orbitais do Landsat 8 e do Sentinel 2. A pesquisa foi realizada durante duas safras (2019 e 2020) no município de Santo Antônio do Aracanguá, SP. O coeficiente “a” do algoritmo SAFER foi determinado em 1 para ambos os satélites, enquanto o coeficiente “b” foi de -0,003 para o Landsat 8 e -0,0002 para o Sentinel 2. A estimativa da evapotranspiração pelo SAFER teve valores de RMSE de 1,0 mm dia<sup>-1</sup> para o satélite Landsat 8 e 0,8 mm dia<sup>-1</sup> para o Sentinel 2, e NSE de 0,55 e 0,87 para o Landsat e Sentinel, respectivamente.

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto, *Eddy covariance*, Zea mays L., pivô central

#### ABSTRACT

The present study aimed to adjust the coefficients of the SAFER algorithm (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving*) in order to estimate the evapotranspiration of corn crops in the Northwestern region of São Paulo. For this purpose, in situ data from the *Eddy covariance* method combined with data from the orbital sensors of Landsat 8 and Sentinel 2 were used. The research was conducted over two crop seasons (2019 and 2020) in the municipality of Santo Antônio do Aracanguá, SP. The coefficient "a" of the SAFER algorithm was determined as 1 for both satellites, while the coefficient "b" was -0.003 for Landsat 8 and -0.0002 for Sentinel 2. The estimation of evapotranspiration by SAFER yielded RMSE values of

1.0 mm day<sup>-1</sup> for Landsat 8 and 0.8 mm day<sup>-1</sup> for Sentinel 2, and NSE values of 0.55 and 0.87 for Landsat and Sentinel, respectively.

**Key words:** remote sensing, *Eddy covariance*, *Zea mays L.*, center pivot

## 2.1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a cultura do milho (*Zea mays L.*) desempenha um papel significativo na economia devido à diversidade de suas aplicações, abrangendo desde o consumo na alimentação animal/humana até sua contribuição para a indústria. De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024), a área plantada de milho na safra 2023/2024 foi de 21 milhões de hectares, com expectativa de produção de mais de 117.500 milhões de toneladas, porém, no estado de São Paulo, o estabelecimento e desenvolvimento da cultura foram afetados devido às elevadas temperaturas e escassez de chuvas em outubro e novembro de 2023, o que pode ocasionar perda do potencial produtivo da safra.

Os investimentos em sistemas de irrigação mostram-se economicamente viáveis diante desse cenário, pois reduz-se os danos provocados pela deficiência hídrica no solo, garantindo a produtividade das culturas em caso de extremos climáticos como secas prolongadas. Para reduzir o consumo energético e otimizar o uso dos sistemas, a agricultura irrigada deve ser manejada de maneira adequada, e para isso é essencial o conhecimento sobre a evapotranspiração das culturas (BERNARDO et al., 2005).

A evapotranspiração (ET) é um processo que envolve a perda de água para a atmosfera a partir de duas fontes principais: a evaporação do solo e a transpiração das plantas. A estimativa da ET por meio de sensoriamento remoto, utilizando algoritmos aplicados em imagens de satélite, tem sido empregada em diversas escalas no Brasil e no mundo. A exemplo dessa abordagem inclui estudos recentes publicados por Venancio et al. (2021), Safre et al. (2022), Gonçalves et al. (2022) e Bispo et al. (2022).

Entre os algoritmos utilizados estão o SEBAL (BASTIAANSSEN et al., 1998), o METRIC (ALLEN et al., 2007), o S-SEBI (ROERINK et al., 2000), o SSEBop (SENAY

et al., 2013) e ainda, o SAFER (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving*), desenvolvido por Teixeira (2010), que realiza a estimativa de ET com base nos dados de albedo, temperatura de superfície e NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada). Ainda que desenvolvido originalmente na região Nordeste, este algoritmo tem sido empregado em diversos estudos que abrangem diferentes biomas e culturas por todo território nacional (HERNANDEZ et al., 2014; LEIVAS et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2019; AVILEZ et al., 2020; FURQUIM et al., 2020; SOUZA et al., 2020, OLIVEIRA et al., 2021), requerendo, portanto, calibração de seus coeficientes por cultura e/ou região para melhor precisão nos dados estimados.

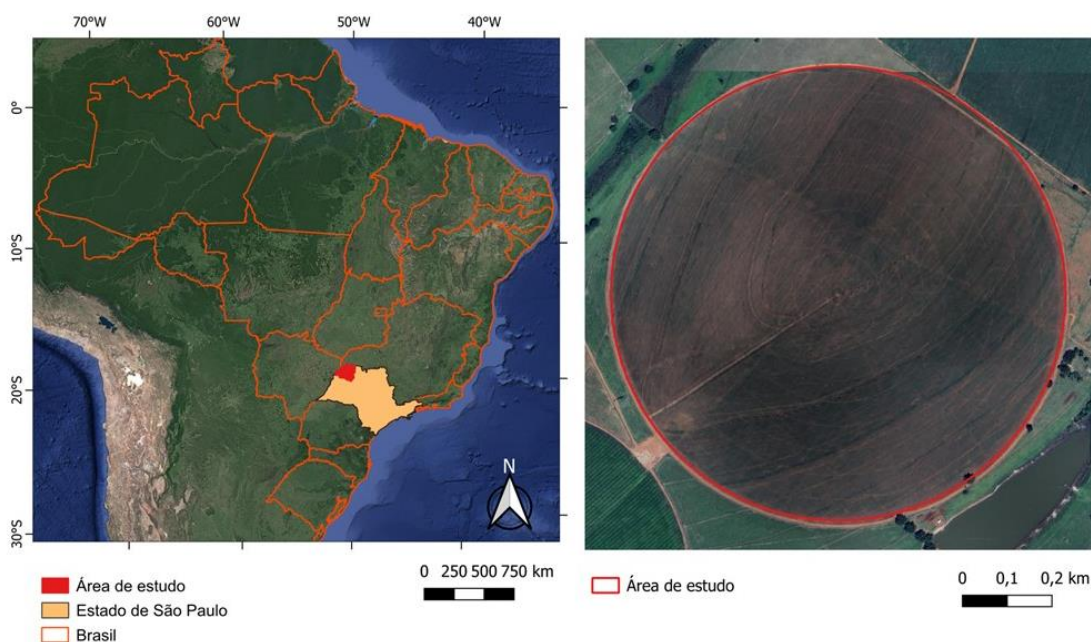
Enquanto os algoritmos utilizam dados de sensores orbitais para estimativa da evapotranspiração, os métodos micrometeorológicos utilizam medições diretas das condições atmosféricas próximas à superfície para calcular a taxa de evapotranspiração das plantas. O método das correlações turbulentas ou “*Eddy covariance*” (EC) é uma técnica avançada utilizada para medir diretamente os fluxos de calor latente (associado à evapotranspiração) e sensível entre a superfície da terra e a atmosfera (CARMO et al., 2017). Essa técnica é especialmente eficaz para obter resultados precisos em uma escala mais detalhada, mas sua implementação requer equipamentos sofisticados, como analisadores de gases, anemômetros sônicos e sistemas de aquisição de dados avançados (KRISHNAN et al., 2012).

Assim, objetivou-se com este estudo avaliar o desempenho do algoritmo SAFER na estimativa da evapotranspiração atual utilizando os satélites Landsat 8 e Sentinel 2 e ainda, calibrar seus coeficientes para a cultura do milho na região Noroeste do estado de São Paulo.

## 2.2 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada em área comercial irrigada por pivô central, totalizando 81,5 hectares, localizada no município de Santo Antônio do Aracanguá-SP, Latitude: 21°00'07" S, Longitude: 50°21'16" O (Figura 1). O clima da região, conforme a classificação de Köppen (1936), é categorizado como tropical com estação seca no inverno (Aw), com precipitação anual média de 1153 mm, evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) anual média de 1400 mm, temperatura do ar anual média de 24,7°C (ROLIM et al., 2007; UNESP, 2023).

**Figura 1 - Localização da área de estudo**



No período que compreende esse estudo, foram realizadas duas safras de milho, sendo a primeira com plantio em 11/05/2019 e colheita em 26/09/2019 (variedade MG 30A37), e a segunda entre 16/02/2020 e 04/07/2020 (variedade MG408).

A área de estudo contou com uma torre de monitoramento equipada com sensores micrometeorológicos (Figura 2): anemômetro sônico tridimensional integralizado com analisador de gás infravermelho IRGASON® (Campbell Scientific, Logan, Utah, EUA) (Figura 3), sensores de radiação (CNR4, Net radiometer - Kipp & Zonen, Delft, Holanda), precipitação (CS700-L, Hydrological Services Pty. Ltd., Sidney, Austrália) e fluxo de calor no solo (HFP01-L, Campbell Scientific, Inc. Logan, Utah, EUA). Conforme Burba (2013), a instalação da torre é recomendada na camada de fluxo constante, ou seja, a uma altura de 1,5 a 2 vezes a altura do dossel. Os sensores foram instalados a 4 metros de altura.

Figura 2 – Torre do sistema *Eddy Covariance* instalada em campo

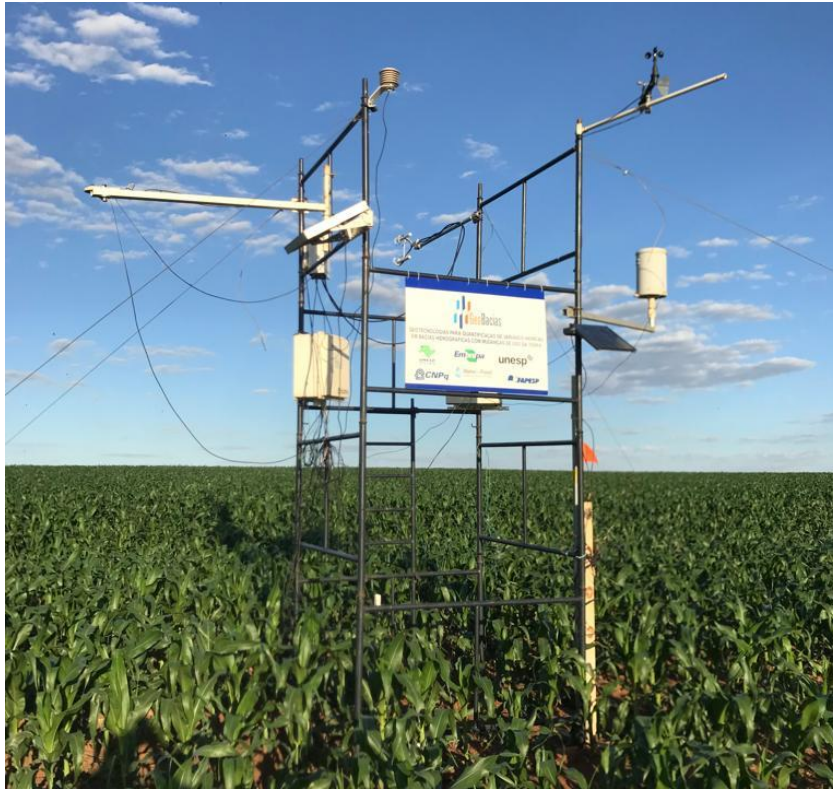


Figura 3 – Anemômetro sônico tridimensional integralizado com analisador de gás IRGASON®



A torre equipada com o sistema EC teve sua instalação concluída em 06/07/2019, tendo, portanto, uma lacuna de dados entre o plantio da primeira safra analisada e a finalização da instalação dos equipamentos.

Os registros brutos do EC foram analisados por meio do programa Eddy Pro Advanced (V 3.0 e 4.0 - LI-COR, Lincoln, NE, EUA). As verificações das séries temporais foram realizadas utilizando a configuração padrão do software. O *Footprint* dos dados adquiridos pelo sistema foi calculado seguindo Kljun et al. (2004). Os dados foram processados gerando médias de 30 minutos e foram determinadas bandeiras de qualidade (MAUDER E FOKEN, 2004). Existem várias razões para o descarte de dados de fluxo, incluindo precipitação intensa, ventos provenientes fora da área de interesse, falhas nos sensores, entre outros (BURBA, 2022). Posteriormente, o preenchimento de falhas foi realizado utilizando a ferramenta online REddyProc (Max-Planck-Institute for Biochemistry, Jena, Turíngia, Alemanha), considerando a covariância entre os fluxos e as variáveis meteorológicas (REICHSTEIN et al., 2005).

O balanço de energia simplificado no sistema solo-planta-atmosfera foi determinado como forma de validação dos fluxos medidos pelo EC, conforme Equação 1:

$$R_n = LE + H + G \quad (1)$$

Em que,

$R_n$  = radiação líquida;

$LE$  = fluxo de calor latente;

$H$  = fluxo de calor sensível;

$G$  = fluxo de calor no solo, todos expressos em  $W\ m^{-2}$  ou  $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ .

A Equação 2 foi utilizada para converter os valores de fluxo em evapotranspiração atual ( $ET_a$ ) (AUBINET et al., 2012):

$$ET_{a\_EC} = 1800 \frac{LE}{10^3(3147.5 - 2.37T_{air})} \quad (2)$$

Em que,  $ET_{a\_EC}$  é a evapotranspiração calculada pelo *Eddy covariance* (mm),  $LE$  é o fluxo de calor latente ( $W\ m^{-2}$ ), 1800 é constante de conversão para segundos,  $(3147.5 - 2.37T_{air})$  é o calor latente de vaporização de água ( $J\ kg^{-1}$ ), e  $T_{air}$  é

temperatura do ar (K). Os dados foram analisados a cada intervalo de 30 minutos, após, os valores de evapotranspiração foram somados para obter a ETa diária da cultura.

A modelagem dos componentes adquiridos por sensoriamento remoto seguiu a metodologia apresentada por Teixeira (2010) e Teixeira et al. (2013). Foram calculados novos coeficientes “a” e “b” da Equação 3, utilizando a metodologia original do algoritmo SAFER descrita por Teixeira (2010), em que os valores são os coeficientes da regressão linear entre a razão da temperatura de superfície (K) e o produto do albedo de superfície e NDVI ( $T_0/\alpha_0 \cdot NDVI$ ), no eixo x, e o logaritmo neperiano da razão entre a evapotranspiração mensurada pelo EC e a ETo da estação agrometeorológica mais próxima, no eixo y ( $\ln (ETa\_EC/ETo)$ ). Para a área de interesse, os dados de ETo foram adquiridos da Estação Santa Adélia Pioneiros pertencente à Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista (RANP) (UNESP, 2023).

Os parâmetros obtidos foram então empregados na Equação 3 para calcular a relação ETa/ETo pelo algoritmo SAFER, que se fundamenta na modelagem da razão entre a evapotranspiração atual e a evapotranspiração de referência:

$$\frac{ETa}{ETo} = \exp \left[ a + b \left( \frac{T_0}{\alpha_0 \cdot NDVI} \right) \right] \quad (3)$$

Em que,

$T_0$  = Temperatura de superfície (K);

$\alpha_0$  = Albedo de superfície;

NDVI = Índice de vegetação por diferença normalizada;

Coeficiente “a” = Ajustado como 1,0 para o Noroeste Paulista (HERNANDEZ et al., 2014); e Coeficiente “b” = Ajustado para -0,008 (TEIXEIRA, 2010).

Posteriormente, a ETa ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) foi obtida pela multiplicação dos valores instantâneos da relação ETa/ETo pelos valores diários de ETo ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) (Equação 4).

$$ETa = ETo \frac{ETa}{ETo} \quad (4)$$

Os indicadores de evapotranspiração de referência e demais variáveis meteorológicas necessárias para a aplicação do SAFER nas imagens orbitais, foram

adquiridos por meio da RANP. Para o cálculo da ETo, utilizou-se o método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) (Equação 5):

$$ETo = \frac{0,408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 U_2)} \quad (5)$$

Em que,

ETo = evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>);

R<sub>n</sub> = radiação líquida na superfície do cultivo (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);

G = fluxo de calor no solo (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>);

T = temperatura média do ar a 2 m de altura (°C);

U<sub>2</sub> é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>),

e<sub>s</sub> = pressão do vapor de saturação (kPa);

e<sub>a</sub> = pressão real do vapor (kPa);

Δ = curva de pressão de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>)

γ = constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>).

Os dados de evapotranspiração estimados pelo SAFER foram comparados aos dados mensurados pela torre EC, utilizando-se os parâmetros estatísticos descritos a seguir:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{y}_i)^2} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (7)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (8)$$

Em que, R<sup>2</sup> é o coeficiente de determinação, RMSE é a raiz do erro médio quadrático, NSE é coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, x e y são valores estimados e observados respectivamente, e  $\bar{y}$  e  $\bar{x}$  são as médias dos valores estimados e observados.

Considerando as duas safras e os dois satélites, foram utilizadas 29 imagens, como descrito na Tabela 1, para a aplicação do algoritmo SAFER. A seleção das imagens foi baseada na condição de que estas deveriam estar livres de nuvens. A divergência entre a quantidade de imagens dos sensores orbitais se dá pela disparidade nos intervalos de revisitação entre eles, com apenas os dias 02/04/2020 e 21/06/2020 sendo coincidentes durante o período analisado.

**Tabela 1 – Imagens dos satélites Landsat 8 e Sentinel 2 durante as safras 2019 e 2020 de milho na região Noroeste Paulista, em função dos dias após a semeadura (DAS)**

Data	DAS	Satélite
07/07/2019	57	Sentinel 2
12/07/2019	62	Sentinel 2
01/08/2019	82	Sentinel 2
11/08/2019	92	Sentinel 2
21/08/2019	102	Sentinel 2
22/08/2019	103	Landsat 8
31/08/2019	112	Sentinel 2
07/09/2019	119	Landsat 8
15/09/2019	127	Sentinel 2
23/09/2019	135	Landsat 8
08/03/2020	21	Sentinel 2
13/03/2020	26	Sentinel 2
17/03/2020	30	Landsat 8
23/03/2020	36	Sentinel 2
02/04/2020	46	Landsat 8 e Sentinel 2
12/04/2020	56	Sentinel 2
17/04/2020	61	Sentinel 2
18/04/2020	62	Landsat 8
22/04/2020	66	Sentinel 2
02/05/2020	76	Sentinel 2
04/05/2020	78	Landsat 8
17/05/2020	91	Sentinel 2
27/05/2020	101	Sentinel 2
01/06/2020	106	Sentinel 2
11/06/2020	116	Sentinel 2
16/06/2020	121	Sentinel 2
21/06/2020	126	Landsat 8 e Sentinel 2

## 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

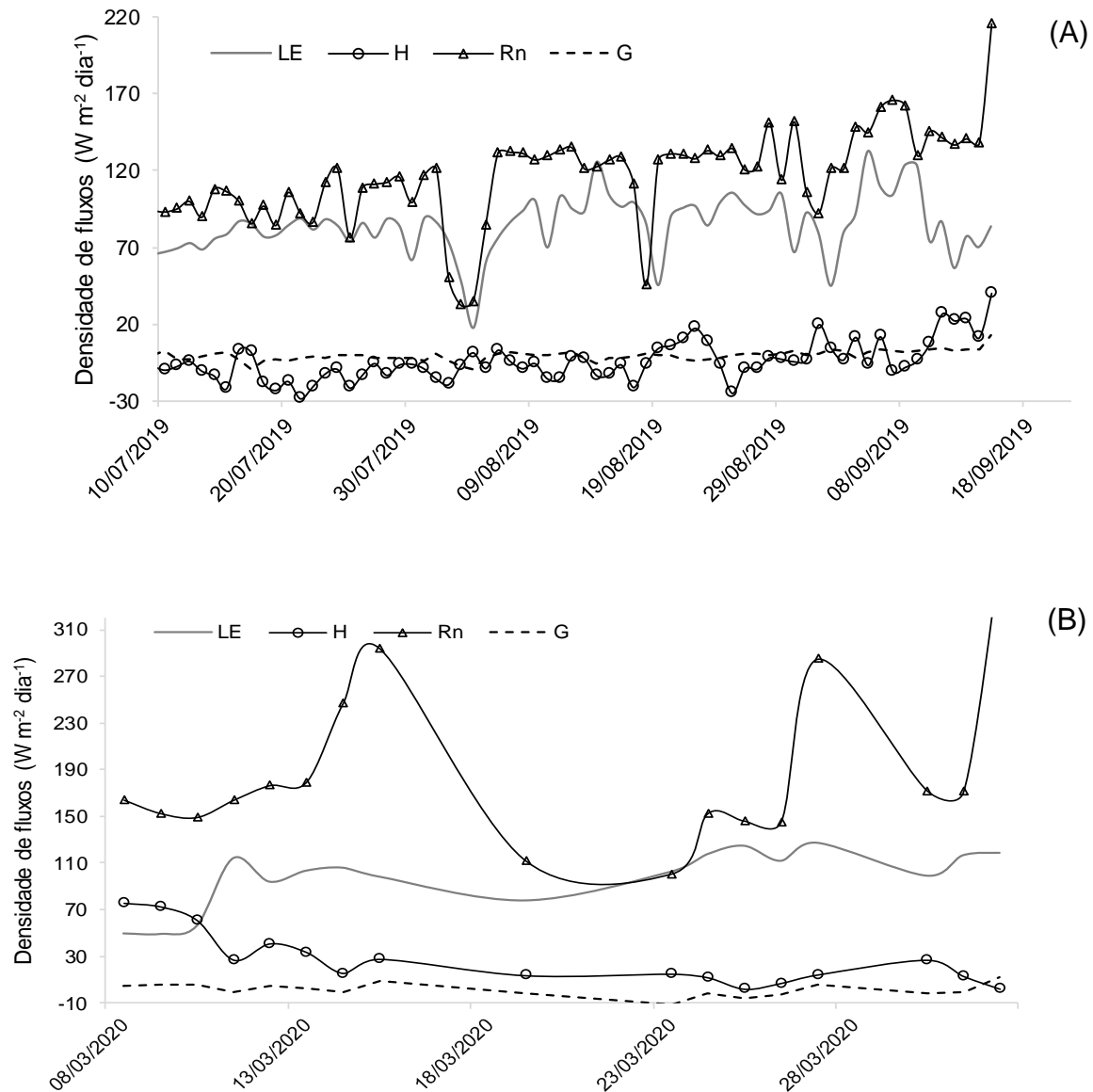
Os valores de densidade de fluxo para a safra de milho em 2019 e em 2020 estão apresentados nas Figuras 4A e 4B, respectivamente. Observa-se que o comportamento dos fluxos foi semelhante em ambas as safras, tendo valores de LE superiores à H e G, com valores máximos de fluxo de calor latente de  $132 \text{ W m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  em 2019 e  $127 \text{ W m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  para o período analisado em 2020. Em 53% dos dias os valores diários de fluxo de calor no solo foram negativos, indicando perda de energia do solo para a atmosfera. Souza et al. (2015) observaram valores de G negativos em trabalho de balanço de energia na caatinga, apenas nos dias de chuva, podendo ser indicativo, portanto, de presença de água no solo.

No ano de 2020 ocorreu perda de dados de radiação líquida a partir de 01/04/2020, sendo esta a razão dos valores estarem apresentados apenas até esta data (Figura 4B). Ainda na Figura 4B, observa-se que no início da safra, o fluxo de calor sensível é superior ao LE. Isso ocorre pela área foliar da cultura reduzida no início do ciclo, comportamento similar foi observado por Bispo (2020) no início do ciclo da cana-de-açúcar também na região Noroeste Paulista.

Em escala de 30 minutos, os valores de  $R_n$  variaram entre  $-73$  e  $687 \text{ W m}^{-2}$  para os dados observados. Em estudo realizado em áreas de florestas, Andrade et al. (2009) observaram valores mínimos de saldo de radiação de  $-19,28 \text{ W m}^{-2}$  e máximo e  $576,72 \text{ W m}^{-2}$  durante a estação úmida. Esta diferença pode estar associada com a variação dos elementos meteorológicos entre as regiões e pela localização, além das culturas, uma vez que a cobertura de nuvens nas florestas tropicais é o principal componente que influencia a radiação solar, segundo MALHI et al. (2002).

A fração evaporativa (LE/ $R_n$ -G) (CLARINDO et al., 2022) média foi de 0,69 para o período de dados de 2019 e 0,53 para 2020. Segundo Bastiaanssen et al. (1997), a fração evaporativa é função da quantidade de água presente no solo. Neste estudo, os dados analisados nas duas safras, correspondem a diferentes estádios fenológicos da cultura, isto explica o porquê da safra 2019 possuir maior fração evaporativa que a safra de 2020, já que o manejo de irrigação deve ser realizado com base na necessidade hídrica da cultura, que por sua vez varia em função da fase fenológica.

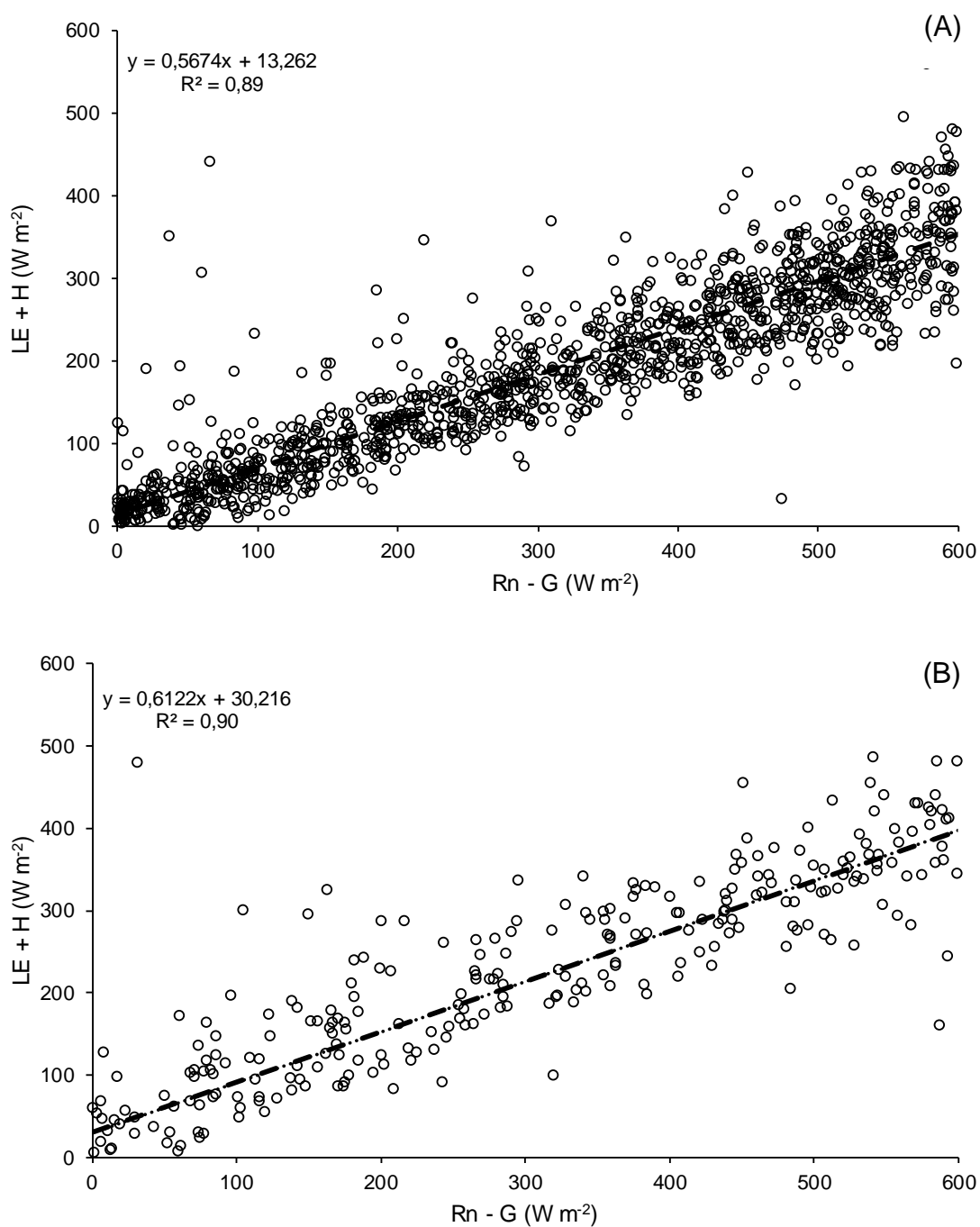
**Figura 4 – Densidade de fluxos de energia diários para a cultura do milho irrigada por pivô central em 2019 (A) e 2020 (B) determinados pelo sistema *Eddy covariance*. Rn - Saldo de radiação, LE - Fluxo de calor latente, H - Fluxo de calor sensível, G - Fluxo de calor no solo**



O fechamento do balanço de energia para as safras analisadas é apresentado na Figura 5. Ao utilizar o método das correlações turbulentas, torna-se essencial avaliar o fechamento do balanço de energia, pois este pode subestimar  $LE + H$  em relação à  $Rn - G$  (BISPO, 2020). A correlação ( $R^2$ ) entre a energia disponível ( $Rn - G$ ) e a energia utilizada para a evapotranspiração e aquecimento do ar ( $Le + H$ ), foi de 0,89 para a safra de 2019 (Figura 5A) e 0,90 para a safra de 2020 (Figura 5B), estes

valores estão similares aos encontrados em diversos trabalhos da mesma natureza, nas mais diferentes superfícies vegetadas (BLANKEN et al. 1998; TWINE et al. 2000; WILSON et al., 2002; BARR et al., 2006).

**Figura 5 – Fechamento do balanço de energia para a cultura do milho irrigada por pivô central em 2019 (A) e 2020 (B)**



Em estudo sobre o balanço de energia para a cultura do milho no Cerrado, Farias et al. (2004) observaram valores de  $R^2$  entre 0,87 e 0,92, estes autores ainda citam que Baldochi (1994) registrou valores de correlação próximos a 0,94 para o milho cultivado nos EUA, corroborando, portanto, com o encontrado neste trabalho.

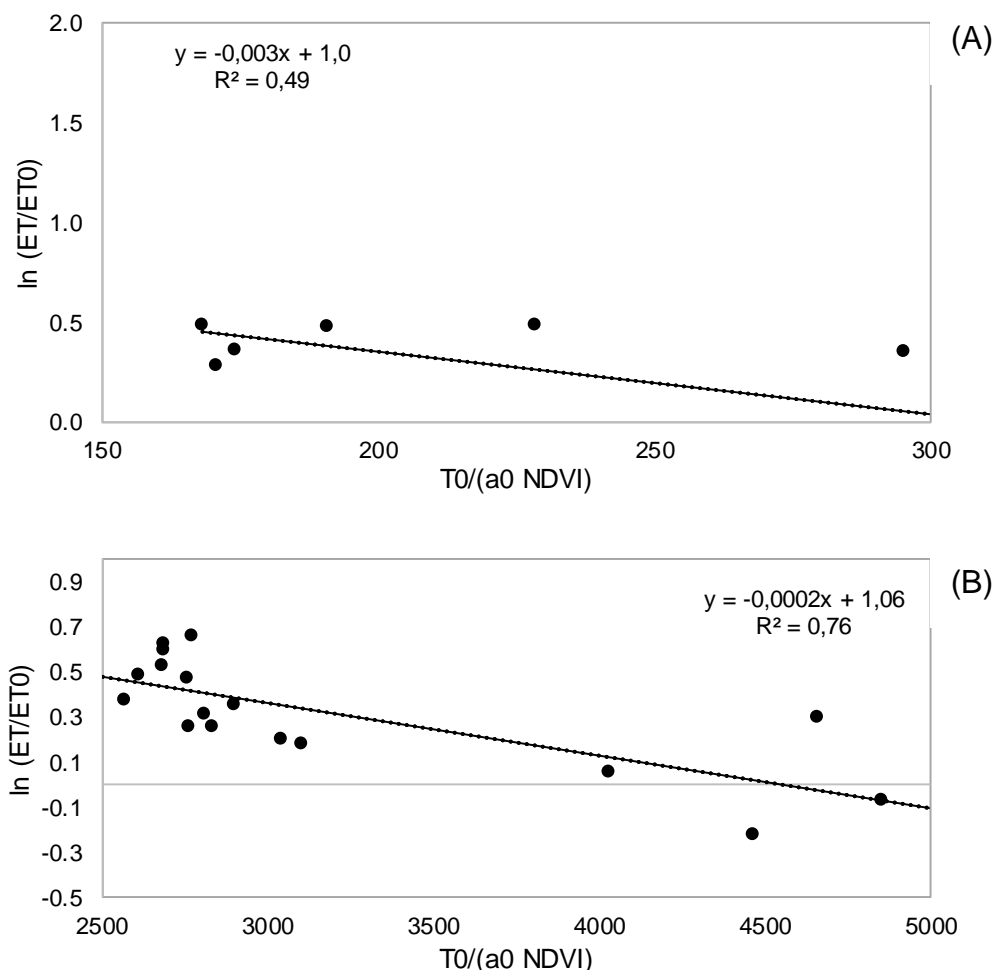
Na região da caatinga, Souza et al. (2015) tiveram um valor médio da razão entre  $LE + H$  e  $R_n - G$  de 75%, enquanto Teixeira (2010), para a mesma localidade, observou uma média de 90%. Neste trabalho, a razão média encontrada foi de 79% valor dentro do encontrado na literatura. Wilson et al. (2002) relatam erros no fechamento do balanço de energia de 10 a 30%. Segundo Aubinet et al. (2000) existem diversas razões para o não fechamento do balanço de energia, como por exemplo a ocorrência de outros fluxos como a advecção, a não consideração da energia armazenada nas plantas, entre outros.

Os dados de sensoriamento remoto e as estimativas diárias da  $E_{To}$  e  $E_{Ta}$  *Eddy covariance* das duas safras de milho analisadas, foram agrupados para calibração do algoritmo SAFER, sendo separados apenas por satélite, e não por safra. Utilizando o método proposto no trabalho original de Teixeira (2010), foi implementada uma regressão linear para determinação dos coeficientes “a” e “b” da Equação 3. Foram utilizados todos os dados disponíveis durante o período de estudo para a determinação, porém para o satélite Landsat 8 só foi possível a utilização de 8 imagens, pois eram as únicas que não havia presença de nuvens.

As variáveis apresentaram valor de  $R^2$  igual a 0,49 para o satélite Landsat 8 e 0,76 para o Sentinel 2. Teixeira (2010) teve correlação de 0,91 entre os dados trabalhando com os satélites Landsat 5 e 7, e, Safre et al (2022) ao calibrar o algoritmo SAFER em vinhedos na Califórnia para duas localidades, encontraram correlação de 0,46 e 0,73.

Os coeficientes determinados foram: “a” igual a 1 e “b” igual a -0,003 para o Landsat 8 (Figura 6A) e “a” no valor de 1,06 e “b” de -0,0002 para o Sentinel 2 (Figura 6B). Em ambos os satélites, os coeficientes foram diferentes daqueles propostos por Teixeira (2010) ( $a = 1,8$  e  $b = -0,008$ ). As diferenças entre as áreas conduzidas, vegetação e a localidade pode ser um fator que ocasiona a divergência das constantes.

**Figura 6 – Calibração dos coeficientes do algoritmo SAFER para a cultura do milho utilizando medições de satélite e dados de campo para o Landsat 8 (A) e Sentinel 2 (B)**



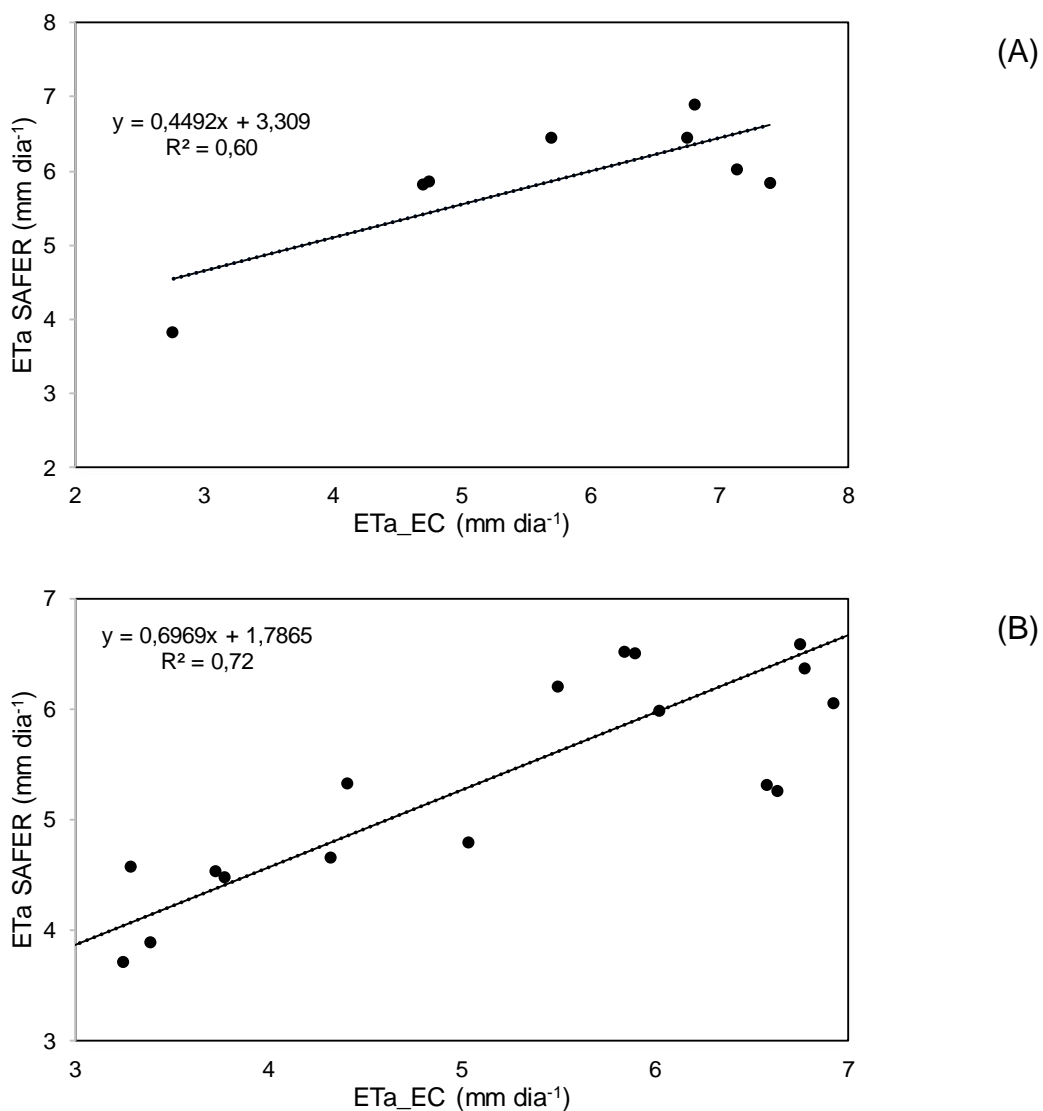
Enfatiza-se que o coeficiente “a” foi determinado com o valor 1 para os dois satélites estudados, ainda que o estudo tenha sido conduzido com poucas imagens do Landsat 8. Hernandez et al. (2014) haviam determinado o mesmo coeficiente de forma empírica, para a região Noroeste Paulista e este já vinha sendo utilizado em diversos trabalhos com o SAFER na localidade (TEIXEIRA et al., 2014; COAGUILA et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2019; OLIVEIRA et al.; 2021). O coeficiente “a” igual a 1 também foi usado em outros trabalhos e regiões do Brasil, como no Centro-Oeste nos trabalhos de Souza (2016), Souza et al. (2020) e Almeida (2023).

Safre et al. (2022) e Venâncio et al. (2021) são autores que sugerem a calibração do algoritmo SAFER para sua utilização. Safre et al. (2022) utilizando duas torres EC determinou diferentes coeficientes “a” e “b” para cada torre com a mesma

cultura, já Venâncio et al. (2022), de forma empírica, determinaram “a” = 0,32 e “b” = -0,0013 para a cultura do milho no Oeste da Bahia. Ainda que não se saiba se esta calibração deve ser feita por localidade, cultura, satélite ou todos estes requisitos, é sugerido que pesquisas envolvendo esta temática devam continuar a serem feitas para melhor modelagem da evapotranspiração pelo algoritmo SAFER.

Na Figura 7 é apresentada a regressão entre os valores de ETa mensurados pelo *Eddy covariance* em campo e os estimados pelo SAFER, utilizando os coeficientes “a” e “b” determinados neste trabalho para o Landsat 8 (7A) e Sentinel 2 (7B).

**Figura 7 – Relação entre a evapotranspiração atual determinada pelo SAFER (ETa SAFER) e a evapotranspiração mensurada pelo *Eddy covariance* (ETa\_EC) para o Landsat 8 (A) e Sentinel 2 (B)**



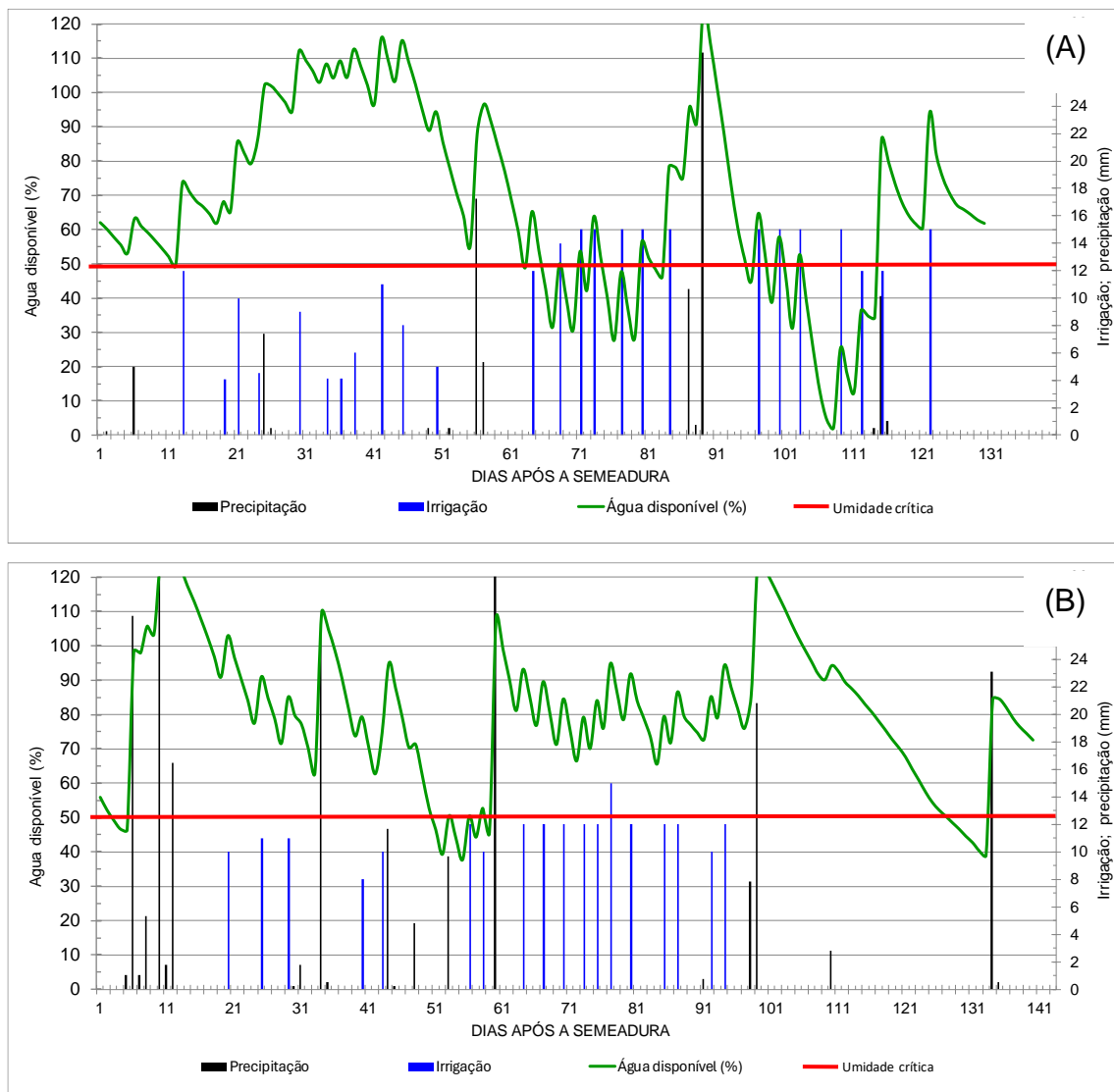
O valor da correlação ( $R^2$ ) entre os dados foi determinado em 0,60 para o Landsat, ainda que um valor considerado baixo, é acima daquele encontrado por Ramos (2018), trabalhando com a torre EC e o SAFER em Juazeiro - BA ( $R^2=0,026$ ). Já para o Sentinel, o  $R^2$  subiu para 0,72. O baixo número de imagens do satélite americano pode ter contribuído para a baixa correlação. Este é um problema recorrente ao se trabalhar com sensoriamento remoto, pois há dependência das condições de não sombreamento por nuvens sobre a área de estudo no momento da passagem do sensor orbital.

O valor do RMSE foi de  $1,0 \text{ mm dia}^{-1}$  para o Landsat 8 e  $0,8 \text{ mm dia}^{-1}$  para o Sentinel 2. Embora os resultados sejam semelhantes aos encontrados em outros trabalhos, como em Lopes et al. (2021), ainda é um valor alto ao se pensar na evapotranspiração diária de uma cultura para fins de manejo da irrigação. Ao se trabalhar com uma margem de erro de  $1 \text{ mm dia}^{-1}$ , em uma área irrigada de 100 hectares, por exemplo, há a possibilidade de sub ou superestimar a irrigação em  $1.000 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ , o que não é ideal nem para a cultura, no caso da subestimativa, nem para os recursos hídricos, no cenário de superestimativa.

Já o coeficiente NSE foi de 0,55 e 0,87 no Landsat e Sentinel, respectivamente. Desempenhos considerados “satisfatório” e “muito bom” de acordo com Moriasi et al. (2007), um desempenho insatisfatório seriam valores de NSE negativos. Para a cultura do milho, Venancio et al. (2021) obtiveram valores de NSE de 0,91, corroborando com o encontrado neste trabalho.

As Figuras 8A e 8B mostram as variações do armazenamento de água no solo ao longo das duas safras de cultivo. Foi considerado crítico a água disponível abaixo de 50% do armazenamento de água no solo. Este trabalho foi desenvolvido em área comercial e durante a safra de 2019 o armazenamento de água no solo ficou 30 dias dentro do considerado crítico, já em 2020 este número foi reduzido para 15 dias, indicando um manejo de irrigação mais adequado. Bergamaschi e Matzenauer (2014) citam que a cultura do milho pode ter uma redução de cerca de 50% do rendimento dos grãos quando exposta ao déficit hídrico durante o período de reprodução. Apesar da situação, a safra de 2019 teve produtividade satisfatória e mais detalhes sobre o manejo da irrigação e seus rendimentos podem ser encontrados em Oliveira et al. (2023).

**Figura 8 – Armazenamento de água no solo para a cultura do milho irrigada por pivô central em 2019 (A) e 2020 (B)**



A lâmina total de irrigação foi de 278 mm para a safra de 2019 e 205 mm para a segunda safra analisada. A precipitação total registrada durante o ciclo do milho foi de 111 mm em 2019 e 253 mm em 2020. E a evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) foi de 376 mm em 2019 e 385 mm em 2020, valores que corroboram com Murga-Orrillo et al. (2016). Apesar de em 2019 o total de precipitação mais irrigação ser capaz de suprir toda a demanda hídrica da cultura no ciclo, as chuvas ocorrem de maneira variável e pelo armazenamento de água no solo ser limitado, ocasionou valores de água disponível para as plantas abaixo do ideal (Figura 8A).

A presença de água no solo aumenta a taxa evapotranspirativa das plantas, em contrapartida, valores baixos de evapotranspiração podem indicar suprimento

inadequado de água. Sendo assim, os valores de ETa encontrados nesse trabalho, demonstram que o suprimento hídrico foi satisfatório à cultura, apesar de em alguns dias, terem sido maiores que a evapotranspiração de cultura (ETc) diária. Segundo Oliveira et al. (2021) um dos grandes desafios da agricultura irrigada é o ajuste e aplicação de coeficientes que demonstram o real uso de água pelas culturas, e pesquisas envolvendo este cenário já vem sendo desenvolvidas, como em Marin et al. (2019).

Isto posto, a aplicação do algoritmo SAFER em imagens dos satélites Landsat 8 e Sentinel 2 não é indicado para fins de manejo da irrigação diária das culturas, além do fato de que os satélites têm tempo de revisita longo e a incerteza das imagens serem livres de nuvens, o SAFER ainda tem necessidade de ser calibrado e validado para outras culturas e regiões do país. Porém, seu uso pode ser empregado para contribuir nas tomadas de decisões em campo pelos Irrigantes, tanto nos planos de manejo atuais ou futuros, mas principalmente, para a avaliação de desempenho, especialmente o comparativo, na produtividade da água, seja, com base na evapotranspiração, como na água aplicada.

## 2.4 CONCLUSÕES

Para a estimativa da evapotranspiração da cultura do milho no Noroeste Paulista, o algoritmo SAFER se mostrou satisfatório quando comparado aos dados mensurados pelo sistema *Eddy covariance*, com valores de RMSE de 1,0 mm dia<sup>-1</sup> para o satélite Landsat 8 e 0,8 mm dia<sup>-1</sup> para o Sentinel 2, e NSE de 0,55 e 0,87 para o Landsat e Sentinel, respectivamente.

Novos coeficientes "a" e "b" foram determinados para o algoritmo, com "a" sendo igual a 1 para ambos os satélites e "b" igual a -0,003 para o Landsat 8 e -0,0002 para o Sentinel 2. Essa integração de sensores pode aumentar o número de imagens do local de estudo, já que cada satélite possui um tempo de revisita diferente e há incerteza em relação ao sombreamento sobre a área de interesse ao se trabalhar com sensores orbitais.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) - Model. **ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 133(4), p. 380-394, 2007.

ALMEIDA, F. P. **Evapotranspiração das culturas do milho e feijão no bioma cerrado utilizando sensoriamento remoto por drones e satélites**. 2023, 89f. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia, Goiânia, 2023.

ANDRADE, N. L. R.; AGUIAR, R. G.; SANCHES, L.; ALVES, E. C. R. F.; NOGUEIRA, J. S. Partição do saldo de radiação em áreas de floresta amazônica e floresta de transição amazônia-cerrado. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.3, 346-355, 2009.

AUBINET, M.; GRELLE, A.; IBROM, A.; RANNIK, U.; MONCRIEFF, J.; FOKEN, T.; KOWALSKI, A. S.; MARTIN, P. H.; BERBIGIER, P.; BERNHOFER, C.; CLEMENT, R.; ELBERS, J.; GRANIER, A.; GRÜNWARD, T.; MORGENSTERN, K.; PILEGAARD, K.; REBMANN, C.; SNIJDERS, W.; VALENTINI, R.; VESALA, T. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. **Advances in Ecological Research**, [S.L.], v. 30, [S.N.], p. 113-176, 2000.

AUBINET, M.; VESALA, T.; PAPALE, D. *Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis*: **Springer Science & Business Media**, 2012. 438 p.

AVILEZ, A. M. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; GALVÃO, I. M.; TEIXEIRA, A. H. C. Determinação dos coeficientes de cultivo e a evapotranspiração real da cana-de-açúcar com o uso do modelo SAFER. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.28, e026831, p. 1-8, 2020.

BALDOCHI, D. A comparative study of mass and energy exchange over a closed C3 (wheat) and na open C4 (corn) canopy: I. The partitioning of available energy into latent and sensible heat exchange. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 67, n. 3-4, p. 191-220, 1994.

BARR, A. G; MORGENSTERN, K.; BLACK, T. A.; MCCAUGHEY, J. H. Surface energy balance closure by the *eddy covariance* method above three boreal forest stands and implications for the measurement of the CO<sub>2</sub> flux. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 140, [S.N.], p. 322-337, 2006.

BASTIAANSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; DROOGERS, P.; de BRUIN, H. A. R.; MEMENTI, M. Area-average estimates of evaporation, wetness indicators and top soil moisture during two golden days in EFEDA. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.87, p.119-137, 1997.

BASTIAANSSEN, W.G.M.; H. PELGRUM, J.; WANG, Y.M.A; J. F.; MORENO, G.J.; ROERINK, T.; VAN DER WAL. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 212 - 213, p. 213 - 229, 1998

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS - Ascar, 2014, 84 p.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 7.ed. - Viçosa: UFV, 2005, 611 p.

BISPO, R. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; GONÇALVES, I. Z.; NEALE, C. M. U.; TEIXEIRA, A. H. C. Remote sensing based evapotranspiration modeling for sugarcane in Brazil using a hybrid approach. **Agricultural Water Management**, v. 271, n. 107763, p. 1-10, 2022.

BISPO, R. C. **Medições e modelagem da evapotranspiração em cana-de-açúcar no Noroeste Paulista**. 2020, 94f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2020.

BLANKEN, P. D.; BLACK T. A.; NEUMANN H. H; DEN HARTOG, G.; YANG, P. C.; NESIC, Z.; STAEBLER, R.; CHEN, W, NOVAK, M. D. Turbulent flux measurements above and below the overstory of a boreal aspen forest. **Boundary Layer Meteorology**, Toronto, v. 89, [S.N.], p.109-140,1998.

BURBA, G. **Eddy covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications: a Field Book on Measuring Ecosystem Gas Exchange and Areal Emission Rates**. LI-COR Biosciences, Lincoln, USA, Hard- and Softbound, 2013, 331 p. ISBN: 978-0-61576827-4

BURBA, G. **Eddy covariance Method for Scientific, Regulatory, and Commercial Applications**. LI-COR Biosciences, Lincoln, USA, Hard- and Softbound, 2022, 702 p. ISBN: 978-0-578-97714-0

CARMO, J. F. A.; MOURA, M. S. B.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; LEITÃO, M. 1031 M. V. B. R. Balanço de energia e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar por dois métodos micrometeorológicos. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 25, n.1, p.101-111, 2017.

CLARINDO, W. R.; DALLACORT, R.; DIAS, V. R. M.; TIEPPO, R. C.; BARRETO, J. G. Estimativa de produtividade da cultura do milho safrinha por imagens de satélite Landsat 8. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Jandaia-GO, v.19 n.40; p. 201-2015, 2022.

COAGUILA, D. N.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C.; FRANCO, R. M.; 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.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 11, safra 2023/24, n. 4, quarto levantamento, janeiro 2024.

FARIAS, S. E. M.; MEIRELLES, M. L.; FRANCO, A. C.; NOGUEIRA, J. L. M.; GUERRA, A. F.; MANZI, A. O. Balanço de energia em cultivo de milho no cerrado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 227-233, 2004.

FURQUIM, L. C.; NUÑEZ, D. N. C.; SOUZA, E. J.; SANTINI, J. M. K.; CABRAL, J. S. R.; STONE, L. F. Estimativa da evapotranspiração em sistemas integrados no cerrado, utilizando o algoritmo SAFER. **Irriga**, Botucatu, v. 25, n. 3, p. 617-628, julho-setembro, 2020.

GONÇALVES, I. Z.; RUHOFF, A.; LAIPELT, L.; BISPO, R. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; NEALE, C. M. U.; TEIXEIRA, A. H. C.; MARIN, F. R. Remote sensing-based evapotranspiration modeling using geeSEBAL for sugarcane irrigation management in Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 274, n.107965, p. 1-12, 2022.

HERNANDEZ, F. B. T.; NEALE, C. M. U.; TEIXEIRA, A. H. C.; TAGHVAEIAN, S. Determining large scale actual evapotranspiration using agro-meteorological and remote sensing data in the Northwest of Sao Paulo State, Brazil. **Acta Horticulturae**, [s. l.], v.1038, p.263-270, 2014.

KLJUN, N.; ROTACH, M. W.; CALANCA, P. A Simple Parameterisation for Flux Footprint Predictions, Bound-Lay. **Meteorology**, [s.l.] v. 112, [S.N.], p. 503-523, 2004.

KRISHNAN, P.; MEYERS, T. P.; SCOTT, R. L.; KENNEDY, L.; HEUER, M. Energy exchange and evapotranspiration over two temperate semiarid grasslands in North America. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 153, [S.N.], p. 31-44, 2012.

LEIVAS, J. F.; TEIXEIRA, A. H. C.; ANDRADE, R. G.; VICTORIA, D. C.; TORRESAN, F. E. Spatiotemporal variability of evapotranspiration in pantanal, Brazil, using satellite images. **Geografia**, Rio Claro, v. 40, p. 131-143, ago. 2015.

MALHI, Y.; PEGORARO, E.; NOBRE, A. D.; PEREIRA, M.G. P.; GRACE, J.; CULF, A. D.; CLEMENT, R. Energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**. v. 107, p. 45-1 - 45-17, 2002.

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; NASSIF, D. S. P.; VIANNA, M. S.; PILAU, F. G.; DA SILVA, E. H. F. M.; SOBENKO, L. R.; GONÇALVES, A. O.; PEREIRA, R. A. A.; CARVALHO, K. S. Revisiting the crop coefficient-reference evapotranspiration procedure for improving irrigation management. **Theoretical and Applied Climatology**, [s.l.], [s.n], p. 1-9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02940-7>

MAUDER, M.; FOKEN, T. **Documentation and Instruction Manual of the Eddy covariance Software Package TK2**. Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie, 2004, p. 44.

MURGA-ORRILLO, H.; ARAUJO, W. F.; ABANTO-RODRIGUEZ, C.; SAKAZAKI, R. T.; BARDALES-LOZANO, M.; POLO-VARGAS, A. R. Influência da cobertura morta na evapotranspiração, coeficiente de cultivo e eficiência de uso de água do milho cultivado em cerrado. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 2, p. 352-364, maio -junho, 2016.

OLIVEIRA, D. A.; ARAUJO, V. R.; HERNANDEZ, F. B. T. Custos e receitas de diferentes técnicas de manejo da irrigação em milho no Noroeste Paulista. In VIII INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING. **Anais** [...]. Fortaleza, 2023. Disponível em: <[https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/fitossanidadeengenhariaruralesolos715/irrigacao5868/oliveira\\_inovagri2023\\_final.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/fitossanidadeengenhariaruralesolos715/irrigacao5868/oliveira_inovagri2023_final.pdf)> Acesso: 19 jan 2023.

OLIVEIRA, D.A.; HERNANDEZ, F.B.T.; BISPO, R.C.; TEIXEIRA, A.H.C. Aplicação do algoritmo SAFER para determinação da evapotranspiração em canaviais irrigados por diferentes sistemas. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial Inovagri - notas técnicas, v. 1, n. 1, p. 1-7, outubro, 2019.

OLIVEIRA, D. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; BISPO, R. C.; GOMES, R. N.; TEIXEIRA, A. H. C. Estimativa da demanda de água da cultura da cana-de-açúcar irrigada utilizando sensoriamento remoto. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial - Inovagri, v. 1, n. 4, p. 678-686, dezembro, 2021.

RAMOS, R. R. D. **Aplicação do Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving (SAFER) para a cana-de-açúcar no submédio do Vale do São Francisco Brasil**. 2018. 61 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2018.

REICHSTEIN, M.; FALGE, E.; BALDOCCHI, D.; PAPALE, D.; AUBINET, M.; BERBIGIER, P.; BERNHOFER, C.; BUCHMANN, N.; GILMANOV, T.; GRANIER, A.; GRÜNEALD, T.; HAVRÁNKOVÁ, K.; ILVESNIEMI, H.; JANOUS, D.; KNOHL, A.; LAURILA, T.; LOHILA, A.; LOUSTAU, D.; MATTEUCI, G.; MEYERS, T.; MIGLIETTA, F.; OURCIVAL, J.M.; PUMPANEN, J.; RAMBAL, S.; ROTENBERG, E.; SANZ, M.; TENHUNEN, J.; SEUFERT, G.; VACCARI, F.; VESALA, T.; YAKIR, D.; VALENTINI, R. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. **Global Change Biology**, v.11, p.1424-1439, 2005.

ROERINK, G.J.; SU, Z.; MENENTI, M. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, v. 25, n. 2, p. 147-157, 2000.

ROLIM, G. S.; CAMARGO, M. B. P.; LANIA, D. G.; MORAES, J. F. L. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 66, n. 4, p. 711-720, 2007.

SAFRE, A. L. S.; NASSAR, A.; TORRES-RUA, A.; ABOUTALEBI, M.; SAAD, J. C. C.; MANZIONE, R. L.; TEIXEIRA, A. H. C.; PRUEGER, J. H.; MCKEE, L. G.; ALFERI, J. G.; HIPPS, L. E.; NIETO, H.; WHITE, W. A.; ALSINA, M. M.; SANCHEZ, L.; KUSTAS, W. P.; DOKOOZLIAN, N.; GAO, F.; ANDERSON, M. C. Performance of Sentinel-2 SAFER ET model for daily and seasonal estimation of grapevine water consumption. **Irrigation Science**, n. 40, p. 635-654, 2022.

SENAY, G.B.; BOHMS, S.; SINGH, R.K.; GOWDA, P.H.; VELPURI, N.M.; ALEMU, H.; VERDIN, J.P. Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: A new parameterization for the SSEB approach. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, 49, p. 577-591, 2013.

SOUZA, J. M. F.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; MESQUITA, M. Validação do modelo SAFER na estimativa da evapotranspiração da cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v. 25, n. 2, p. 247-262, abril-junho, 2020.

SOUZA, S. B. S.; MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F. Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em condições de seca intensa. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.50, n.8, p.627-636, 2015.

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

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; VICTORIA, D. C.; BOLFE, E. L. Irrigation performance assessments for corn crop with Landsat images in the São Paulo state, Brazil. **Water Resources and Irrigation Management**, v.3, n.2, p.91-100, 2014.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; SCHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. **Modelagem espaço temporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido brasileiro**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2013. 32 p. (Documentos, 99).

TWINE, T. E.; KUSTAS, W. P.; NORMAN, J. M.; COOK, D. R.; HOUSER, P. R.; MEYERS, T. P.; PRUEGER, J. H.; STARKS. P. J.; WESELY, M. L. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 103, [S.N.], p. 279-300, 2000.

UNESP - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. **Canal Clima UNESP Ilha Solteira**. Ilha Solteira - SP, 2023. Disponível em: <<http://clima.feis.unesp.br>>. Acesso em: 19 dez. 2023.

VENANCIO, L. P.; MANTOVANI, E. C.; AMARAL, C. H.; NEALE, C. M. U.; FILGUEIRAS, R.; GONÇALVES, I. Z.; CUNHA, F. F. Evapotranspiration mapping of commercial corn fields in Brazil using SAFER algorithm. **Scientia Agricola**. v.78, n.4, e20190261, p. 1-12, 2021.

WILSON, K.; GOLDSTEIN, A.; FALGE, E.; AUBINET, M.; BALDOCCHI, D.; BERBIGIER, P.; BERNHOFER, C.; CEULEMANS, R.; DOLMAN, H.; FIELD, C.;

GRELLE, A.; IBROM, A.; LAW, BE.; KOWALSKI, A.; MEYERS, T.; MONCRIEFF, J.; MONSON, R.; OECHEL, W.; TENHUNEN, J.; VALENTINI, R.; VERMA, S. Energy balance closure at FLUXNET sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 113, [S.N.], p. 223-243, 2002.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A determinação da evapotranspiração é fundamental para o bom manejo da irrigação e a potencialização da utilização dos recursos hídricos. O uso de sensoriamento remoto na estimativa da evapotranspiração em escala regional é uma técnica eficiente, de baixo custo e grande cobertura. Vale considerar que os satélites possuem um tempo de revisita longo e há incerteza quanto à disponibilidade de imagens livres de nuvens, o que não é indicado para o manejo da irrigação diária. No entanto, eles são de grande valia para a avaliação de desempenho, especialmente em relação à produtividade da água.

O uso de métodos micrometeorológicos viabiliza a calibração e a validação dos algoritmos aplicados em imagens de sensores orbitais, sendo assim necessário continuar os estudos nessa área. Diante disso, estudos sobre a calibração e a validação do SAFER devem continuar sendo explorados em todo o território nacional para otimizar a estimativa da evapotranspiração atual pelo modelo. É importante ressaltar que esse algoritmo apresenta uma modelagem simplificada em relação a outros métodos disponíveis para a estimativa da evapotranspiração em grandes escalas.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS- ANA. **Estimativas de evapotranspiração real por sensoriamento remoto no Brasil**. Brasília: Agência Nacional de Águas. - ANA, 2020. 41 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS- ANA. **Informações sobre recursos hídricos: Divisão hidrográfica Brasília**. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh-1/aceso-tematico/divisao-hidrografica>. Acesso: 19 janeiro 2023.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) - Model. **ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 133(4), p. 380-394, 2007.
- AMENDOLA, E. C. **Evolução da agricultura irrigada por pivô central no Noroeste Paulista**. 2016. 51f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" UNESP, Ilha Solteira, 2016.
- ARRUDA, J. C.; JORGE, A.; PRIANTE FILHO, N.; NOGUEIRA, J.S.; ALMEIDA FILHO, E. O.; CAMPELO JÚNIOR, J. H. C.; VOURLITIS, G. L. Aplicação de três metodologias para estimar o fluxo de calor latente em floresta de transição. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, p. 233-240, 2006.
- BALDOCCHI, D. Assessing the *eddy covariance* technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, v. 9, n. 4, p. 479-492, 2003.
- BASTIAANSSEN, W. G. M.; H. PELGRUM, J.; WANG, Y. M. A; J. F.; MORENO, G. J.; ROERINK, T.; VAN DER WAL. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 212 - 213, p. 213 - 229, 1998.
- BISPO, R. C. **Medições e modelagem da evapotranspiração em cana-de-açúcar no Noroeste Paulista**. 2020, 94f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2020.
- BIUDES, M. S.; CAMPELO JUNIOR, J. H.; NOGUEIRA, J. S.; SANCHES, L. Estimativa do balanço de energia em cambarazal e pastagem no norte do Pantanal pelo método da razão de Bowen. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.2, 135-143, 2009.
- COAGUILA, D. N.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C.; FRANCO, R. M.; 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.

FARIAS, S. O. O.; CUENCA, R. H.; EK, M. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 81, p. 131-143, 1996.

LEE, X.; BLACK, T. A.; HARTOG, G.; NEWMANN, H. H.; NESIC, Z.; OLEJNIK, J. Carbon dioxide exchange and nocturnal processes over a mixed deciduous forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 81, n. 1-2, p. 13-29, 1996.

LIU, H.; FOKEN, T. A modified Bowen ratio method to determine sensible and latent heat fluxes. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 10, n. 1, p. 71-80, 2001.

MANTOVANI, E. C.; SALASSIER, B.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3. ed. atual. Viçosa: UFV, 2012. 355p.

OLIVEIRA, D. A.; HERNANDEZ, F. B. T. Análise da evolução da irrigação por pivô central no Noroeste Paulista. **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, n. 44, v. 2, p. 122-139, mai.-ago. 2022.

OLIVEIRA, D. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; BISPO, R. C.; TEIXEIRA, A. H. C. Aplicação do algoritmo SAFER para determinação da evapotranspiração em canais irrigados por diferentes sistemas. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial Inovagri - notas técnicas, v. 1, n. 1, p. 1-7, outubro, 2019.

OLIVEIRA, D. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; BISPO, R. C.; GOMES, R. N.; TEIXEIRA, A. H. C. Estimativa da demanda de água da cultura da cana-de-açúcar irrigada utilizando sensoriamento remoto. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial - Inovagri, v. 1, n. 4, p. 678-686, dezembro, 2021.

ORTEGA, J. F.; JUAN, J. A.; TARJUELO, J. M. Improving water management: The irrigation advisory service of Castilla-La Mancha (Spain). **Agricultural Water Management**, v.77, p.37-58, 2005.

ROERINK, G. J.; SU, Z.; MENENTI, M. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. **Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere**, v. 25, n. 2, p. 147-157, 2000.

SAFRE, A. L. S. **Evapotranspiration and soil moisture estimation using different remote sensing platforms**. 2022, 114f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2022.

SALES, D. L. A.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W.; SOUZA, J. M. F. Estimativa de evapotranspiração e coeficiente de cultura do tomateiro industrial utilizando o algoritmo SAFER. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 3, p. 629-640, julho-setembro, 2017.

SANTOS, G. O.; HERNANDEZ, F. B. T.; ROSSETTI, J. C. Balanço hídrico como ferramenta ao planejamento agropecuário para a região de Marinópolis, noroeste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.4, n.3, p.142-149, 2010.

SENEY, G. B.; BOHMS, S.; SINGH, R. K.; GOWDA, P. H.; VELPURI, N. M.; ALEMU, H.; VERDIN, J. P. Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: A new parameterization for the SSEB approach. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, 49, p. 577-591, 2013.

SILVA JUNIOR, J. F.; HERNANDEZ, F. B. T.; SILVA, I. P. F.; REIS, L. S.; TEIXEIRA, A. H. C. Estabelecimento dos meses críticos para a agricultura irrigada a partir do estudo do balanço hídrico. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 12(2): 122-131, 2018.

SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; VILLA NOVA, N. A. Evapotranspiração do capim tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 705-712, 2005.

SOUZA, J. M. F.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; MESQUITA, M. Validação do modelo SAFER na estimativa da evapotranspiração da cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v. 25, n. 2, p. 247-262, abril-junho, 2020.

SQUIZATO, M. **Evolução e identificação da área irrigada por pivô central no Noroeste Paulista**. 2017. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Ilha Solteira, 2017

TEIXEIRA, A. H. C. Avaliação dos componentes do balanço de energia durante o primeiro ano de cultura da banana. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.1, p.28-32, 2001.

TEIXEIRA, A. H. C. 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**, v. 2, n. 5, p. 1287-1319, 2010.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; VICTORIA, D. C.; BOLFE, E. L. Irrigation performance assessments for corn crop with Landsat images in the São Paulo state, Brazil. **Water Resources and Irrigation Management**, v.3, n.2, p.91-100, 2014.

TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A. M.; COAGUILLA, D. N. Evapotranspiration, biomass production and water productivity acquired from Landsat 8 images in the northwestern side of the São Paulo state, Brazil. **SPIE**, 2016.

TEIXEIRA, A. H. C. Modelling evapotranspiration by remote sensing parameters and agrometeorological stations. In: NEALE, C.M.U.; COSH, M.H. (Ed.). **Remote Sensing and Hydrology**. Wallingford, UK. v. 352, p. 154-157, 2012.

VENANCIO, L.P. **Remote sensing approaches for evapotranspiration and yield estimations on irrigated corn fields**. 2019, 155f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

WARREN, M. S. Desagregação espacial de estimativas de evapotranspiração real obtidas a partir do sensor MODIS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n. 2, p. 153 - 162, 2013.