

## DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO NOROESTE PAULISTA<sup>1</sup>

**DANIELA ARAÚJO DE OLIVEIRA<sup>2</sup>; FERNANDO BRAZ TANGERINO HERNANDEZ<sup>3</sup>; REGIANE DE CARVALHO BISPO<sup>4</sup> E ANTONIO HERIBERTO DE CASTRO TEIXEIRA<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Parte da dissertação de mestrado do primeiro autor.

<sup>2</sup> Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, UNESP, Rua José Barbosa de Barros, 1780, 18610-034, Botucatu, São Paulo, Brasil. E-mail: da.oliveira@unesp.br

<sup>3</sup> Professor Titular, Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos - DEFERS, UNESP, Avenida Brasil Sul, n° 56, Centro, 15385-000, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil. E-mail: fernando.braz@unesp.br

<sup>4</sup> Professora Doutora, Colegiado de Engenharia Agrônômica, UNIVASF, Rodovia BR 407, 12 Lote 543, 56300-000, Petrolina, Pernambuco, Brasil. E-mail: regianecarvalhoks@gmail.com

<sup>5</sup> Professor Externo, Departamento de Recursos Hídricos (PRORH), UFS, Av. Marechal Rondon, s/n, Jd. Rosa Elze, 49100-000, São Cristóvão, Sergipe, Brasil. E-mail: heribert@globomail.com

### 1 RESUMO

O sensoriamento remoto tornou-se uma importante ferramenta na agricultura, principalmente na obtenção de dados sobre variáveis climáticas, como o alcance de medidas de evapotranspiração. Dessa forma, o presente trabalho objetivou estimar a evapotranspiração em escala regional no Noroeste Paulista e sua distribuição temporal e espacial por meio da aplicação do algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) em imagens dos satélites Landsat 5 e Landsat 8 dos anos 2010, 2017 e 2018. O algoritmo SAFER mostrou-se eficaz para a estimativa de evapotranspiração em larga escala e esta metodologia pode ser aplicada em estudos futuros para monitoramento dos indicadores agrícolas e climatológicos da região. Os valores médios de evapotranspiração variaram entre 0,5 e 2,5 mm dia<sup>-1</sup>, sendo os maiores valores registrados nas áreas irrigadas. Regionalmente, as maiores médias foram obtidas no período de chuvas da região, com valores próximos a 2 mm dia<sup>-1</sup>.

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto, SAFER, larga escala.

**OLIVEIRA, D. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; BISPO, R. C.; TEIXEIRA, A. H. C.  
SPATIO-TEMPORAL DISTRIBUTION OF EVAPOTRANSPIRATION IN  
NORTHWESTERN SÃO PAULO STATE, BRAZIL**

### 2 ABSTRACT

The remote sensing became an important tool in agriculture, mainly in obtaining data on weather variables, like the range of evapotranspiration averages. This way, this work aimed to estimate the evapotranspiration in a regional scale in the Paulista Northwest and it's temporal and spatial distribution by using SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) algorithm and images from the satellites Landsat 5 and Landsat 8 in 2010, 2017, and 2018. The SAFER algorithm showed effective for estimating evapotranspiration in large

scale and this methodology can be applied in further studies to monitor agricultural and climatological indicators of the region. The medium values of evapotranspiration ranged from 0.5 and 2.5 mm day<sup>-1</sup>, being the highest values were recorded in the irrigated areas. Regionally, the highest averages were obtained in the rainy season of the region, with values close to 2 mm day<sup>-1</sup>.

**Keywords:** remote sensing, SAFER, large scale.

### 3 INTRODUÇÃO

A evapotranspiração (ET) consiste no processo de transferência da água da superfície terrestre para a atmosfera por dois meios diferentes: a evaporação da água livre na superfície evaporante e a transpiração das plantas (ALLEN et al., 1998), sendo assim uma das mais importantes variáveis do ciclo hidrológico e o seu entendimento se torna essencial para o gerenciamento dos recursos hídricos (BASTIAANSSEN et al., 2005).

O Noroeste do estado de São Paulo está inserido na região denominada Grandes Lagos, tendo grande potencial para o desenvolvimento da agricultura irrigada. Apesar da grande oferta de recursos hídricos, é a região que registra as maiores taxas de evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) do estado e uma alta variabilidade de chuvas, ocasionando um período de déficit hídrico ao longo do ano de até 8 meses (SANTOS; HERNANDEZ; ROSSETTI, 2010; HERNANDEZ et al., 2003).

A quantificação correta de ET contribui para um melhor conhecimento do ciclo da água e uma melhor capacidade de quantificar mudanças futuras na gestão dos recursos hídricos de determinada região, porém a ET não pode ser observada diretamente em larga escala e assim técnicas de sensoriamento remoto oferecem possibilidades crescentes para o alcance de informações agrometeorológicas em escala regional (GHILAIN; ARBOLEDA; GELLENS-MEULENBERGHS, 2011). A evapotranspiração pode ser estimada por meio de modelos que utilizam imagens de

sensores orbitais e dados agrometeorológicos (ALLEN et al., 2007; BASTIAANSSEN et al., 2005; SENAY; BUDDE; VERDIN, 2011).

A utilização do sensoriamento remoto se destaca por ser uma técnica de baixo custo e de grande cobertura espacial e temporal, em que não há necessidade de dados de solo ou da cultura (BASTIAANSSEN et al., 2005). Nesse contexto, a aplicação de algoritmos em imagens de satélite para estimativa da evapotranspiração tem sido utilizada em várias regiões do Brasil, inclusive no Noroeste Paulista (TEIXEIRA et al., 2014; FRANCO; HERNANDEZ; TEIXEIRA, 2015; AVILEZ, 2018; OLIVEIRA et al., 2019).

Dentre essas tecnologias, destaca-se o algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Retrieving Evapotranspiration*) (TEIXEIRA, 2010). O SAFER baseia-se na modelagem da razão entre a evapotranspiração real e a evapotranspiração de referência, relacionando os seguintes parâmetros obtidos por sensoriamento remoto: temperatura da superfície, albedo e Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) (TEIXEIRA, 2010; TEIXEIRA et al., 2013). Diferentemente dos modelos que propõem realizar a solução completa da equação do balanço de energia, limitando a aplicabilidade desta tecnologia para áreas amplas ou com carência de dados, o SAFER tem como principal vantagem sua praticidade operacional, pois pode ser aplicado com dados meteorológicos de estações agrometeorológicas, convencionais

e automáticas, possibilitando avaliar os indicadores de produtividade da água ao longo dos anos, visto que sensores automáticos são avanços relativamente recentes na tecnologia instrumental (TEIXEIRA et al., 2013).

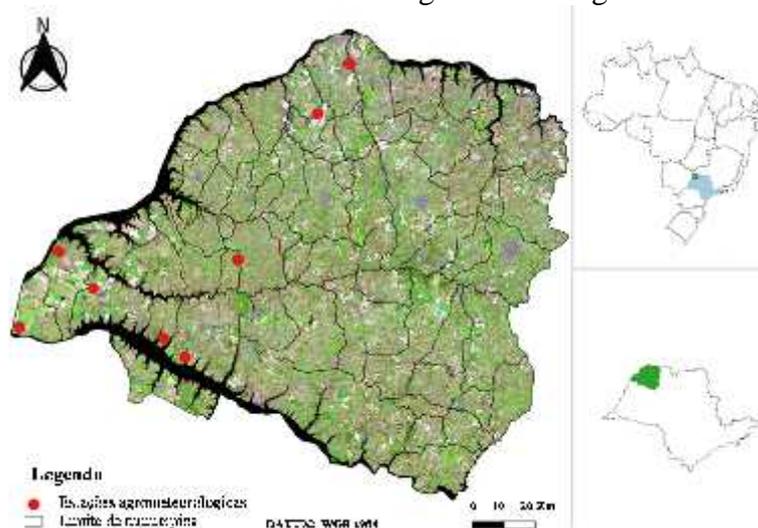
Assim, este trabalho teve por objetivo introduzir estudos de distribuição temporal e espacial da evapotranspiração em escala regional no Noroeste Paulista, combinando sensoriamento remoto e dados de estações agrometeorológicas, a fim de determinar a evapotranspiração e a possível evapotranspiração incremental nos anos 2010, 2017 e 2018, aplicando o algoritmo SAFER.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Localização da área de estudo

A área de estudo localiza-se no Noroeste do estado de São Paulo, entre as coordenadas 19°47' e 21°8' de Latitude Sul e 49°47' e 51°34' de Longitude Oeste, abrangendo 60 municípios em uma área de 1.613.000 hectares. Essa área foi delimitada com base no trabalho de Silva Junior (2017) de representabilidade operacional das variáveis obtidas pela Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista, composta por 8 estações automáticas localizadas em 7 municípios distintos da região, sendo eles: Ilha Solteira, Itapura, Marinópolis, Paranapuã, Pereira Barreto, Populina e Sud Mennucci (Figura 1).

**Figura 1.** Localização da área de estudo e da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista.



### 4.2 Algoritmo SAFER

Para a modelagem dos componentes de energia obtidos por sensoriamento remoto, foi aplicada a metodologia descrita por Teixeira et al. (2013), permitindo a obtenção dos seguintes parâmetros: a refletância de cada banda; albedo planetário; albedo de superfície ( $\rho_0$ ); saldo de radiação; fluxo de calor latente; fluxo de calor sensível; fluxo de calor no solo;

temperatura de brilho das bandas 10 e 11; radiação solar global incidente, radiação de onda longa emitida pela superfície terrestre; radiação de onda longa emitida pela atmosfera; temperatura da superfície ( $T_0$ ) e Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*).

Os parâmetros obtidos por sensoriamento remoto foram aplicados na Equação 1, onde o algoritmo SAFER

calcula a relação entre a evapotranspiração real ou atual e a evapotranspiração de referência ( $ET/ET_0$ ):

$$ETa/ET_0 = \exp [a + b (T_0 / (\alpha_0 \times NDVI))](1)$$

Em que,

$T_0$  = Temperatura de superfície (K);

$\alpha_0$  = Albedo;

NDVI = Índice de vegetação de diferença normalizada;

Coefficiente “a” = Ajustado como 1,0 para o Noroeste Paulista (HERNANDEZ et al., 2014); e

Coefficiente “b” = Ajustado para -0,008 (TEIXEIRA, 2010).

A evapotranspiração atual (ETa) ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) em larga escala foi obtida por meio da Equação 2:

$$ETa = ET_0 \times (ETa/ET_0) \quad (2)$$

Em que,

$ET_0$  = Evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ ).

### 4.3 Aquisição da base de dados

As variáveis agrometeorológicas necessárias para a aplicação do SAFER foram obtidas nas estações da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista, que já disponibiliza a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) em base diária estimada pela equação de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), bem como os dados de precipitação na região em cada ano estudado (UNESP, 2019).

Para a aplicação do algoritmo SAFER utilizaram-se imagens dos anos 2010, 2017 e 2018. Para os anos de 2017 e 2018 foram utilizadas imagens do satélite americano Landsat 8, que entrou em órbita no ano de 2013, e para o ano de 2010, utilizou-se as imagens do satélite Landsat 5. Ambos têm cenas oferecidas de

abrangência de 185 por 185 km, revisitando a mesma área a cada 16 dias.

Foram coletadas imagens da órbita 222 e ponto 74 disponibilizadas de forma gratuita pelo *United States Geological Survey* por meio da plataforma *Earth Explorer*. Considerou-se imagens parcial ou totalmente livre de nuvens. Para estimativa da ETa via sensoriamento remoto as imagens foram processadas, com correções geométricas, calibrações radiométricas e informações biofísicas.

Desta forma, as imagens utilizadas foram:

02/02/2010,	22/03/2010,
07/04/2010,	23/04/2010,
26/06/2010,	12/07/2010,
17/11/2010,	21/02/2017,
28/05/2017,	13/06/2017,
31/07/2017,	01/09/2017,
19/10/2017,	23/01/2018,
28/03/2018,	13/04/2018,
15/05/2018,	02/07/2018,
19/08/2018,	22/10/2018 e 09/12/2018.

### 4.4 Processamento

As imagens foram processadas no software ILWIS 3.3 Academic, e após a aplicação do algoritmo SAFER foram exportadas para o software ArcGIS - Versão 10.1 (ESRI) licenciado para a Área de Hidráulica e Irrigação da UNESP Ilha Solteira, onde foram extraídos os dados de ETa e  $ET/ET_0$  para planilha eletrônica e elaborados gráficos, com a média mensal dessas variáveis e, para os meses que não tinham imagens de satélite sem a interferência grande de nuvens, foram feitas médias entre a imagem anterior e a subsequente.

Os dados mensais de precipitação e evapotranspiração de referência dos anos 2017 e 2018 foram interpolados por meio do método Krigagem, seguindo a metodologia recomendada por Silva et al. (2013), porém no ano de 2010 só haviam duas estações agrometeorológicas implantadas na região, e assim, neste ano,

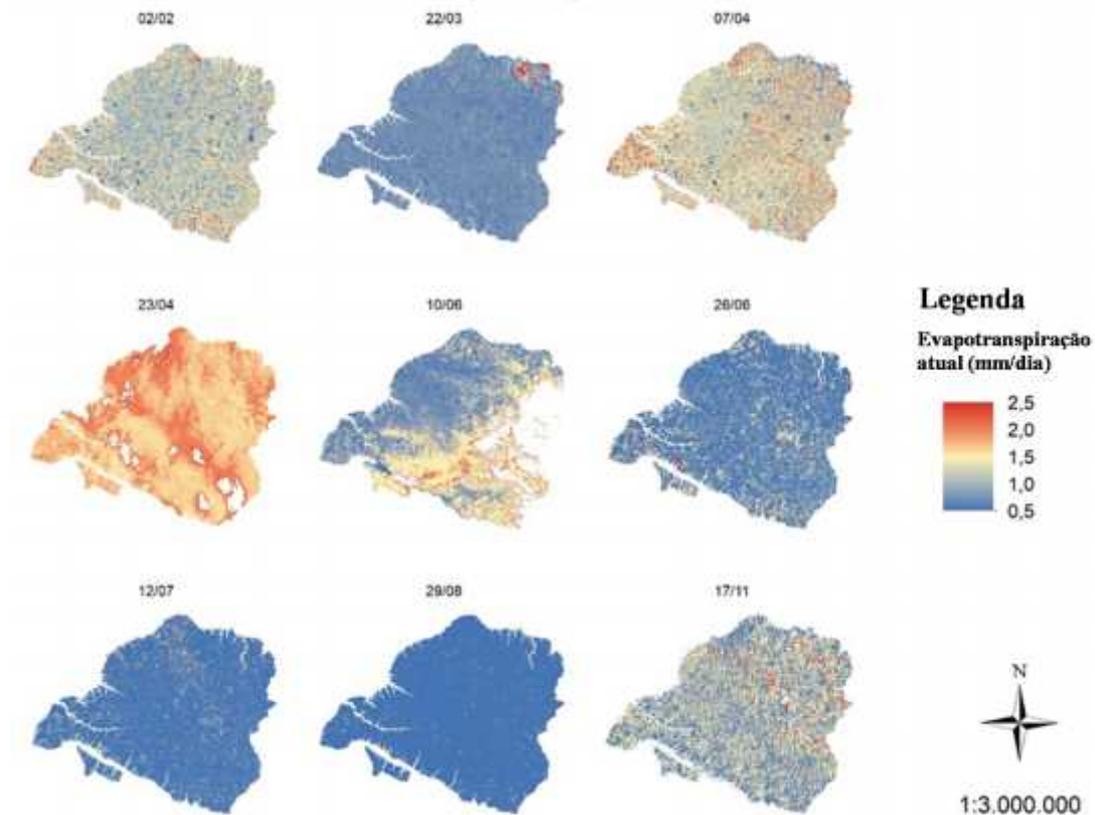
os dados foram interpolados por IDW (Ponderação do Inverso da Distância). Todos os mapas foram confeccionados no software ArcGIS.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

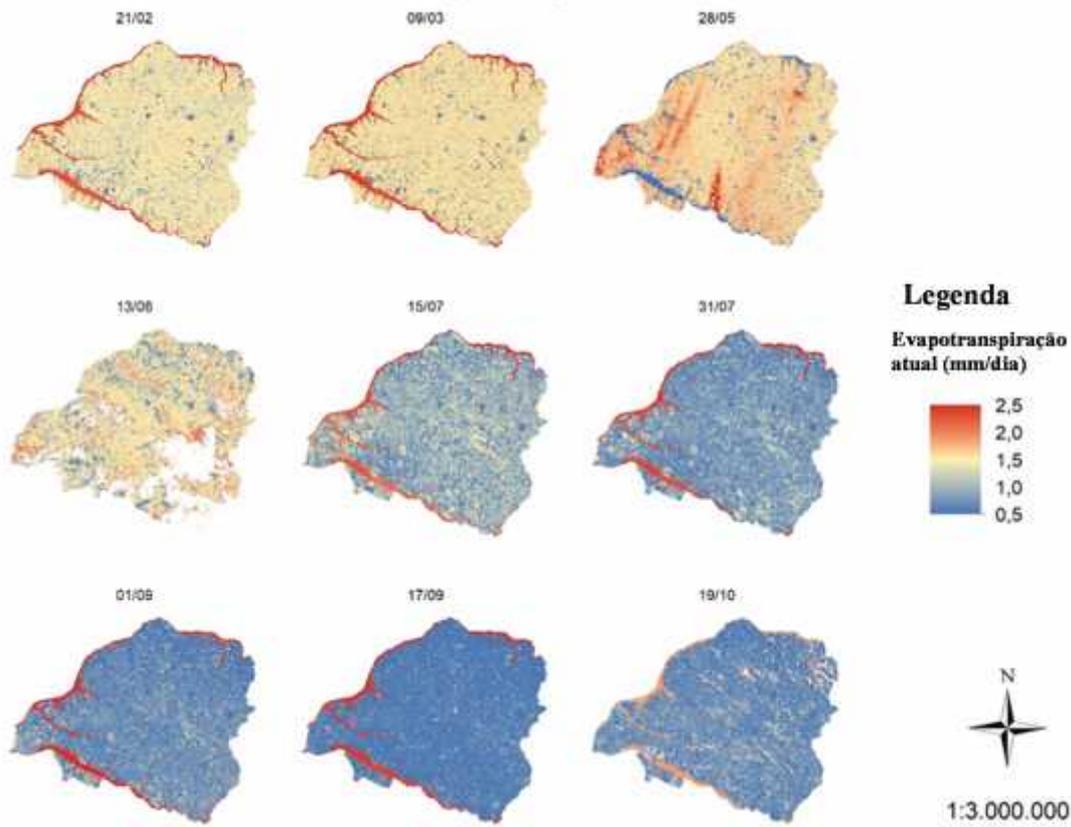
Na Figuras 2, 3 e 4 estão apresentados os mapas de

evapotranspiração atual da área de estudo, referentes as datas das imagens de satélite, para os anos de 2010, 2017 e 2018, respectivamente. Observa-se que os valores de ETA variaram entre 0,5 a 2,5 mm dia<sup>-1</sup> na região nos anos estudados, semelhante ao encontrado por Feitosa et al. (2015) ao avaliar a ETA em uma microbacia no Noroeste Paulista, com área correspondente a 0,3% da área de estudo deste trabalho.

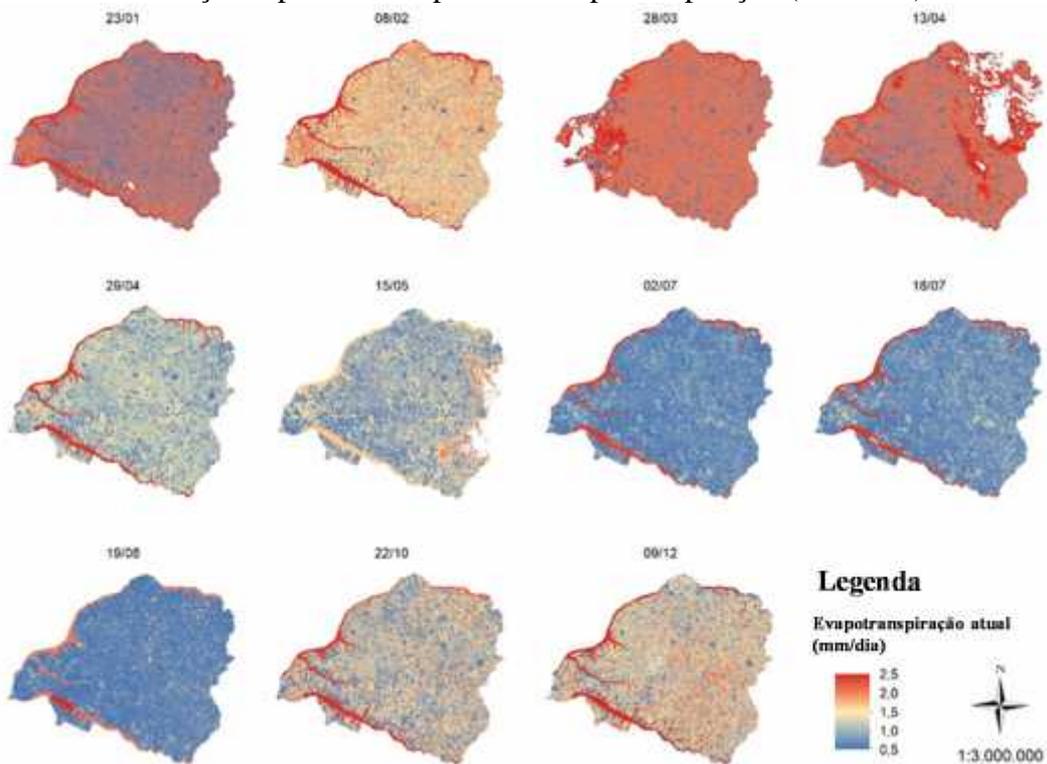
**Figura 2.** Distribuição espacial e temporal da evapotranspiração (mm dia<sup>-1</sup>) em 2010.



**Figura 3.** Distribuição espacial e temporal da evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) em 2017.



**Figura 4.** Distribuição espacial e temporal da evapotranspiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) em 2018.



Os valores médios anuais em 2010, 2017 e 2018 foram respectivamente 1,0; 1,2 e 1,2 mm dia<sup>-1</sup>. A variação da evapotranspiração em condições regionais pode variar pela alteração do regime de chuvas ao longo do ano, tanto no tempo como no volume, pela alteração das variáveis climáticas, pela mudança no uso da terra e ainda pela adoção de sistemas de irrigação como fator de sustentabilidade do negócio de produzir alimentos.

A melhor distribuição das chuvas ao longo do ano em volume adequado leva à manutenção do armazenamento de água no solo em níveis adequados à maior evapotranspiração das culturas, e por outro lado, o aumento no valor das variáveis climáticas especialmente radiação global, temperatura e velocidade do vento elevará a evapotranspiração de referência, que poderá ou não aumentar a evapotranspiração atual de uma área de interesse, à depender do armazenamento de água no solo, que pode ser garantido em nível adequados pelo uso dos sistemas de irrigação. Assim, há a necessidade de entender quais as razões que levam ao incremento da evapotranspiração de uma região ou área de interesse, pois poderá comprometer o uso múltiplo ou determinadas atividades econômicas dependentes dos recursos hídricos superficiais.

Levando em consideração estudos com culturas específicas na região, Teixeira et al. (2014) encontraram valores de ETa superiores a esse trabalho, entre 1,1 a 4,4 mm dia<sup>-1</sup> durante o ciclo produtivo do milho irrigado. Para a cana-de-açúcar, Oliveira et al. (2019) obtiveram valores de ETa de até 3,5 mm dia<sup>-1</sup> em condição irrigada e de no máximo 2 mm dia<sup>-1</sup> para cultivos em sequeiro, pois nestes locais podem ter déficit hídrico no solo no dia da passagem do satélite, refletindo assim nos baixos valores de evapotranspiração.

Ainda nesse contexto, Franco et al. (2015) mostram uma variabilidade espacial de valores de ETa em uma mesma região

com diferentes usos do solo, onde em um mesmo dia, o fragmento de mata (condições naturais) apresentou ETa de 0,64 a 1,28 mm dia<sup>-1</sup>, culturas sob pivô central chegaram a até 3,83 mm dia<sup>-1</sup>, já em um dia com precipitação ocorrida poucos dias antes, observa-se uma uniformidade nos valores de ETa nos diferentes tipos de cobertura de solo analisados.

Nota-se que em todos os anos analisados, os menores valores foram obtidos entre os meses julho e outubro, meses que correspondem ao maior déficit hídrico na região (SILVA JUNIOR et al., 2018; OLIVEIRA; HERNANDEZ; TEIXEIRA, 2019). Araujo et al. (2017) apresentam valores mínimos de evapotranspiração abaixo de 20 mm mês<sup>-1</sup> no cerrado para o período seco, devido ao fato de que suas árvores perdem as folhas nesse período para evitar a perda excessiva de água.

As maiores médias de ETa na região foram observadas nos meses chuvosos, corroborando com Coaguila et al. (2017), que afirmam que a variabilidade temporal de ETa se ajusta a sazonalidade climática da região, principalmente às chuvas, reforçando a forte relação entre água no solo e evapotranspiração; nesse estudo o maior valor de 2,2 mm dia<sup>-1</sup> no dia 23/04/2010 (Figura 2), reflexo de uma precipitação de cerca de 50 mm dias antes da passagem do satélite, seguido de valores de 1,8 mm dia<sup>-1</sup> em 21/02/2017, 09/03/2017 e 28/03/2018. Neste sentido, a ocorrência da evapotranspiração incremental devido à alteração do uso do solo em larga escala dependerá da relação entre as mudanças de culturas e a área total de interesse e de quão irrigados são estes novos usos.

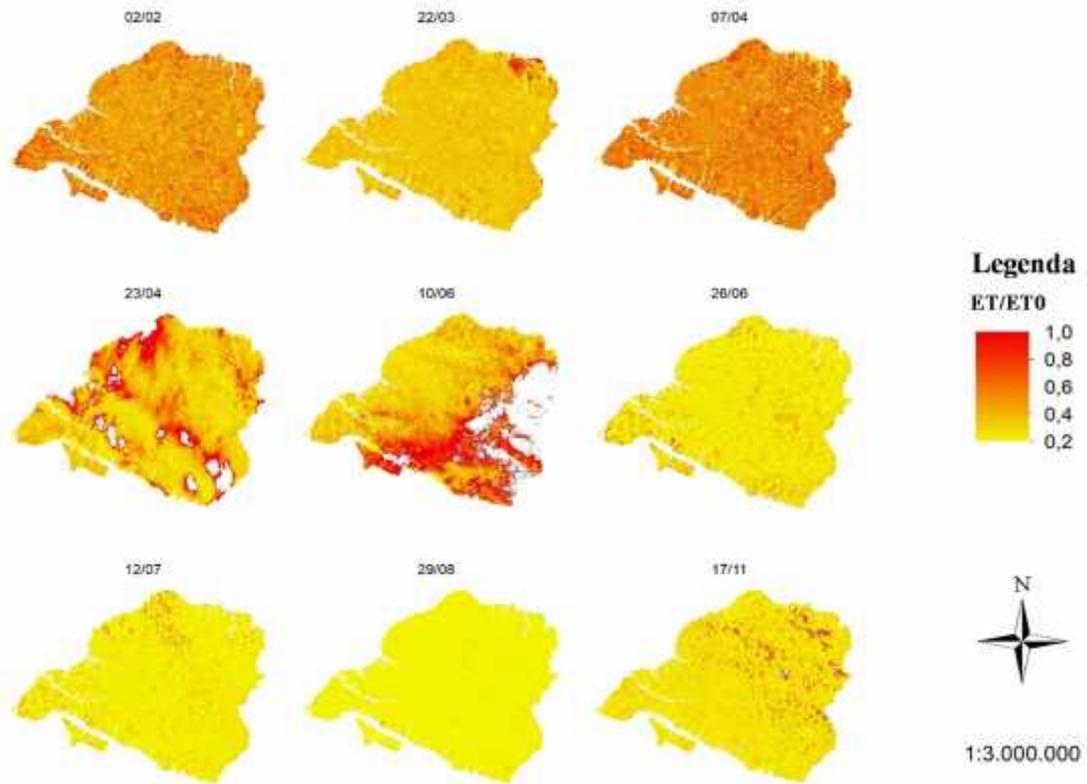
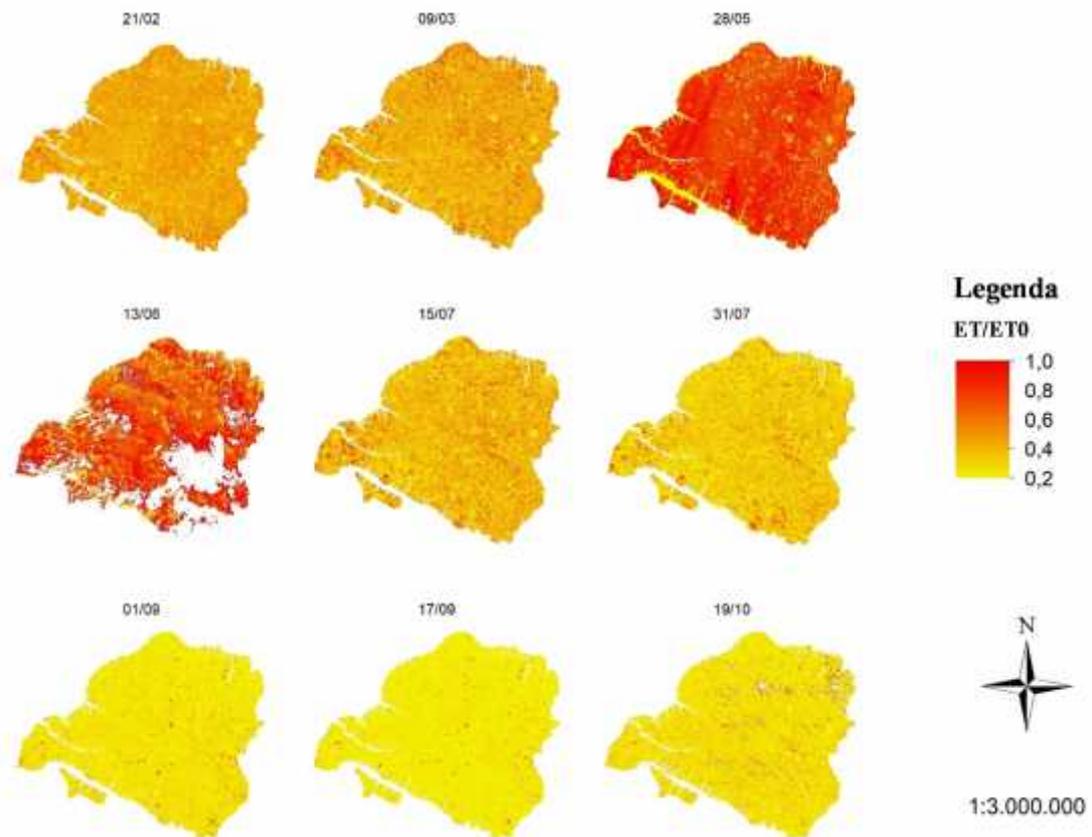
Segundo Allen et al. (1998), a evapotranspiração atual pode igualar-se a evapotranspiração da cultura - que por definição é o máximo potencial de ET por uma cultura - quando há boas condições no campo, ou seja, sem excesso ou escassez hídrica e sem a presença de pragas e

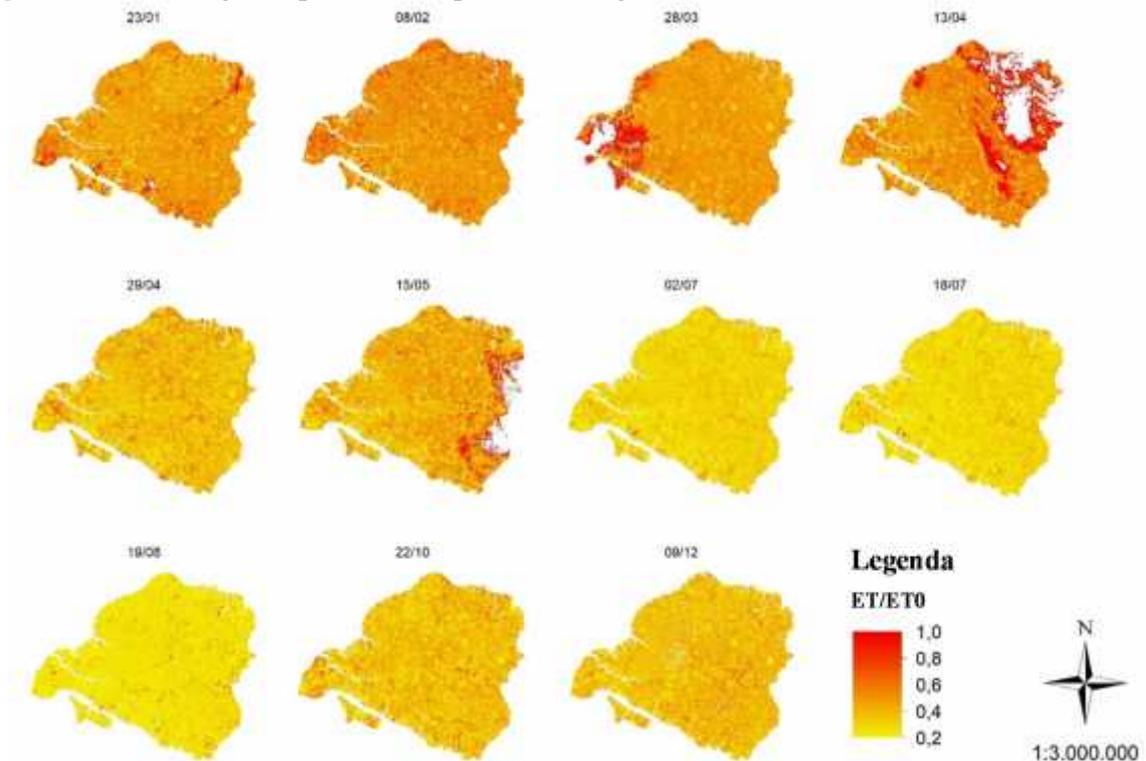
doenças, portanto a estimativa de  $ET_a$  por meio de técnicas de sensoriamento remoto pode ser um bom indicador de qualidade de manejo de irrigação e fitossanitário de uma área cultivada.

Os mapas da relação entre a evapotranspiração atual e a evapotranspiração de referência ( $ET/ET_0$ ) são apresentados nas Figuras 5, 6 e 7. Especialmente, os valores variaram entre 0,2 e 1,0, tendo a maior média na região de 0,7 no dia 28/05/2017, mês de adequada oferta de chuvas em um dia em que a evapotranspiração de referência foi de apenas 2,3 mm (Figura 6), valor abaixo do comum para o mês no Noroeste Paulista, que tem uma média de 3,9 mm  $\text{dia}^{-1}$  (SILVA JUNIOR, 2017). Identificar a evapotranspiração da cultura e relacioná-la com a evapotranspiração de referência resulta nos valores de coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), que variam de 0,2 a 1,2 (ALLEN et al., 1998), entretanto em condições limitantes em campo, a evapotranspiração atual é inferior ao potencial das culturas, diminuindo os valores dos coeficientes de cultivo atuais, ou seja, aqueles que de fato são registrados.

Nos três anos analisados a variação temporal da relação  $ET/ET_0$  é semelhante, tendo as maiores médias no primeiro semestre do ano, quando até março/abril ocorre o armazenamento de água no solo, portanto a evapotranspiração é alta, e a partir de abril quando começa a ter déficit hídrico a evapotranspiração de referência é menor, devido principalmente à queda de temperatura nessa época entre maio e julho, mantendo a média regional entre 0,3 e 0,7 nesses meses. Por outro lado, as menores médias foram observadas nos últimos seis meses, período de maior déficit hídrico e em que a  $ET_0$  sobe na região, e a  $ET_a$  estimada pelo SAFER não aumentou na mesma proporção, deixando os valores de  $ET/ET_0$  entre 0,2 e 0,3.

A maior dificuldade ao se trabalhar aplicando um modelo como o SAFER em larga escala é que a região conta com diferentes culturas e cultivos, como irrigado e sequeiro, além de áreas com solo descoberto, mata virgem, entre outros, assim ao extrair dados regionais de  $ET/ET_0$  é difícil comparar aos valores padrões da literatura, descritos por Allen et al. (1998), pois para cada cultura e sua diferente fase fenológica é determinado um valor.

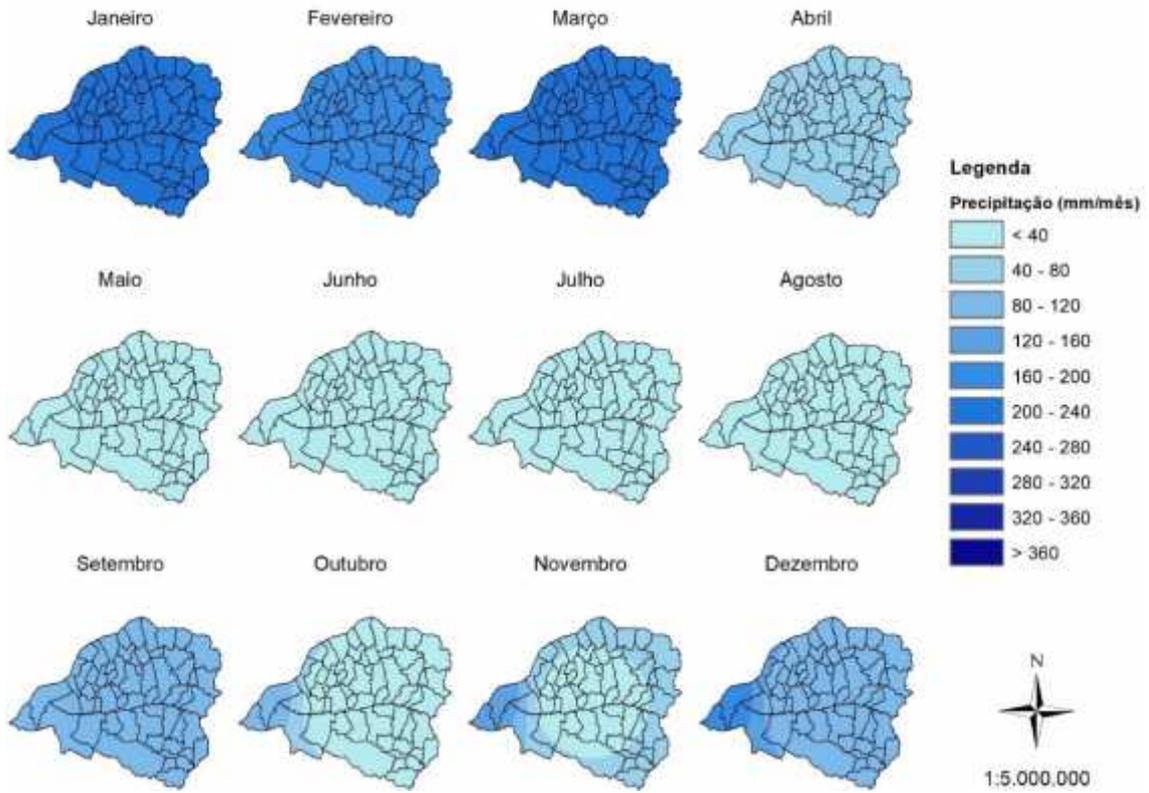
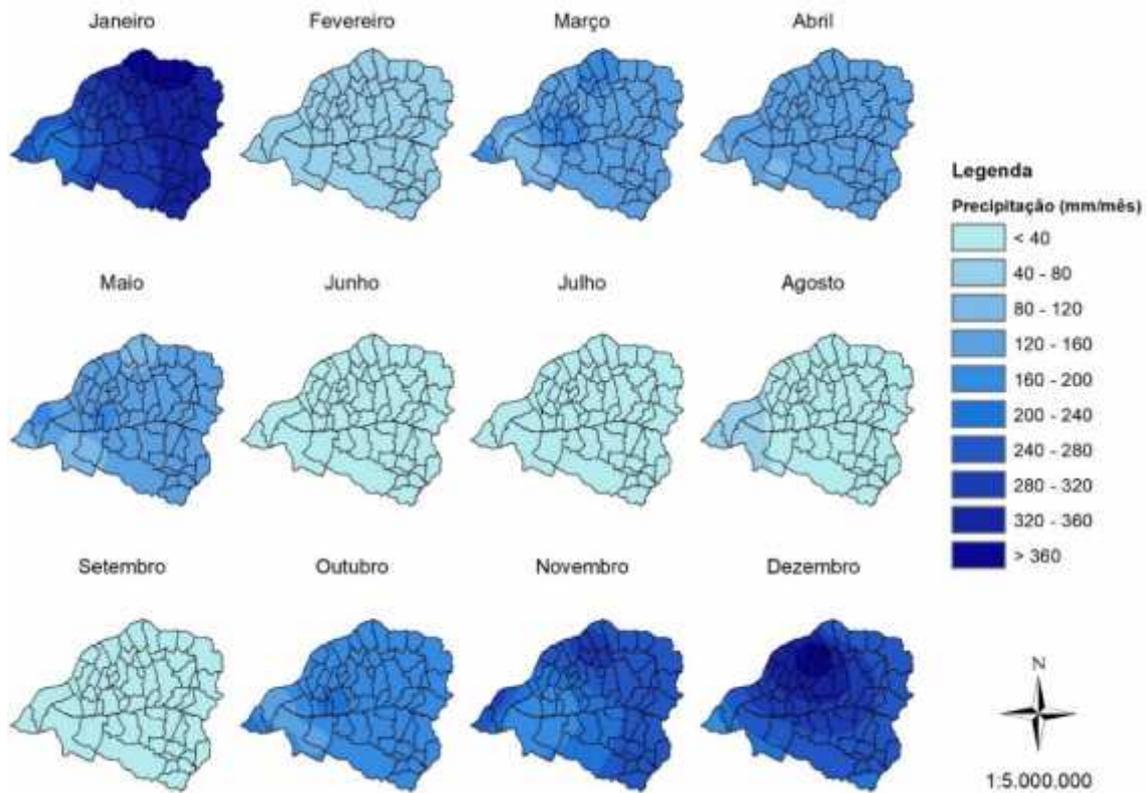
**Figura 5.** Distribuição espacial e temporal da relação  $ET/ET_0$  em 2010.**Figura 6.** Distribuição espacial e temporal da relação  $ET/ET_0$  em 2017.

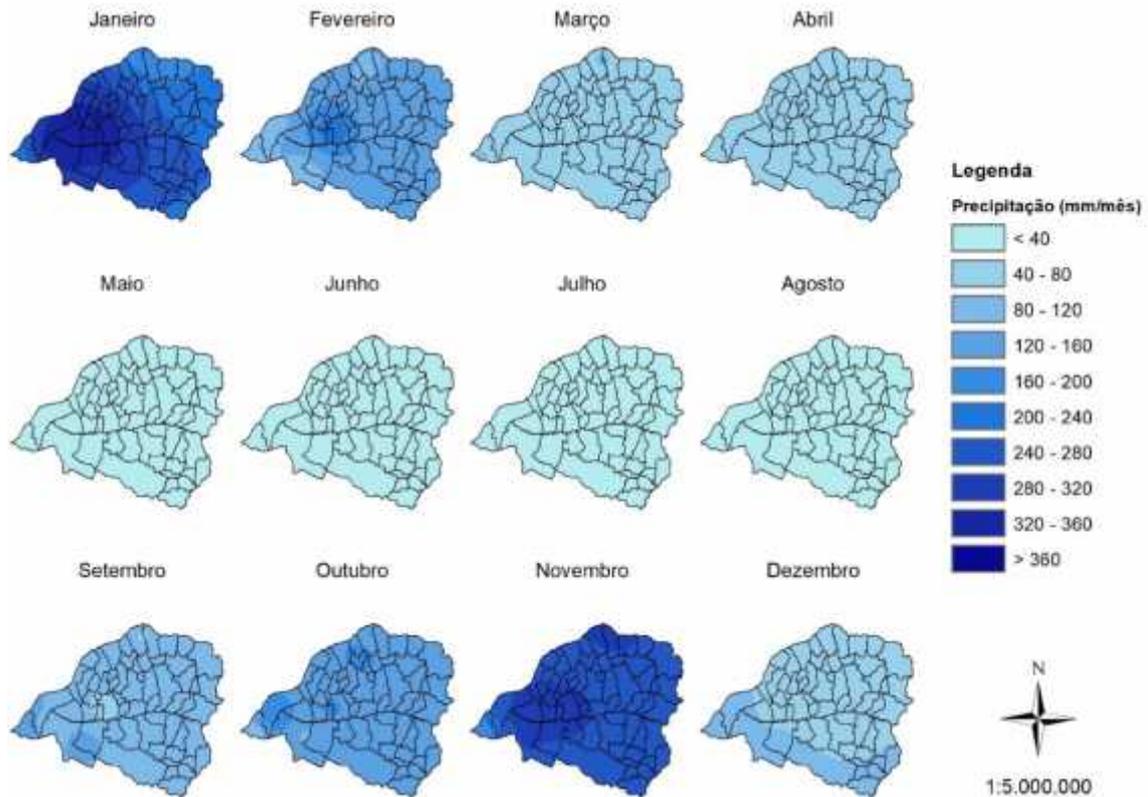
**Figura 7.** Distribuição espacial e temporal da relação  $ET/ET_0$  em 2018.

Os valores da relação  $ET/ET_0$  encontrados nesse trabalho, no qual a maioria das médias foram 0,3, são considerados baixos em relação ao encontrado na literatura. O mesmo foi observado por Avilez (2018) e Oliveira et al. (2019) ao determinar o coeficiente de cultivo através do SAFER na cana-de-açúcar e ainda por Bispo, Hernandez e Trinca (2019) onde o SAFER subestima os valores de evapotranspiração na cultura do milho. Porém Sales et al. (2017) encontrou valores de  $ET/ET_0$  próximos aos de Allen et al. (1998) para o tomateiro rasteiro cultivado sem restrição hídrica no estado de Goiás.

A distribuição mensal de chuvas na região Noroeste Paulista nos anos estudados é apresentada nas Figuras 8, 9 e 10. A soma de precipitação anual foi de 1.078 mm em 2010, 1.548 mm em 2017 e 1.120 mm em

2018, tendo em vista que a média para os oito anos na região foi de 1.243 mm, em 2010 choveu apenas 86% do esperado, em 2018 chegou a 90% e em 2017 a precipitação foi 25% maior que a série histórica. Apesar do volume, a variabilidade temporal de chuvas é grande na região tendo meses com precipitação menor que 40 mm e outros que ultrapassa 300 mm, volume acumulado em poucas e volumosas chuvas, fazendo da agricultura de sequeiro um grande desafio no Noroeste do estado de São Paulo, visto que o armazenamento de água no solo dessas volumosas chuvas é limitado. O período de menor precipitação, que tem início em abril/maio e termina em outubro/novembro, resulta nos oito meses de deficiência hídrica, característica da região relatada nos trabalhos de Santos, Hernandez e Rossetti (2010) e Silva Junior et al. (2018).

**Figura 8.** Distribuição de chuvas no Noroeste Paulista em 2010.**Figura 9.** Distribuição de chuvas no Noroeste Paulista em 2017.

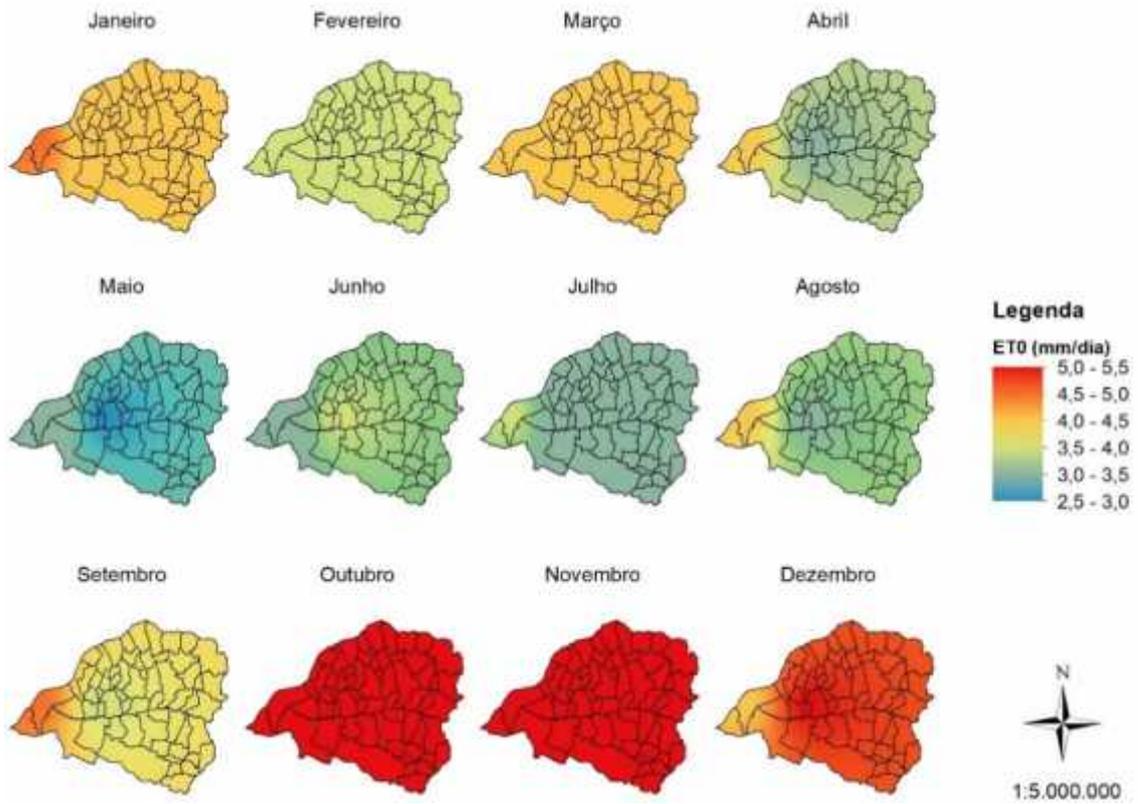
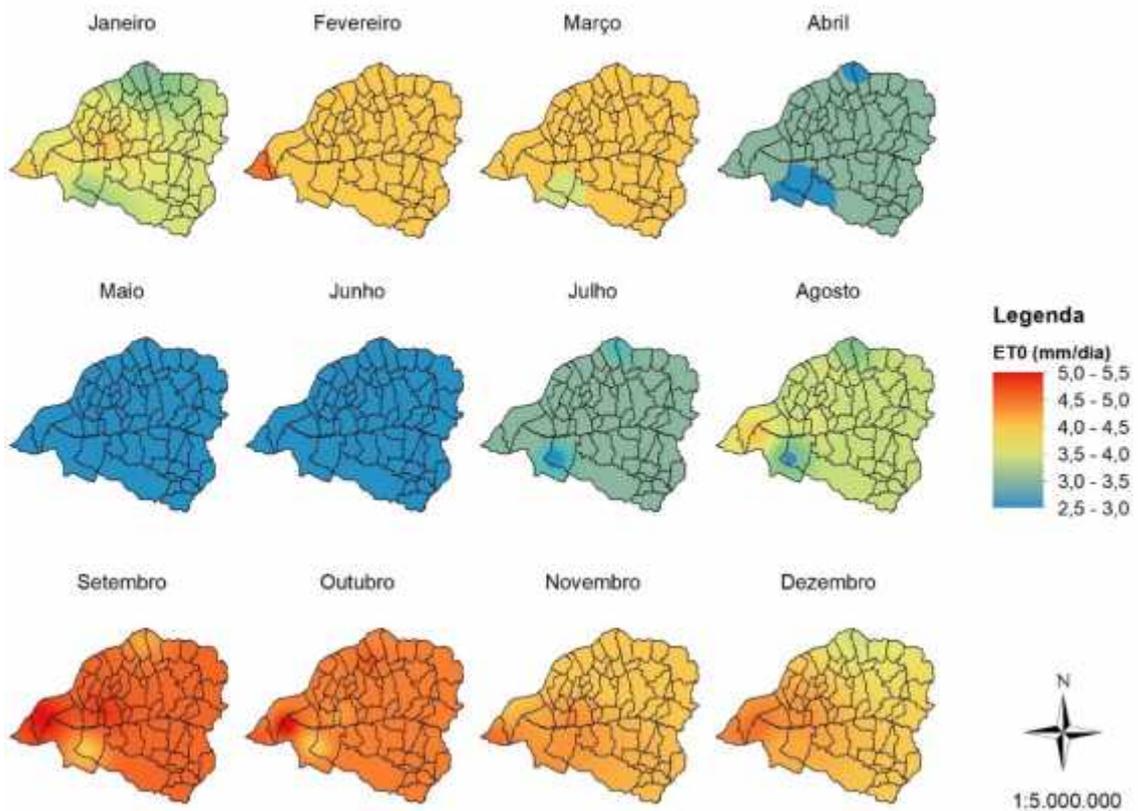
**Figura 10.** Distribuição de chuvas no Noroeste Paulista em 2018.

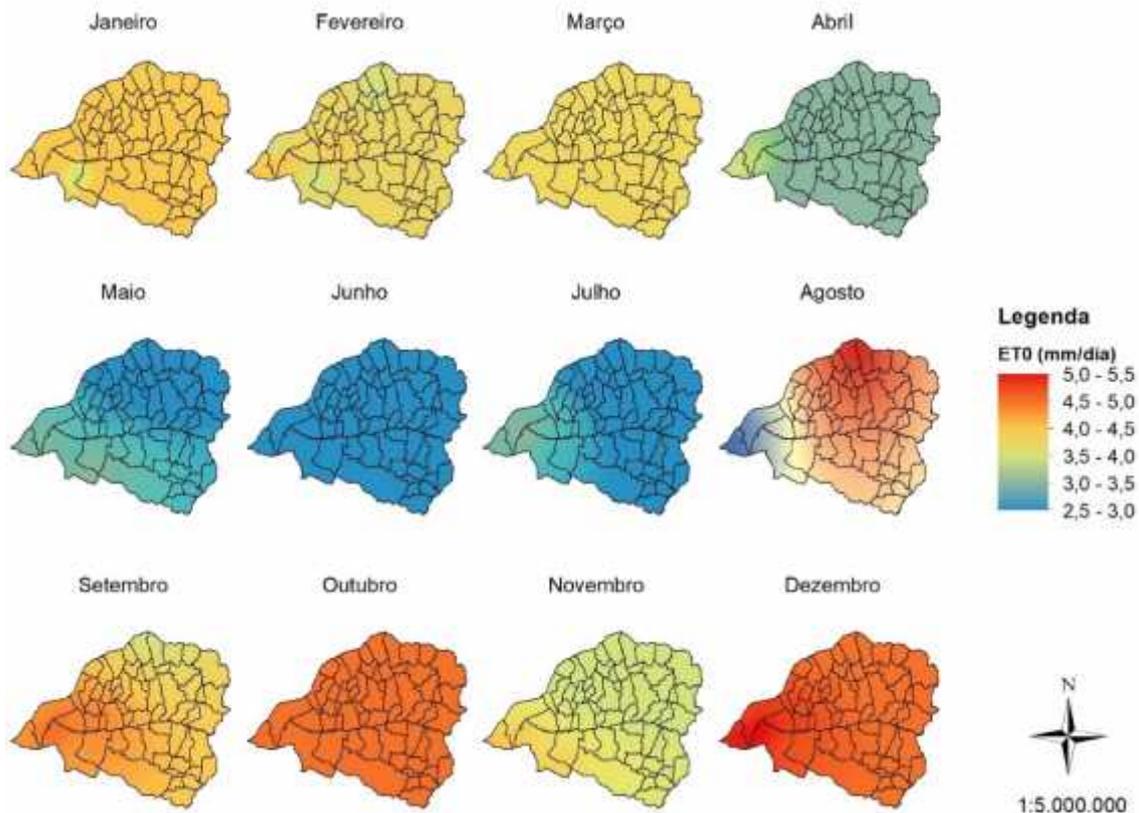
Em janeiro de 2018 também foi observada uma variabilidade espacial de precipitação de até 130 mm entre as localidades. Segundo Oliveira, Hernandez e Teixeira (2019) 2018 foi um ano difícil para a agricultura na região, pois algumas localidades ficaram até 166 dias sem chuvas maiores que 10 mm comprometendo os cultivos de sequeiro e elevando os custos de produção da agricultura irrigada, mas ainda assim fazendo-se relevante os investimentos em sistemas de irrigação para a segurança hídrica a fim de garantia das produtividades das lavouras do Noroeste Paulista, como afirmam Bispo, Hernandez e Teixeira (2017) e Hernandez et al. (2003).

Cunha e Martins (2009) constataram somente 4 meses de déficit hídrico ao ano em dois municípios do Estado de São Paulo (Botucatu e São Manuel) que possuem precipitação anual próximas aos valores

registrados no Noroeste Paulista, provavelmente em decorrência de menores taxas de evapotranspiração e melhor distribuição de chuvas. O mesmo foi observado por Horikoshi e Fisch (2007) que com uma precipitação anual de 1.336 mm no município de Taubaté, somente 93 mm a mais que a média histórica do Noroeste do estado, apresenta 4 meses de déficit hídrico anual.

As taxas de evapotranspiração de referência - dependente das variáveis meteorológicas - para os anos estudados estão apresentadas nas Figuras 11, 12 e 13. Nota-se que os maiores valores de  $ET_0$  são entre setembro e dezembro, com localidades registrando médias mensais de até  $5,5 \text{ mm dia}^{-1}$ . As médias anuais de 2010 (11), 2017 (12) e 2018 (13) foram respectivamente 4,2; 3,7 e  $3,6 \text{ mm dia}^{-1}$ .

**Figura 11.** Distribuição da evapotranspiração de referência no Noroeste Paulista em 2010.**Figura 12.** Distribuição da evapotranspiração de referência no Noroeste Paulista em 2017.

**Figura 13.** Distribuição da evapotranspiração de referência no Noroeste Paulista em 2018.

Apesar dos meses abril a julho possuírem as menores taxas de  $ET_0$ , também são os meses de seca na região, considerando o menor valor registrado, de  $2,5 \text{ mm dia}^{-1}$ , resulta-se em  $75 \text{ mm mês}^{-1}$  e essa perda de água não é repostada pelas chuvas, pois nesse período a precipitação não ultrapassa os 40 mm na região. Se tratando de evapotranspiração de cultura, a água perdida para a atmosfera ainda pode ser maior, dependendo da fase fenológica da cultura, pois esse valor de  $ET_0$  ainda será multiplicado por um coeficiente de cultura.

Embora as estações da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista estejam localizadas a poucos quilômetros de distância, a variação espacial das taxas de evapotranspiração também é alta. Em agosto de 2018 observou-se uma diferença de até 33 mm entre estações, o que representa em termos de manejo de irrigação a aplicação de até 330.000 litros de água a mais ou a menos em 1 hectare no mês, justificando a implantação e

disponibilidade de dados de estações agrometeorológicas como auxílio aos irrigantes, a fim de promover melhor aproveitamento dos recursos hídricos e garantia da produtividade das culturas.

Os dados de evapotranspiração atual, relação  $ET/ET_0$ , chuva e evapotranspiração de referência foram compilados e o resultado está exibido nas Figuras 14, 15 e 16. Nota-se que nos meses característicos de seca na região os valores de  $ET_a$  e conseqüentemente de  $ET/ET_0$  diminuem e voltam a aumentar com a chegada das chuvas. Para as taxas de  $ET_0$  observa-se que a variação nos anos de 2010 e 2018 foram mais próximos do histórico, ainda que a partir do mês de agosto os valores diferiram em até  $0,7 \text{ mm dia}^{-1}$ . Já em 2017 os valores de  $ET_0$  foram menores que o histórico em apenas três meses no ano. Em relação às chuvas, apesar de conseguir-se definir uma época seca para a região, o volume de chuva quando esta ocorre é muito instável, mudando sua

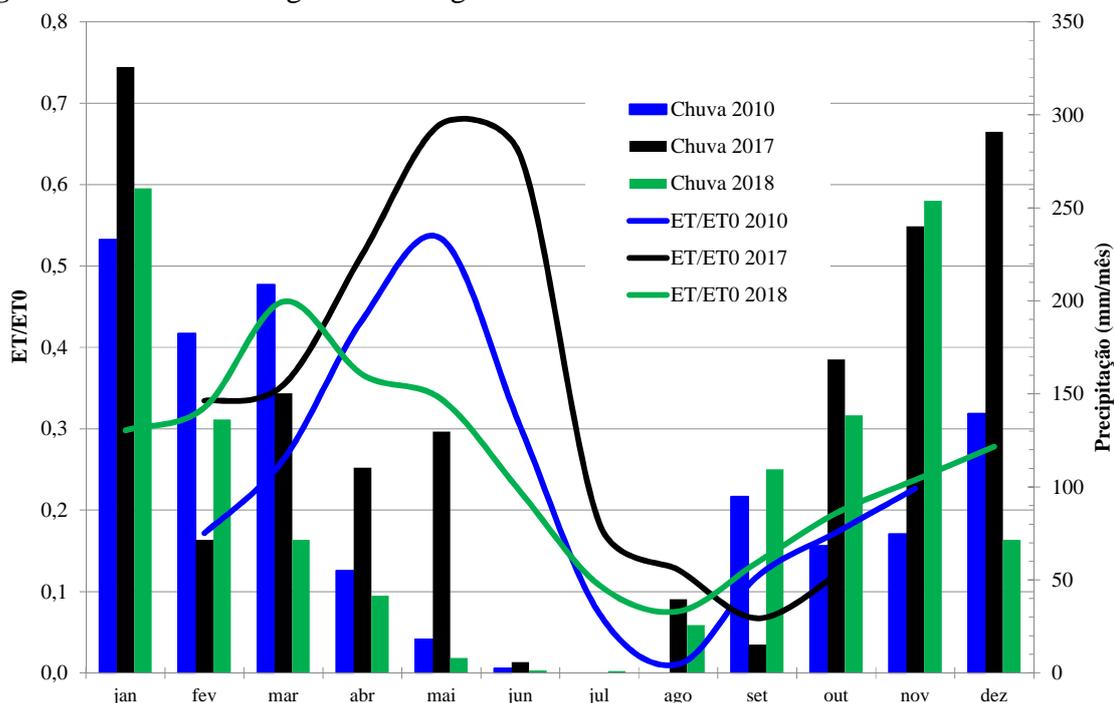
distribuição a cada ano, interferindo assim na estimativa de evapotranspiração atual.

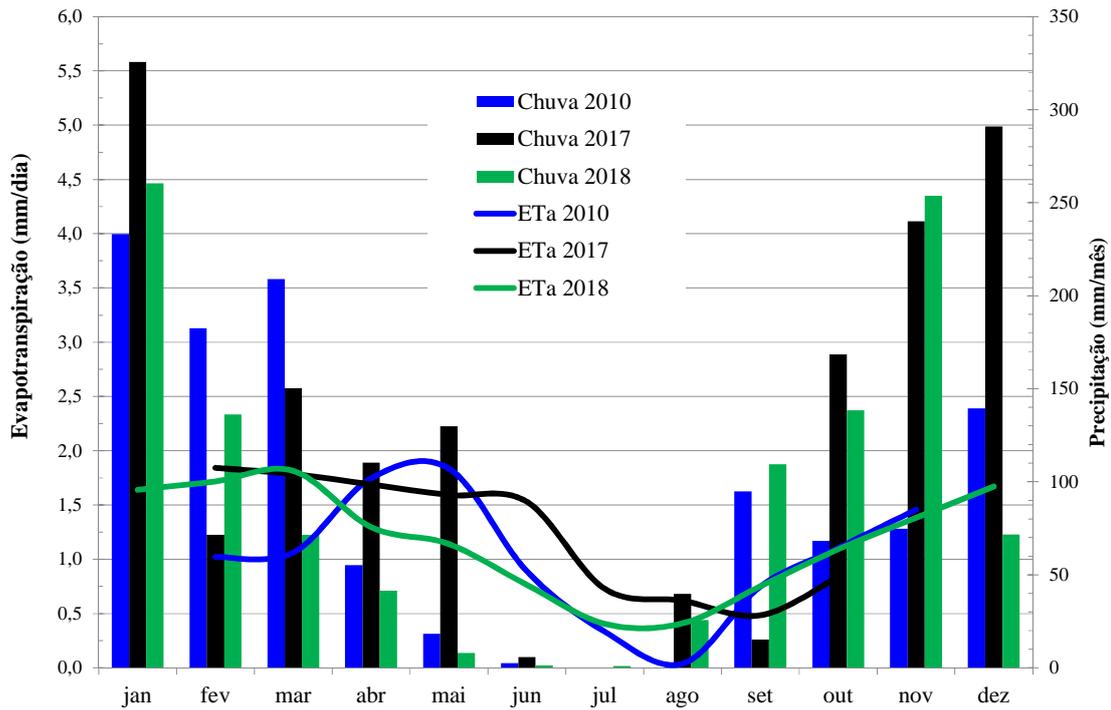
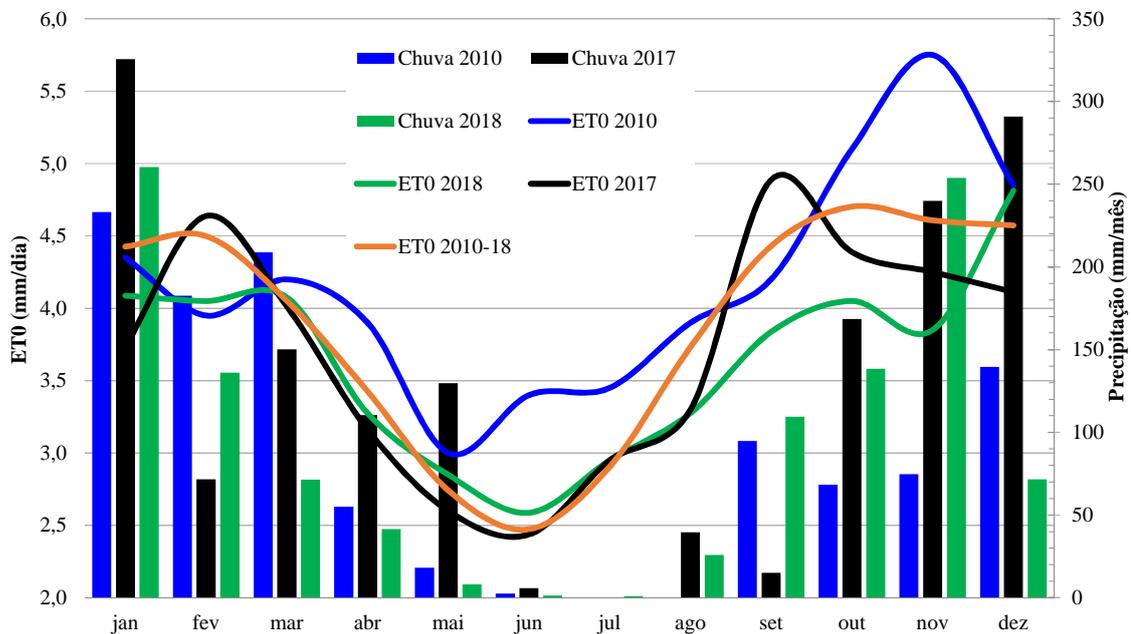
A região de estudo não tem uma expressiva área irrigada, e as consequências do período de até 166 dias sem chuvas em 2018 foram percebidas com a queda nos valores da relação  $ET/ET_0$  neste período, e por outro lado, no período chuvoso, a relação apresenta valores superiores aos dois outros anos estudos, mostrando o quão importante é a distribuição das chuvas ou o uso de sistemas de irrigação para garantir a segurança hídrica da atividade econômica. O valor médio de  $ETa$  não ultrapassar os  $2 \text{ mm dia}^{-1}$  pode ser justificado pela dinâmica do uso e cobertura do solo no Noroeste Paulista. Nas imagens analisadas foi possível identificar valores de  $ETa$  em pivôs centrais que ultrapassam os  $2 \text{ mm dia}^{-1}$ , até mesmo nas imagens dos meses de

época seca na região. Porém segundo Oliveira (2020) a área irrigada por pivôs centrais era de apenas 17.135 hectares na região, e considerando a colheita e/ou pousio dessas áreas, os valores altos de  $ETa$  não foram suficientes para aumentar a média regional.

Andrade et al. (2016), obtiveram resultados semelhantes ao aplicar o SAFER para estimativa de evapotranspiração em uma bacia hidrográfica, enquanto que os valores médios de evapotranspiração atual variaram entre  $0,6$  e  $2,4 \text{ mm dia}^{-1}$ , encontrou-se valores superiores a  $3,5 \text{ mm dia}^{-1}$  em áreas irrigadas, sendo mais que o dobro do valor médio de toda a bacia. Portanto, ao trabalhar com uma área maior a  $ETa$  tende a ser menor, quando a maior parte da região não possuir áreas irrigadas.

**Figura 14.** Indicadores agroclimatológicos - Chuva x  $ET/ET_0$ .



**Figura 15.** Indicadores agroclimatológicos - Chuva x ETa.**Figura 16.** Indicadores agroclimatológicos - Chuva x ET<sub>0</sub>.

Recentemente, a Agência Nacional de Águas (ANA) publicou um estudo de estimativa de evapotranspiração por sensoriamento remoto no Brasil, no qual foi utilizado o modelo SSEBop para estimativa

de ETa em 1.275 pivôs centrais e demonstrou a capacidade de retratar a variabilidade espaço-temporal da evapotranspiração através de modelos de estimativa aplicados a imagens de satélite e

com isso identificar tendências no consumo de água pela irrigação e variabilidade de manejo no uso da água pelos irrigantes (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2020).

Entre 2010 e 2017 observou-se um aumento na ETa nos meses de fevereiro, março, junho, julho e agosto de 0,4 até 0,8 mm dia<sup>-1</sup>. Em comparação entre 2010 e 2018, a ETa também aumentou em fevereiro, março, julho e agosto de forma menos significativa, mas em abril e maio os valores obtidos em 2010 foram superiores aos anos mais recentes. A média de ETa dos anos estudados passou de 1,0 mm dia<sup>-1</sup> em 2010 para 1,2 mm dia<sup>-1</sup> nos anos 2017 e 2018. Esse aumento de 0,2 mm dia<sup>-1</sup> caracteriza a possível evapotranspiração incremental na região.

Os anos escolhidos para realização desse estudo, foram anos muito diferentes entre si e atípicos para a região em relação a precipitação, fenômeno que interfere diretamente na evapotranspiração. É necessário assim, mais estudos desta natureza no Noroeste Paulista para fins de monitoramento dos indicadores agroclimatológicos, ainda que a dificuldade de obter imagens livres de nuvens na mesma época todos os anos, prejudica estudos relacionados a esse assunto.

Apesar da diferença da ETa entre os anos analisados, os valores da relação ET/ET<sub>0</sub> médios dos anos se mantiveram em 0,3. Os valores baixos da relação ET/ET<sub>0</sub> estimada pelo algoritmo SAFER podem ser explicados pela necessidade de mais trabalhos para ajuste e calibração do coeficiente  $a=1,0$  utilizado no algoritmo para os diferentes usos do solo. Contudo, em comparação com o modelo SEBAL na região Noroeste Paulista, o SAFER mostra melhor concordância com os coeficientes

de cultivo de referência (WARREN et al., 2014), e é sensível às variações observadas entre as classes de uso e cobertura da terra, sendo uma ferramenta útil para análise dos indicadores agrometeorológicos ao longo dos anos na região.

## 6 CONCLUSÕES

Os valores de evapotranspiração atual se diferenciaram no espaço e temporalmente no Noroeste Paulista, tendo os maiores valores em áreas irrigadas e na época de ocorrência de chuvas. A evapotranspiração atual média passou de 1,0 mm dia<sup>-1</sup> em 2010 para 1,2 mm dia<sup>-1</sup> em 2017 e manteve-se em 1,2 mm dia<sup>-1</sup> em 2018, visto que a mudança no uso do solo em um ano na região não foi significativa, assim como é pouco representativa as áreas irrigadas, caracterizando assim, uma evapotranspiração incremental de 0,2 mm dia<sup>-1</sup> entre os oito anos considerados neste estudo.

O algoritmo SAFER mostra-se eficaz para a estimativa de evapotranspiração em escala regional, identificando as alterações na transferência de água para atmosfera ao longo dos meses e a metodologia pode ser adotada para futuros trabalhos da mesma natureza, inclusive em trabalhos ao nível de ottobacias hidrográficas.

## 7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pelo apoio financeiro (Processo 2009/52467-4) que permitiu a instalação da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista.

## 8 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.; MORSE, A. T.; TREZZA, R.; KRAMBER, W.; LORITE, I.; ROBISON, C. W. Satellite-based energy balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC): applications. **ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 133, n. 4, p. 395-406, 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Estimativas de evapotranspiração real por sensoriamento remoto no Brasil**. Brasília, DF: ANA, 2020. 41 p.

ANDRADE, R. G.; LIMA, E. P.; TEIXEIRA, A. H. C.; VICTORIA, D. C.; LEIVAS, J. F. Uso do SAFER na estimativa da evapotranspiração na bacia do rio Paracatu. *In*: SIMPÓSIO DE MEIO AMBIENTE, 9., 2016, Viçosa. **Anais [...]**. Viçosa: Gumercindo Souza Lima, p. 1-7, 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/153340/1/Cnpgl-2016-ArtAnais-SimpMeioAmb-Uso-do-SAFER.pdf>. Acesso: 05 mai. 2021.

ARAÚJO, A. L.; SILVA, M. T.; SILVA, B. B.; SANTOS, C. A. C.; AMORIM, M. R. B. Modelagem simplificada para estimativa do balanço de energia à superfície em escala regional (R-SSEB). **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 433-446, 2017.

AVILEZ, A. M. A. **Determinação do coeficiente de cultura “kc” na cultura da cana de açúcar com imagens landsat utilizando o modelo SAFER no Noroeste Paulista, Brasil**. 2018. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 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.

BISPO, R. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C. Balanço hídrico e estimativa do consumo relativo de água da cultura da cana-de-açúcar na região noroeste paulista. **Irriga**, Botucatu, v.1, n. edição especial, IRRIGA & INOVAGRI, p. 94-101, 2017.

BISPO, R. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; TRINCA, V. F. Uso do algoritmo SAFER para estimativa da evapotranspiração atual da cultura do milho. *In*: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 5., 2019, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: [s. n.], 2019. Disponível em: [https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/fitossanidadeengenhariaruralesolos715/irrigacao5868/bispo\\_safer\\_completo.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/fitossanidadeengenhariaruralesolos715/irrigacao5868/bispo_safer_completo.pdf). Acesso: 05 mai. 2021.

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

CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 1, p. 1-11, 2009.

FEITOSA, D. G.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A. M.; TEIXEIRA, A. H. C. Avaliação temporal e espacial do balanço de energia na microbacia do córrego do Ipê, no município de Ilha Solteira face a mudança de uso do solo. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 17., 2015, João de Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: [s.n.], 2015. p. 5904-5911.

FRANCO, R. A. M.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C. Aplicação do algoritmo SAFER na determinação da evapotranspiração em condições de sazonalidade climática no Noroeste Paulista. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 17., 2015, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: [s.n.], 2015. p. 3189-3196.

GHILAIN, N.; ARBOLEDA, A.; GELLENS-MEULENBERGHS, F. Evapotranspiration modelling at large scale using near-real time MSG SEVIRI derived data. **Hydrology and Earth System Sciences**, Goettingen, v. 15, n. 10, p. 771-786, 2011.

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

HERNANDEZ, F. B. T.; SOUZA, S. A. V.; ZOCOLER, J. L.; FRIZZONE, J. A. Simulação e efeito de veranicos em culturas desenvolvidas na região de Palmeira d'Oeste, estado de São Paulo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 1, p. 21-30, 2003.

HORIKOSHI, S. A.; FISCH, G. Balanço hídrico atual e simulações para cenários climáticos futuros no município de Taubaté, SP, Brasil. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 2, n. 2, p. 33-46, ago. 2007.

OLIVEIRA, D. A. **Evolução da expansão da agricultura irrigada por pivô central e da evapotranspiração incremental no Noroeste Paulista**. 2020. Dissertação. (Mestrado – Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2020. Disponível em: [https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/fitossanidadeengenhariaruralesolos715/irrigacao5868/dissertacao\\_daniela\\_oliveira.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/fitossanidadeengenhariaruralesolos715/irrigacao5868/dissertacao_daniela_oliveira.pdf). Acesso em: 10 mai. 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, v. 1, n. 1, p. 1-7, out. 2019.

OLIVEIRA, D. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C. Balanço hídrico espacial na região Noroeste Paulista em 2018. *In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 5.*, 2019, Fortaleza. **Anais** [...]. Fortaleza: [s.n.], p. 1-7, 2019. Disponível em: [https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/fitossanidadeengenhariaruralesolos715/irrigacao5868/fontes\\_safer\\_np.doc.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/fitossanidadeengenhariaruralesolos715/irrigacao5868/fontes_safer_np.doc.pdf). Acesso: 10 mai. 2021.

SALES, D. L. A.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; 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, jul./set. 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.

SENAY, G. B.; BUDDE, M. E.; VERDIN, J. P. Enhancing the Simplified Surface Energy Balance (SSEB) approach for estimating landscape ET: validation with the METRIC model. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, n. 4, p. 606-618, 2011.

SILVA JUNIOR, J. F. **Evapotranspiração de referência como base para o manejo sustentável da irrigação no Noroeste Paulista**. 2017. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2017.

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.; HERNANDEZ, F. B. T.; FEITOSA, D. G.; SCHUTZE I. X. Comparação das chuvas ocorridas no Noroeste Paulista entre o período de 2011 e 2012. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 42.*, 2013, Fortaleza. **Anais** [...]. Fortaleza: [s.n.], 2013.

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**, New York, 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**, Cruz das Almas, 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).

UNESP. **Canal Clima da UNESP Ilha Solteira** – Área de Hidráulica e Irrigação. Ilha Solteira: Unesp, 2019. Disponível em: [clima.feis.unesp.br](http://clima.feis.unesp.br). Acesso em: 1 ago. 2019.

WARREN, M. S.; TEIXEIRA, A. H. C.; RODRIGUES, L. N.; HERNANDEZ, F. B. T. Utilização do sensoriamento remoto termal na gestão de recursos hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 7, n. 1, p. 65-82, 2014.