








Article

Desempenho dos Modelos SEBAL e SSEBop na Estimativa da Evapotranspiração do Trigo no Cerrado

Bianca Soares do Vale¹ , Henrique Llacer Roig¹ , Marina Rolim Bilich Neumann² ,
Eduardo de Souza Fernandes² , Leandro de Almeida Salles^{1,3} ,
Raphael Augusto das Chagas Noqueli Casari¹ , Diogo Olivetti¹ , Édio Albertin Malta⁴

¹*Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.*

²*Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.*

³*Instituto Brasília Ambiental de Recursos Hídricos, Brasília, DF, Brasil.*

⁴*Agência Nacional de Águas, Superintendência de Fiscalização, Brasília, DF, Brasil.*

Recebido em: 29 de Março de 2022 - Aceito em: 7 de Agosto de 2022

Resumo

O crescimento da área irrigada no Cerrado afeta o volume de água captado nas bacias hidrográficas, influenciando diretamente na disponibilidade e alocação dos recursos hídricos. Em bacias com predominância da agricultura irrigada, torna-se fundamental a compreensão da variação espaço-temporal da evapotranspiração real de uma cultura (ETR), para o mais assertivo planejamento e gerenciamento dos reservatórios. Considerando o potencial de cultivo do trigo no Cerrado, o estudo tem por objetivo estimar a demanda hídrica da cultura nas safras de 2018 e 2019, por meio dos modelos SEBAL e SSEBop. Em comparação com o método da razão de Bowen, o SEBAL apresentou variações de R^2 entre 0,86 e 0,72, tendo seu desempenho classificado como satisfatório. O RMSE determinado foi de $0,50 \text{ mm d}^{-1}$ em 2018 e de $0,42 \text{ mm d}^{-1}$ em 2019. O modelo SSEBop expressou melhor desempenho nas duas safras, com variabilidade de R^2 entre 0,95 e 0,78, representando de forma mais adequada a ETR com RMSE menor, de $0,25 \text{ mm d}^{-1}$ e $0,41 \text{ mm d}^{-1}$, respectivos aos ciclos de 2018 e 2019. A configuração simplificada do SSEBop e o bom desempenho nas condições verificadas, tornam o modelo uma ferramenta apropriada, podendo contribuir para um planejamento hídrico eficiente na região.

Palavras-chave: balanço de energia, sensoriamento remoto, Razão de Bowen.

Performance of the SEBAL and SSEBop Models in the Estimation of Wheat Evapotranspiration in the Cerrado

Abstract

The growth of the irrigated area in the Cerrado affects the volume of water captured in the hydrographic basins, directly influencing the availability and allocation of water resources. In basins with predominance of irrigated agriculture, it is essential to understand the spatio-temporal variation of the real evapotranspiration of a crop (ETR), for a more assertive planning and management of the reservoirs. Considering the wheat cultivation potential in the Cerrado, the study aims to estimate the crop's water demand in the 2018 and 2019 harvests, using the SEBAL and SSEBop models. Compared to the Bowen ratio method, SEBAL presented R^2 variations between 0,86 and 0,72, and its performance was classified as satisfactory. The RMSE determined was $0,50 \text{ mm d}^{-1}$ in 2018 and $0,42 \text{ mm d}^{-1}$ in 2019. The SSEBop model expressed better performance in both seasons, with R^2 variability between 0,95 and 0,78, representing more adequately the ETR with lower RMSE, of $0,25 \text{ mm d}^{-1}$ and $0,41 \text{ mm d}^{-1}$, corresponding to the 2018 and 2019 cycles. The simplified configuration of the SSEBop and the good performance under the conditions verified, make the model an appropriate tool, which can contribute to an efficient water planning in the region.

Keywords: energy balance, remote sensing, Bowen Ratio.

1. Introdução

A expansão das fronteiras agrícolas no Cerrado decorrente do crescimento da área irrigada, intensificam os conflitos pelo uso da água, o que se torna ainda mais significativo em uma região que já enfrenta a escassez de recursos hídricos (ANA, 2013; Fisher *et al.*, 2016; Spera *et al.*, 2016). O regime de precipitação sazonal no Cerrado tem uma estação extremamente seca no inverno, tornando necessária a aplicação de lâminas de água por meio da irrigação para atender a demanda hídrica da cultura (Guerra *et al.*, 2003).

O Cerrado é responsável por quase 50% da produção nacional de cereais (IBGE, 2019) e dentre as culturas agrícolas mais relevantes, tem-se o trigo (*Triticum aestivum* L.), sendo um dos cereais básicos mais consumidos no mundo. Apesar da produção em todos os continentes é uma cultura que se desenvolve melhor em climas temperados e moderadamente secos, o que exigiu intensos trabalhos de melhoramento genético para adaptar a cultura às condições de cerrado (Mafron *et al.*, 1993; Klar e Denadai, 1996; Fumis *et al.*, 1997; Cargnin *et al.*, 2009).

O trigo apresenta boa resposta ao incremento tecnológico, atingindo maior rendimento médio de grãos quando há um bom fornecimento hídrico ao longo do ciclo de desenvolvimento (Oliveira Neto e Santos, 2017). Em condições de cerrado, são largas as variações de consumo de água do trigo, em decorrência da cultivar plantada, das condições atmosféricas e diferenças adotadas no manejo do plantio e da irrigação, a depender também da modelagem utilizada para estimar a demanda requerida (Azevedo, 1988; Luchiari Jr. *et al.*, 1997; Guerra *et al.*, 2003; Boschini *et al.*, 2011; Souza, 2016; Lopes *et al.*, 2019).

Uma parte significativa da água disponível nas frações do solo é reduzida pela transferência de água para a atmosfera por meio da vegetação. As espécies cultivadas transpiram e junto com a evaporação da água do solo, caracterizam o fenômeno da evapotranspiração (ET) (Thornthwaite e Wilm, 1944; Berlatto e Molion, 1981; Allen *et al.*, 1998). Por meio da ET, cerca de 70% do total precipitado retorna à atmosfera, desempenhando um importante papel como regulador do balanço hídrico (Shukla e Mintz, 1982; Kite e Droogers, 2000; Victoria, 2004). A compreensão da variação temporal e espacial da evapotranspiração é fundamental para atividades relacionadas à gestão das bacias hidrográficas, especialmente em bacias com predominância da agricultura irrigada, bem como no manejo hídrico das culturas agrícolas, visando diminuir os impactos e as possíveis perdas de água por excesso de aplicação (Swenson e Wahr, 2006; Veloso *et al.*, 2017; Gharbia *et al.*, 2018).

O monitoramento do uso da água na agricultura e a avaliação das interações que ocorrem entre a superfície e a atmosfera, pode ser realizadas com maior cobertura espacial e de modo menos oneroso por meio da aplicação de

modelos que utilizam informações coletadas remotamente e que abrangem desde a escala regional à escala global (Kalma *et al.*, 2008; Biggs *et al.*, 2016; Mcshane *et al.*, 2017). Dentre os modelos disponíveis na literatura, evidenciam-se: *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) (Bastiaanssen *et al.*, 1998); *Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration* (METRIC) (Allen *et al.*, 2007); *Simplified Surface Energy Balance* (SSEB) (Senay *et al.*, 2007); *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving* (SAFER) (Teixeira, 2010) e o *Operational Simplified Surface Energy Balance* (SSEBop) (Senay *et al.*, 2013).

De modo geral, a maioria dos modelos pode ter um desempenho satisfatório (Scherer-Warren, 2012; Zhou *et al.*, 2014; Carrillo-Rojas *et al.*, 2016; Bala *et al.*, 2017; Yin *et al.*, 2020). Contudo, há diferenças consideráveis no registro da variabilidade temporal e espacial da evapotranspiração sob condições climáticas adversas (Allen *et al.*, 2002).

Estudos de comparação entre diferentes modelos baseados em dados de sensoriamento remoto tem auxiliado usuários e pesquisadores a compreender as vantagens e limitações de cada método, bem como perceber algumas incertezas geradas por parâmetros dos modelos e o impacto nas estimativas da evapotranspiração (Bhattarai *et al.*, 2016). Além disso, os modelos requerem diferentes dados de entrada e o seu desempenho pode ainda ser afetado pela qualidade e precisão das informações utilizadas. Outro aspecto a ser considerado é o grau de complexidade operacional dos modelos, pois essa complexidade tende a afetar a facilidade da configuração para a calibração e eficiência da metodologia (Singh e Senay, 2016; Losgedaragh e Rahimzadegan, 2018).

A variação no desempenho dos modelos e as incertezas sobre a escolha da metodologia mais adequada para retratar as diversas culturas agrícolas e condições climáticas, impulsionam novos estudos de comparação (Singh e Senay, 2016; Bhattarai *et al.*, 2016; Mcshane *et al.*, 2017; Schirmbeck *et al.*, 2017; Losgedaragh e Rahimzadegan, 2018).

Diante desse contexto, o presente estudo tem por objetivo avaliar dois modelos de fonte única: SEBAL e SSEBop, no intuito de selecionar o algoritmo mais apropriado para representar a variabilidade espaço-temporal da evapotranspiração do trigo. Levando em consideração o potencial expansivo e produtivo da cultura no Cerrado, bem como a oportunidade de analisar o desempenho desses algoritmos em condições diferentes de onde foram desenvolvidos. Ambos os modelos são fundamentados na temperatura da superfície e no princípio do balanço de energia, mas possuem grau de complexidade operacional distintos.

O SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), é um dos modelos mais completos para avaliação de fluxos de calor na superfície (Allen *et al.*, 2002).

Considera-se em sua metodologia que a energia consumida pela evapotranspiração (LE) é obtida como diferença residual entre o saldo de radiação líquida disponível (RN), subtraído da energia aplicada no aquecimento do ar (H) e da energia que é armazenada no solo e transferida para a vegetação (G). É um modelo que possui maior complexidade operacional, pois assume a relação linear da diferença de temperatura (dT) ancorado em seleção específica dos pixels extremos para calibração interna. Espera-se que o valor de dT seja próximo da máxima diferença de temperatura entre uma superfície em pleno desenvolvimento vegetativo e com bom suprimento hídrico (pixel “frio”) e uma superfície de solo seco e exposto (pixel “quente”) (Bastiaanssen *et al.*, 1998; Allen *et al.*, 2002; Allen *et al.*, 2007). Amplamente aplicado (Bastiaanssen e Chandrapala, 2003; Tasumi *et al.*, 2005; Hendrickx *et al.*, 2006; Du *et al.*, 2013; Zhou *et al.*, 2014; Veloso *et al.*, 2017; Profeta *et al.*, 2018), a precisão do modelo na representatividade das variações da ET é de 85% em escala diária e sua eficiência pode ser aumentada para 95% se a avaliação for sazonal (Bastiaanssen *et al.*, 2005).

O SSEBop (*Operational Simplified Surface Energy Balance*), é um modelo de concepção mais recente e que aplica uma parametrização mais simplificada (Senay *et al.*, 2014). Inova ao remover a subjetividade na seleção dos pixels âncoras, pois aplica condições de contorno fundamentadas no balanço de energia, mas sem resolvê-lo completamente. Sendo que a dT entre os pixels de referência será predefinida para que nos demais pixels da cena, a ET possa variar proporcionalmente à temperatura da superfície e à dT estabelecida (Senay *et al.*, 2013). Aplicado em diversos estudos (Singh *et al.*, 2014; Senay *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2016; Paula *et al.*, 2019; Lopes *et al.*, 2019; Yin *et al.*, 2020), o modelo tem apresentado fortes correlações em superfícies bem vegetadas com $R^2 > 0,82$ e na representação da variabilidade espacial da ET com $R^2 > 0,90$ (Senay *et al.*, 2022).

Para avaliar a acurácia das estimativas e o desempenho dos modelos SEBAL e SSEBop, foi tomada como referência os valores de ET estimados pelo método da razão de Bowen (Bowen, 1926). Esse método que utiliza dados meteorológicos coletados em campo para resolver o balanço de energia, possui significativa precisão e é referência para calibração e validação de modelos que estimam a evapotranspiração real de uma cultura (Teixeira, 2010; Hu *et al.*, 2014).

2. Materiais e Métodos

2.1. Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em duas áreas de pivôs centrais, ambas cultivadas com a cultura do trigo e em safras distintas. Um dos pivôs foi avaliado na safra da cul-

tura de 2018 e o segundo pivô no ano agrícola de 2019. Os pivôs estão situados no município de Cristalina-GO, localizados na Fazenda Pamplona que pertence ao grupo SLC-Agrícola®, na porção da Bacia Hidrográfica do Rio Samambaia, conforme descrição apresentada na Fig. 1.

Os dois ciclos avaliados compreenderam a estação seca no Bioma Cerrado, que ocorre de junho a setembro, referente ao período de outono-inverno. O clima predominante na região de Cristalina-GO é tropical de altitude (Cwa), conforme classificação de Köppen. A frequência na oferta de chuvas ocorre nos meses de outubro a maio, com precipitação pluviométrica média e anual de aproximadamente 1600 mm. A temperatura média da região é de 22 °C, com umidade relativa em torno de 73% (Schmidt e Valiati, 2006; Peel *et al.*, 2007).

2.2. Especificações do experimento

O pivô central avaliado em 2018 possui área de 120 ha e em toda sua extensão foi cultivada a cultura do trigo. As coordenadas geográficas no centro do pivô são 16°16'10" S e 47°35'57" W, com 975 m de altitude. O plantio da safra de 2018 ocorreu no dia 15 de maio, com colheita do trigo no dia 17 de setembro do mesmo ano, totalizando 126 dias após o plantio (DAP).

Em 2019, avaliou-se um pivô que possui 60 ha de área total. No entanto, apenas ¼ do pivô foi cultivado com a cultura do trigo, com área plantada equivalente a 14,33 ha. As coordenadas no centro do pivô são 16°13'11" S e 47°37'21" W e altitude de 993 m. A semeadura aconteceu em 10 de maio e após completa maturação dos grãos do trigo foi realizada a colheita no dia 5 de setembro, com ciclo total de 118 DAP.

Em ambos os períodos avaliados se plantou a cultivar BRS 394 (Albrecht *et al.*, 2020), no espaçamento de 0,17 m entre fileiras, sob o sistema de plantio convencional e na densidade populacional de 4.000.000 pl/ha.

Nos pivôs experimentais, foi instalada uma estação micrometeorológica da marca Campbell Scientific, modelo CR3000, cedida pela Agência Nacional de Águas (ANA). A estação foi posicionada à 250 m de distância da borda do pivô, na intenção de assistir o critério de 100 vezes a altura do sensor mais elevado (Monteith e Unsworth, 1990; Horst e Weil, 1992), como requisito de bordadura mínima para reduzir os efeitos da advecção de calor sensível (Stannard, 1997; Lee *et al.*, 2004; Gavilan e Berengena, 2007). Com finalidade de determinação do fluxo de calor no solo (G), utilizou-se dois fluxímetros, instalados a 2 cm de profundidade. A medição do saldo de radiação (Rn) foi realizada pelo equipamento saldo radiômetro, instalado a 2,0 m acima do dossel da cultura.

Nesse estudo, os sensores de umidade relativa, temperatura do ar e velocidade do vento foram colocados na altura de 1,0 e 2,0 m da superfície do solo, correspondendo assim aos níveis 1 e 2, a fim de estabelecer os gradientes de temperatura e pressão de vapor. O conteúdo volumé-

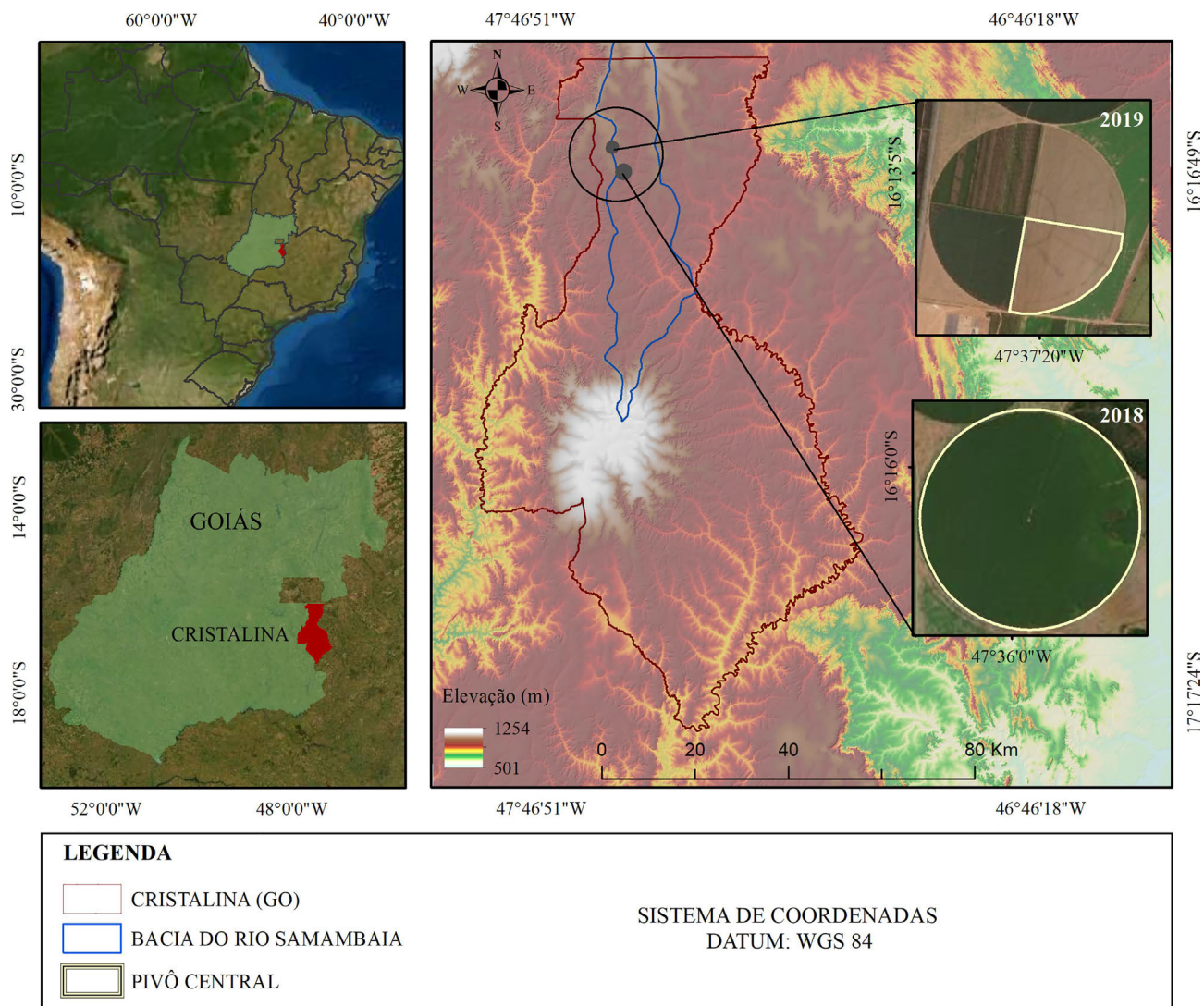


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.

trico de água no solo foi medido por sensores TDR, cravados na direção vertical a 30 cm de profundidade, e a precipitação foi monitorada a partir de um pluviômetro instalado à 1,4 m. Os dados coletados foram armazenados em um *datalogger*, para aquisição automática dos dados de campo, contabilizados no intervalo de 10 min. Os parâmetros derivados do balanço de energia foram determinados para o período diurno, das 7 horas da manhã às 18 horas da tarde.

2.3. Método da razão de Bowen

Mediante análise do balanço de energia na superfície, pode-se determinar a quantidade de energia disponível para que ocorra processos como a evaporação da água e aquecimento do ar e do solo (Payero *et al.*, 2003). A razão de Bowen (β) (Bowen, 1926) estabelece a associação entre os fluxos de calor sensível e latente de uma superfície, sendo determinado conforme (Eq. (1)):

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (1)$$

em que β é a razão de Bowen (adimensional); ΔT é a diferença de temperatura do ar entre os níveis 1 e 2 ($^{\circ}\text{C}$); Δe é a diferença da pressão real de vapor do ar entre os níveis 1 e 2 (kPa); e γ é o coeficiente psicrométrico (kPa).

Adotou-se os critérios de rejeição para valores da razão de Bowen (β) inconsistentes conforme recomendação de Perez *et al.* (1999), estabelecendo classes de erro para valores de β próximos à -1 . Para estimativa do fluxo de calor latente (LE) aplicou-se a (Eq. (2)):

$$LE = \frac{Rn - G}{(1 - \beta)} \quad (2)$$

em que LE é o fluxo de calor latente (W m^{-2}); Rn é o saldo de radiação (W m^{-2}); e G é o fluxo de calor no solo (W m^{-2}).

Foram gerados valores de evapotranspiração real a cada 10 min, sendo esses somados até a determinação diária da ETR_{RB} , segundo (Eq. (3)):

$$ETR_{RB} = \frac{LE \times 600}{\lambda} \quad (3)$$

em que ETR_{RB} é a evapotranspiração real da cultura pelo método da razão de Bowen (mm h^{-1}); 600 é o tempo correspondente em segundos; λ é o calor latente de vaporização da água (J kg^{-1}).

2.4. Dados requeridos pelos modelos de sensoriamento remoto

Os dados meteorológicos aplicados nesse estudo, para execução dos modelos SEBAL e SSEBop, são provenientes da estação automática do INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Foi selecionada, por estar mais próxima da região avaliada, a estação de Cristalina-Fazenda Santa Mônica (GO) - A056 ($16^{\circ}23'57''$ S, $47^{\circ}37'33''$ W, e altitude equivalente a 932 m). As informações meteorológicas obtidas por meio da estação automática do INMET, foram empregues no cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de Penman-Monteith -FAO 56, de acordo com Allen *et al.* (1998).

Os dados de altimetria e declividade foram provenientes do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), na resolução espacial de 30 m (1 arco-segundo). As imagens utilizadas no estudo foram do satélite Landsat 7, obtidas pelo sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) e do satélite Landsat 8, pelos sensores OLI - (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), no período de 15 de maio a 17 de setembro de 2018 e de 10 de maio a 5 de setembro de 2019, durante os ciclos de cultivo na área de estudo. A sinergia entre as aquisições das imagens permite maior frequência de revisita, de modo que seja possível monitorar as mudanças fenológicas da cultura ao longo do ciclo. A seleção das imagens foi realizada para condições de céu claro, na ausência de cobertura de nuvens.

2.5. Modelo SEBAL

O modelo SEBAL utiliza em sua metodologia a equação clássica do balanço de energia para determinação do fluxo de calor latente (λET (W m^{-2})), sendo este um resíduo do balanço de energia, indicado pela (Eq. (4)) (Bastiaanssen *et al.*, 1998). Toda a descrição metodológica do algoritmo SEBAL pode ser verificada em Allen *et al.* (2002).

$$\lambda ET = Rn - G - H \quad (4)$$

em que λET é o fluxo de calor latente; Rn é o saldo de radiação; H é o fluxo de calor sensível no ar; G é o fluxo de calor sensível no solo.

De acordo com o modelo, Rn e G são calculados a partir da relação direta com os dados orbitais. Para determinação de H considera-se uma função linear entre a temperatura da superfície (TS) e o valor da dT . No SEBAL, para cada cena avaliada é feita a seleção de pixels “âncoras”, a fim de que o valor de dT seja próximo da máxima diferença de temperatura entre um local úmido e bem vegetado (pixel “frio”), e uma área mais quente com solo exposto (pixel “quente”).

Para cada pixel da imagem estima-se a evapotranspiração em escala horária (ET_h mm h^{-1}) e diária (ETR_{SEBAL} (mm d^{-1})), conforme aplicação das (Eqs. (5)-(6)), respectivamente:

$$ET_h = 3.600 \times \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (5)$$

$$ETR_{SEBAL} = ET_o F \times ET_o \quad (6)$$

em que 3.600 equivale à conversão de 1 hora para segundos; λ é o calor latente de vaporização (J kg^{-1}); ETR_{SEBAL} é a evapotranspiração real da cultura estimada pelo modelo SEBAL (mm d^{-1}); $ET_o F$ é a fração da evapotranspiração de referência (adimensional), estimada conforme (Eq. (7)); ET_o é a evapotranspiração de referência da estação meteorológica (mm d^{-1}).

$$ET_o F = \frac{ET_h}{ET_{o_h}} \quad (7)$$

em que ET_{o_h} corresponde à evapotranspiração de referência horária (mm h^{-1}).

A fração evaporativa é empregue no cômputo da $ET_o F$, estabelecida pela razão entre ET_h e a ET_o , estimada pelo método de Penman-Monteith-FAO (Allen *et al.*, 1998), a partir de dados meteorológicos. No SEBAL, o cálculo da evapotranspiração em escala diária assume que a $ET_o F$ é equivalente à média do dia, em que, a ET_o totaliza o somatório da $ET_o h$ ao longo do dia da aquisição da imagem.

2.6. Modelo SSEBop

No modelo SSEBop a ETR em escala diária é obtida conforme (Eq. (8)), sendo função direta da fração evapotranspirativa (ETf). A ETf é então multiplicada pela ET_o , ajustada por um fator de escala (k), de forma a representar a máxima evapotranspiração de uma cultura aerodinamicamente mais rugosa em relação a grama. No presente estudo adotou-se o valor de 1.2, de acordo com a recomendação de Senay *et al.* (2013).

$$ETR_{SSEBop} = ETf \times k \times ET_o \quad (8)$$

em que ETR_{SSEBop} é a evapotranspiração real da cultura estimada pelo modelo SSEBop (mm d^{-1}); ETf é a fração

evapotranspirativa, adimensional; ET_o é a evapotranspiração de referência da estação meteorológica (mm d^{-1}); k é o coeficiente que expressa a máxima evapotranspiração da cultura em relação à evapotranspiração de referência (ET_o), adimensional.

A ET_f , segundo (Eq. (9)), é estimada com base na TS , derivada da banda termal da coleção Landsat. Na concepção do algoritmo SSEBop foi removida a subjetividade de seleção dos pixels âncoras, uma vez que as condições de referência são predefinidas para cada período em sua respectiva região. Portanto, o SSEBop relaciona a temperatura do ar, correspondente ao horário da passagem do satélite, com a temperatura da superfície estimada a partir de dados orbitais. Essa relação é executada por um coeficiente de correção “ c ”, ajustado para cada pixel da imagem e, nas condições de contorno em que o NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) (Rouse *et al.*, 1973) apresente valores maior que 0,80 e TS maior que 270 K. Tais condições foram definidas a fim de representar uma área em pleno desenvolvimento vegetativo e na ausência de cobertura de nuvens.

$$ET_f = \frac{Th - Ts}{dT} = \frac{Th - Ts}{Th - Tc} \quad (9)$$

em que TS é a temperatura de superfície derivada da banda termal da coleção Landsat (K); Tc é a temperatura de superfície estimada para a condição de pixel frio (K); Th é a temperatura de superfície estimada para a condição de pixel quente (K); e dT é a diferença de temperatura do ar entre dois níveis acima da superfície (K).

2.7. Acurácia dos dados modelados

Para adequada validação dos modelos, utilizou-se os resultados de ETR_{SEBAL} e ETR_{SSEBop} referente ao pixel da estação micrometeorológica, comparados aos dados da ETR_{RB} e, realizado inicialmente nas datas de passagem dos satélites. Na avaliação da ETR em estimativa diária, a fim de determinar a demanda hídrica da cultura do trigo, foi realizada a interpolação da fração evapotranspirativa, obtida como resíduo do balanço de energia com validade entre as passagens dos satélites. A fração evapotranspirativa foi multiplicada pelos resultados da ET_o com base nas informações da estação automática do INMET em Cristalina - Fazenda Santa Mônica (A056).

O desempenho dos modelos foi verificado por meio das métricas: raiz do erro médio quadrático em modo absoluto (RMSE) e percentual (pRMSE), o erro médio (BIAS) e percentual de tendência (pBIAS), e o coeficiente de eficiência (E) (Nash e Sutcliffe, 1970). Para classificação dos índices, utilizou-se os critérios estabelecidos por Moriasi *et al.* (2007).

Diante dos resultados da modelagem, avaliou-se a normalidade da distribuição da ETR pelo teste de Shapiro-Wilk para amostras $n < 50$ (Shapiro e Wilk, 1965) e pelo

teste de Kolmogorov-Sminorv para amostras $n > 50$ (Kolmogorov, 1933), para os testes de normalidade, considera-se ($p > 0,05$) com distribuição normal. Em caso de distribuição normal, aplicou-se a análise de regressão linear simples e delimitou-se o intervalo de confiança (I.C) por análise de variância (ANOVA), com nível de confiança de 95% a um nível de significância ($\alpha = 0,05$), entre os dados observados (X , ETR_{RB}) e estimados (Y , ETR_{SEBAL} ou ETR_{SSEBop}).

3. Resultados e Discussão

Verificou-se por meio dos testes de normalidade de Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Sminorv, que a distribuição de probabilidade das estimativas de ETR não apresentaram diferença significativa de uma distribuição normal, ou seja, ($p > 0,05$), permitindo a aplicação da análise de regressão e do intervalo de confiança pela ANOVA.

3.1. Análise de desempenho do modelo SEBAL

Durante a fase vegetativa, dado que a cobertura vegetal no início do desenvolvimento da cultura é baixa, prevalece sobre a transpiração a evaporação do teor de água no solo, influenciando diretamente em taxas evapotranspirativas menores. Conforme o crescimento do trigo e a garantia de uma boa disponibilidade hídrica durante todo o ciclo de 2018, a ETR_{SEBAL} demonstrou o primeiro pico na demanda aos 65 DAP, na fase reprodutiva da cultura. Aos 73 DAP houve um declínio da ETR_{SEBAL} , decorrente da fase de enchimento de grãos e que foi atenuado por temperaturas menores na área irrigada. No início da fase de maturação dos grãos aos 105 DAP, a demanda evapotranspirativa da cultura aumentou e se estendeu até a completa maturação dos grãos.

Na avaliação realizada no ano agrícola de 2019, foi possível notar o pico da demanda evapotranspirativa aos 41 DAP, ainda com a cultura na fase vegetativa, resultante de um evento de irrigação realizado na data anterior à obtenção da imagem. Apenas ¼ do pivô foi cultivado com a cultura do trigo e após a colheita das culturas que vinham sendo cultivadas no mesmo pivô central, a frequência e o volume da lâmina de água aplicada reduziram, afetando diretamente a ETR_{SEBAL} do trigo. Já no estágio fenológico de reprodução aos 73 DAP a ETR_{SEBAL} estimada foi de $3,65 \text{ mm dia}^{-1}$, com variação do NDVI entre 0,71 e 0,63. Se comparado ao mesmo período com a safra de 2018, é possível relacionar essa baixa demanda evapotranspirativa com a insuficiência hídrica em que a cultura foi submetida. Nesse caso, considerando a área total do pivô, 75% do solo estava sem cobertura vegetal e assim, aumentando a partição da energia disponível para o aquecimento do ar e do solo e potencializando o efeito de um longo período sem irrigação expondo a cultura a maiores velocidades do vento no campo.

Os resultados da avaliação de desempenho do modelo SEBAL para as datas de obtenção das imagens, em aferição pontual e, extrapolados entre as aquisições, estimativa diária, estão apresentadas na Tabela 1, e as correlações entre a ETR_{SEBAL} e a ETR_{RB} nas Figs. 2 (a e b) e 3 (a e b).

Verificou-se com a análise de desempenho da ETR_{SEBAL} na estimativa pontual para o ano de 2018 (Fig. 2a), que há forte correlação positiva R^2 de 0,86 quando comparados aos dados da estação micro-meteorológica. A variabilidade obtida é semelhante ao R^2 de 0,88 encontrado por Yang et al. (2015) em experimento realizado na China e muito próximo do R^2 de 0,85 apresentado por Rawat et al. (2017), em um cultivo de trigo na Índia. O p-valor < 0,05 determinado pela ANOVA indica que, nas datas de passagem dos satélites, não houve diferenças estatísticas significativas entre as médias dos métodos. Em 2018, na escala pontual, a ETR_{SEBAL} apresentou RMSE de 0,50 mm d⁻¹ e pRMSE de 9,66%. É possível verificar por meio da linha de tendência que o modelo SEBAL constantemente tendeu a subestimar a ETR , com breve diminuição para os valores mais elevados, onde a linha de tendência esteve mais próxima da reta 1:1. Em média, o modelo subestimou a ETR_{RB} em -0,26 mm d⁻¹, ou aproximadamente -5%. De modo geral, a ETR_{SEBAL} teve um bom desempenho, confirmado pelo indicador E de 0,75.

Em 2019 (Fig. 2b), devido a menor quantidade de imagens sem cobertura de nuvens, a avaliação foi feita em menos datas. Obteve-se um R^2 de 0,72 e verifica-se pela linha de tendência que nas datas de passagem dos satélites o modelo tendeu a subestimar a ETR_{RB} em -0,15 mm d⁻¹ ou -3,71%. A tendência verificada discorda da subestimativa de -0,83 mm d⁻¹ relatada por Ahmed et al. (2010) para um campo de trigo avaliado no Sudão. Apesar de um RMSE menor, equivalente à 0,42 mm d⁻¹, a diferença percentual entre o dado modelado e o observado foi de 10,55%. O coeficiente de eficiência E obtido de 0,68 indica que a ETR_{SEBAL} teve um desempenho satisfatório.

Conforme Fig. 3a, as estimativas extrapoladas para aferição diária no decorrer do cultivo indicaram que o

Tabela 1 - Indicadores da análise estatística de desempenho do modelo SEBAL nas datas de passagem dos satélites (Pontual) e entre as aquisições (Diária).

	Pontual		Diária	
	2018	2019	2018	2019
R^2	0,86	0,72	0,80	0,70
RMSE (mm d ⁻¹)	0,50	0,42	0,52	0,46
pRMSE (%)	9,66	10,55	10,22	11,31
BIAS (mm d ⁻¹)	-0,26	-0,15	-0,28	0,02
pBIAS (%)	-4,9	-3,71	-5,4	0,35
E	0,75	0,68	0,72	0,66

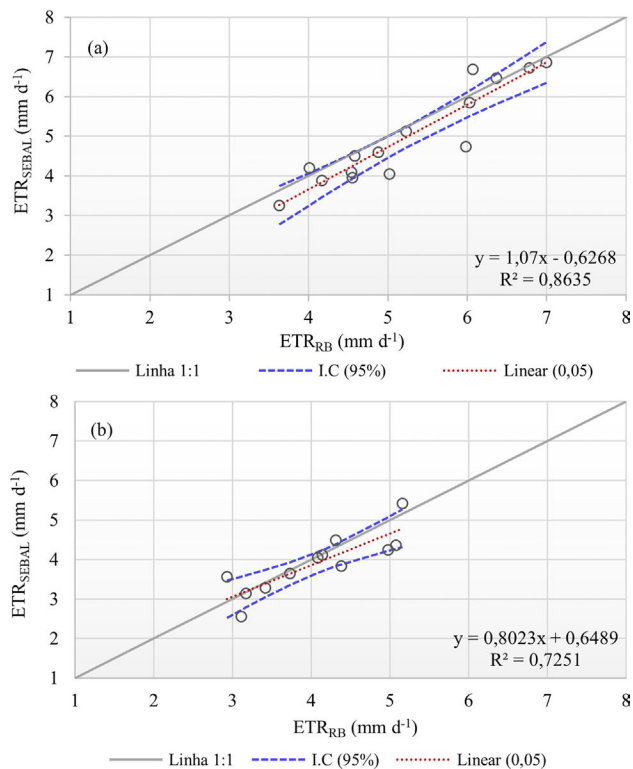


Figura 2 - Correlação entre a ETR_{SEBAL} e a ETR_{RB} nas datas de passagem dos satélites para o ano agrícola de 2018 (a) e 2019 (b), no Intervalo de Confiança de 95 % a um nível de significância ($p < 0,05$).

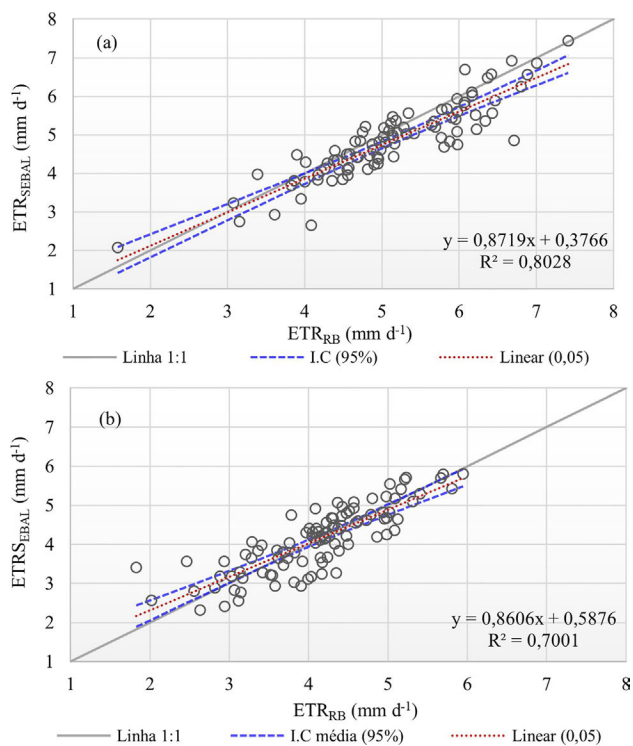


Figura 3 - Correlação entre a ETR_{SEBAL} e a ETR_{RB} extrapolada para estimativas diárias nos anos agrícolas de 2018 (a) e 2019 (b), no Intervalo de Confiança de 95 % a um nível de significância ($p < 0,05$).

modelo foi capaz de representar a variabilidade da ETR na safra de 2018, indicado pelo R^2 de 0,80 com RMSE de $0,52 \text{ mm d}^{-1}$ e diferença percentual de 10,22%. Conforme a linha de tendência, se observa a proximidade com a reta 1:1, tendendo a subestimar os valores mais altos e superestimar os valores mais baixos do ciclo. Em média, o SEBAL subestimou a ETR_{RB} em $-0,28 \text{ mm d}^{-1}$ ou $-5,4\%$. Conforme coeficiente de eficiência E de 0,72 a ETR_{SEBAL} teve um desempenho considerado satisfatório.

No cultivo de 2019 (Fig. 3b), verificou-se a correlação positiva com R^2 de 0,70. Na avaliação diária, o modelo teve uma maior diferença percentual, na ordem de 11% ou $0,46 \text{ mm d}^{-1}$ e passou a superestimar a ETR_{RB} em $0,02 \text{ mm d}^{-1}$ ou 0,35%. A linha de tendência esteve mais próxima da reta 1:1 em relação à medida pontual observada, pois, na extrapolação propagou-se a superestimativa dos valores mais baixos alcançados pelo modelo. Isso ocorreu devido o período de restrição hídrica atravessado pela cultura em campo e a menor quantidade de imagem disponível para extrapolação da fração evapotranspirativa. O coeficiente E de 0,66 foi o mais baixo da série histórica, mas ainda é classificado com um desempenho satisfatório.

De modo geral, as diferenças de estimativa entre a ETR_{SEBAL} e a ETR_{RB} são aceitáveis e apresentam certa concordância com a ordem das variações relatadas na literatura. Aplicando o modelo SEBAL, Machado *et al.* (2014) apontaram erros relativos entre 10,80 e 9,75%. Bezerra *et al.* (2008) reportaram um erro de 10% encontrado ao avaliar a cultura do algodão. Para a cultura do trigo, Rawat *et al.* (2017) relataram um RMSE de $0,56 \text{ mm d}^{-1}$, uma diferença maior relatada pelos autores e que discorda da média de erros entre as duas safras avaliadas no presente estudo. Apesar do maior viés encontrado na safra de 2019, o modelo SEBAL teve um desempenho satisfatório nas condições avaliadas.

3.2. Análise de desempenho do modelo SSEBop

No início da fase vegetativa do ciclo da cultura do trigo analisado em 2018, ainda com baixa cobertura vegetal, observou-se variações do NDVI entre 0,14 e 0,23 e a demanda média da ETR_{SSEBop} foi de $3,46 \text{ mm d}^{-1}$. Aos 65 DAP já na fase reprodutiva, que abrange o alongamento do colmo, emborrachamento e espigamento do trigo, observou-se as maiores demandas hídricas da cultura, com ETR_{SSEBop} média de $6,4 \text{ mm d}^{-1}$. Simultaneamente ao estágio fenológico, a boa disponibilidade hídrica e o aumento da exigência atmosférica também colaboraram para que as demandas se mantivessem altas no período. Nesse estágio, o NDVI alcançou o valor de 0,80, que representa o limite superior de desenvolvimento da biomassa fotossinteticamente ativa. Aos 73 DAP, quando o trigo estava no estágio reprodutivo de enchimento dos grãos, foi possível observar uma magnitude menor na taxa evapotranspirativa. A redução da estimativa deve-se à menor demanda

atmosférica, com ET_o de aproximadamente $3,62 \text{ mm d}^{-1}$ e TS mais amena, em torno de 296 K.

No período inicial da cultura em 2019, aos 09 DAP foi possível notar que a variação da ETR_{SSEBop} acompanhou as diferenças de temperatura no interior da área irrigada. O aumento da demanda hídrica foi percebido aos 41 DAP com a cultura ainda na fase vegetativa, já tendo iniciado o perfilhamento, a ETR_{SSEBop} máxima foi de $4,96 \text{ mm d}^{-1}$. Com o trigo na fase de maturação dos grãos aos 97 DAP, percebeu-se uma maior demanda atmosférica e um suave aumento da TS, com média de 298 K. O NDVI médio foi de 0,63 e a ETR_{SSEBop} máxima de $4,42 \text{ mm d}^{-1}$. Como a maior parte do pivô estava com o solo descoberto, o trigo estava mais exposto ao aquecimento do ar, dificultando a uniformidade de distribuição da umidade, onde se notou que os pixels das extremidades apresentaram valores de TS mais altos, consequentemente diminuindo a demanda hídrica, que teve uma ETR_{SSEBop} mínima de $2,97 \text{ mm d}^{-1}$ no período em questão. A baixa umidade volumétrica do solo na fase de maturação da cultura, em decorrência da ausência de eventos de irrigação, explica a menor magnitude na demanda da ETR ao longo do ciclo.

Na Tabela 2 estão apresentados os indicadores da análise estatística de desempenho do modelo SSEBop na avaliação pontual e diária durante o ciclo da cultura do trigo. As Figs. 4 (a e b) e 5 (a e b) trazem as correlações entre a ETR_{SSEBop} e a ETR_{RB} para os anos agrícolas de 2018 (a) e 2019 (b).

De acordo com a Fig. 4a, é possível observar a correlação positiva da ETR_{SSEBop} com a ETR_{RB} em 2018, com R^2 0,95, demonstrando a boa capacidade do modelo em representar os dados de campo. A mesma magnitude de correlação foi relatada por Oliveira-Guerra *et al.* (2020) em cinco campos de trigo de inverno avaliados no semiárido do Marrocos, e uma correlação muito próxima (R^2 0,94), foi verificada por Paula *et al.* (2019) para as culturas da soja e do feijão em condições de cerrado. O modelo SSEBop tendeu a subestimar a ETR_{RB} em $-0,05 \text{ mm d}^{-1}$ ou $-0,96\%$. O RMSE encontrado foi de $0,25 \text{ mm d}^{-1}$ ou 4,76%. Na bacia do Rio Colorado, Senay *et al.* (2016) reportaram uma ordem de erros maior, com

Tabela 2 - Indicadores da análise estatística de desempenho do modelo SSEBop nas datas de passagem dos satélites (Pontual) e entre as aquisições (Diária).

	Pontual		Diária	
	2018	2019	2018	2019
R^2	0,95	0,78	0,82	0,79
RMSE (mm d^{-1})	0,25	0,41	0,43	0,36
pRMSE (%)	4,76	10,32	8,36	8,98
BIAS (mm d^{-1})	-0,05	0,16	-0,06	0,03
pBIAS (%)	-0,96	4,12	-1,16	0,71
E	0,93	0,69	0,80	0,78

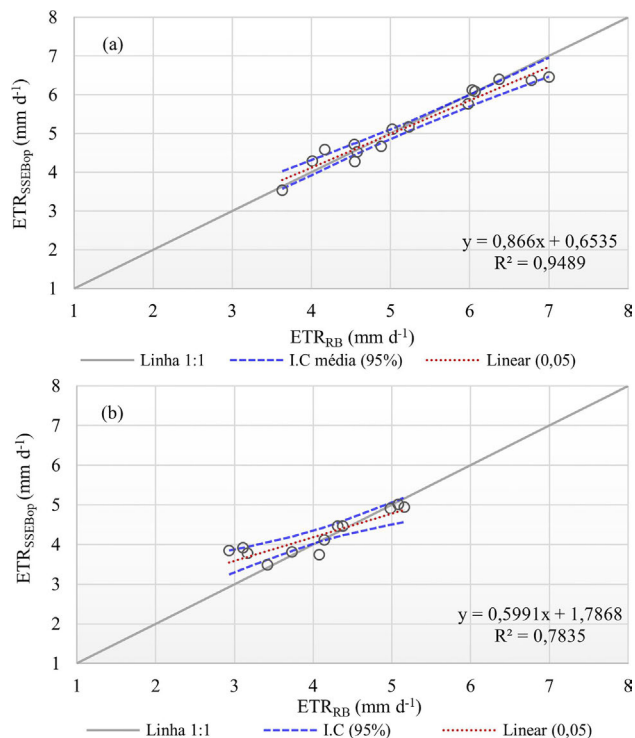


Figura 4 - Correlação entre a ETR_{SSEBop} e a ETR_{RB} nas datas de passagem dos satélites para o ano agrícola de 2018 (a) e 2019 (b), no Intervalo de Confiança de 95 % a um nível de significância ($p < 0,05$).

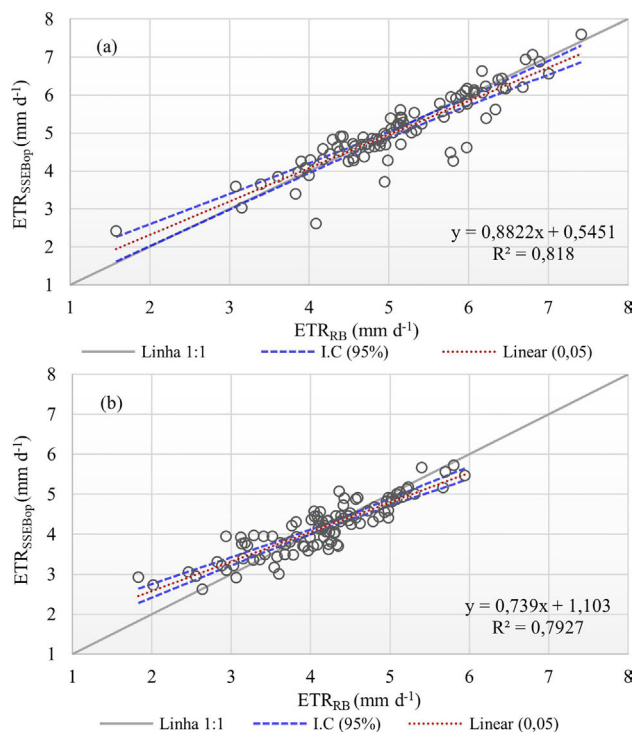


Figura 5 - Correlação entre a ETR_{SSEBop} e a ETR_{RB} extrapolada para estimativas diárias nos anos agrícolas de 2018 (a) e 2019 (b), no Intervalo de Confiança de 95 % a um nível de significância ($p < 0,05$).

RMSE variando entre 0,48 e 0,60 mm d^{-1} . Conforme o indicador de desempenho E de 0,93, pode-se afirmar que na determinação pontual para as datas de passagem dos satélites no ciclo de 2018, o modelo SSEBop teve um desempenho classificado como muito bom.

Na análise pontual de 2019, verifica-se na Fig. 4b que a ETR_{SSEBop} , em comparação com a ETR_{RB} , apresentou um R^2 de 0,78, com bom desempenho. O p-valor $< 0,05$ obtido da regressão indica a significância estatística do modelo. O SSEBop teve um RMSE de 0,41 mm ou 10,32%. Os indicadores estatísticos (Tabela 2) demonstram que a ETR_{SSEBop} superestimou em 0,16 mm d^{-1} ou 4,12% a ETR_{RB} . O coeficiente E, de 0,69, indica que nas datas de passagem dos satélites o SSEBop teve um desempenho satisfatório. O viés relativamente maior em 2019 decorreu da menor disponibilidade de imagens devido à contaminação por nuvem, adversidade característica de modelos de sensoriamento remoto e que foi relatado em estudos anteriores que utilizaram o modelo SSEBop (Senay et al., 2013; Senay et al., 2016; Paula et al., 2019; Lopes et al., 2019).

Como pode ser observado na Fig. 5a, o modelo SSEBop simulou a evapotranspiração real da cultura do trigo de forma adequada, com R^2 de 0,82, sugerindo que a variabilidade observada da ETR pôde ser bem representada pelo modelo. Os indicadores apresentados na Tabela 2 demonstram por meio do BIAS que, de modo geral, o SSEBop subestimou a ETR em $-0,06 \text{ mm d}^{-1}$ ou $-1,16\%$. O erro quadrático médio produzido pelo modelo foi de 0,43 mm d^{-1} ou 8,36%. O indicador de desempenho E de 0,80 obtido na extrapolação diária, também confirma o desempenho muito bom do modelo SSEBop tanto para a análise pontual quanto na escala diária no experimento de 2018.

Na extrapolação da ETR_{SSEBop} realizada no ciclo de 2019 Fig. 5b, obteve-se o R^2 de 0,79, indicando uma boa relação entre o dado modelado e o observado. O indicador RMSE, utilizado para representar a média da magnitude do erro gerado pelo SSEBop, apresentou a diferença em valores reais de 0,36 mm d^{-1} e percentuais de 8,98%. As variações do erro médio entre a ETR_{SSEBop} e a ETR_{RB} evidenciaram uma superestimativa do modelo de 0,03 mm d^{-1} ou 0,71% a mais em relação aos dados estimados pelo método da razão de Bowen. O coeficiente E de 0,78 aponta o bom desempenho da ETR_{SSEBop} em escala diária nas avaliações de 2019.

Senay et al. (2013) demonstram a boa correlação entre a ETR obtida pelo modelo SSEBop e o observado por torres de fluxo, mas alertam que, em termos de magnitude, houve tanto subestimativa quanto superestimativa dependendo da sazonalidade e das variações entre as torres. Senay et al. (2016), verificaram que em um dos experimentos houve uma superestimativa de 13% com R^2 de 0,91, e em outra área uma subestimativa do modelo SSEBop de -22% , que teve um R^2 de 0,82. A ordem de corre-

lação relatada pelos autores concorda com as variações verificadas no presente estudo, apesar dos percentuais de erro aqui encontrados terem sido menores. Em condições semelhantes de estudo, Lopes *et al.* (2019) aplicaram o modelo SSEBop para estimar a ETR do trigo e indicaram a tendência do modelo em superestimar a ETR_{RB} em $0,89 \text{ mm d}^{-1}$, o R^2 de 0,82 demonstrou o bom desempenho do modelo na referida avaliação.

Considerando as análises estatísticas realizadas para os dois anos agrícolas, pode-se afirmar que o modelo SSEBop representou de forma adequada os dados observados, tanto para medidas pontuais nas datas de passagem dos satélites quanto na extrapolação de medidas em escala diária.

3.3. Avaliação comparativa da modelagem

Após análise individual dos modelos propostos, procurou-se verificar, por comparação, as diferenças nas medições encontradas pelos dados modelados em relação à metodologia de campo, conforme apresentado na Fig. 7. A distribuição temporal da ETR_{RB} , ETR_{SEBAL} e ETR_{SSEBop} ao longo da safra de 2018 é indicada na Fig. 6.

Conforme a Fig. 6, nota-se que na fase vegetativa as taxas evapotranspirativas são menores, devido à baixa cobertura vegetal no início do desenvolvimento da cultura, onde prevalece sobre a transpiração a evaporação do teor de água no solo. Já na fase reprodutiva, a boa disponibilidade hídrica e o aumento da exigência atmosférica colaboraram para que as demandas se mantivessem altas no período. Se observa que dos 70 aos 73 DAP os valores da ETR_{SEBAL} e ETR_{SSEBop} se descolam dos dados da ETR_{RB} , período em que a cultura iniciou a fase de enchimento de grãos o que naturalmente elevou a taxa evapotranspirativa. Nesse período, ambos os modelos subestimaram os dados de campo, devido à TS maiores observadas dentro do perímetro irrigado.

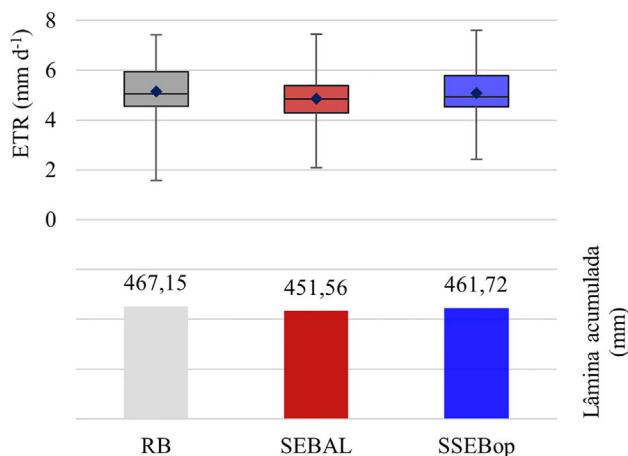


Figura 7 - Boxplot da variação da ETR_{RB} , ETR_{SEBAL} e ETR_{SSEBop} e lâmina acumulada para a cultura do trigo no ano agrícola de 2018.

Em 2018, o cultivo do trigo teve finalidade comercial e, por esse motivo, a frequência da irrigação e o valor das lâminas aplicadas foram maiores, garantindo um bom suprimento hídrico durante todo o ciclo e contribuindo para que a maior partição de RN fosse utilizada na evapotranspiração. Contudo, devido à proximidade do pivô com uma extensa área sem cobertura vegetal e, com umidade, temperatura e rugosidade descontínuas, possivelmente ocasionou correntes de ar quente e seco em direção ao pivô central, expondo a cultura ao efeito advectivo do vento no campo. Comportamento que foi verificado pelo método da razão de Bowen em função dos constantes valores negativos de H no período diurno, que resultaram em uma fonte adicional de calor, elevando os valores de LE , que muitas vezes suplantaram a radiação líquida disponível.

Tal efeito de advecção não é contabilizado pelo algoritmo SEBAL, prejudicando, ao longo do ciclo, o somatório das lâminas requeridas pela cultura, condição que

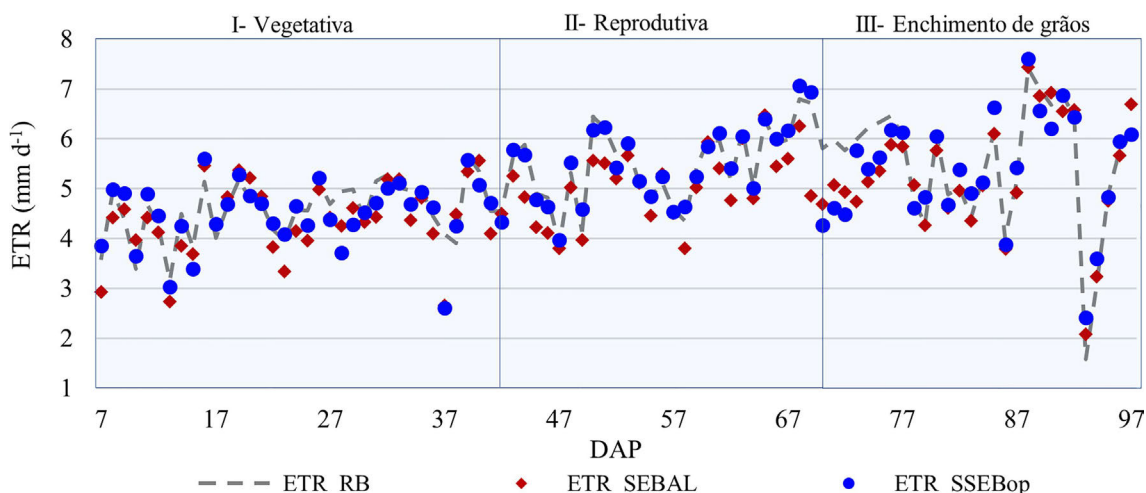


Figura 6 - Distribuição da ETR_{RB} , ETR_{SEBAL} e ETR_{SSEBop} para a cultura do trigo avaliada durante a safra de 2018 na região de Cristalina (GO).

também foi observada por Sing e Senay (2016), em campos irrigados de milho e soja. Mkhwanazi et al. (2015), atribuíram a subestimativa da ETR em condições advectivas pelo fato do modelo SEBAL desconsiderar a advecção como outra fonte de energia disponível para a evaporação.

Ainda de acordo com a Fig. 6, nota-se que as subestimativas mais acentuadas determinadas pelo modelo SEBAL ocorreram principalmente no início e no final do ciclo, justamente quando os valores de NDVI são mais baixos, seja pela pouca cobertura vegetal ou pelo decréscimo da biomassa fotossinteticamente ativa no período de senescência. Conforme Fig. 7, a ETR_{SEBAL} em escala diária teve como valor médio 4,85 mm d⁻¹ e, o valor da lâmina acumulada foi de 451,56 mm, subestimando a ETR_{RB} em 15,6 mm.

Já o modelo SSEBop, em 2018, apresentou valores mais próximos ao da ETR_{RB} , como pode ser verificado na Fig. 6, devido ao bom suprimento de água durante o desenvolvimento da cultura, sendo percebido pela sensibilidade do modelo às variações da TS dentro do pivô. Essa sensibilidade, à umidade volumétrica do solo, colaborou para que a demanda hídrica do trigo estimada pelo SSEBop de 461,72 mm, apresentasse uma subestimativa de apenas 5,43 mm, uma diferença menor em relação ao modelo SEBAL para o mesmo ano. A média do ciclo pela ETR_{SSEBop} foi 5,07 mm d⁻¹.

O pivô central estudado na safra de 2019 teve finalidade experimental para a SLC-Agrícola® e, por essa razão, apenas ¼ do pivô foi cultivado com a cultura do trigo. Mesmo com a área de estudo reduzida, manteve-se a densidade populacional da cultura de 4.000.000 pl/ha. A avaliação da ETR_{RB} , ETR_{SEBAL} e ETR_{SSEBop} ao longo da safra de 2019 é indicada nas Figs. 8-9.

Em razão das baixas frequências e volumes aplicados por irrigação após a colheita das culturas adjacentes, que vinham sendo cultivadas no mesmo pivô central, as taxas evapotranspirativas do trigo diminuíram (70 DAP),

como pode ser observado na Fig. 8, de modo que elevou a TS no perímetro irrigado. Nota-se ainda que entre o final da fase vegetativa e início da fase reprodutiva, os valores estimados pelo SEBAL se distanciam dos resultados da ETR_{RB} e da ETR_{SSEBop} , justificando o desempenho inferior do modelo no ano em questão.

No cultivo de 2019, conforme Fig. 9, a ausência de advecção colaborou para que a lâmina acumulada pelo modelo SEBAL de 421,08 mm, apresentasse uma diferença menor em relação aos resultados observados em campo, superestimando a ETR_{RB} em 1,45 mm. A média do ciclo da ETR_{SEBAL} foi 4,12 mm d⁻¹.

Espera-se que a fração evapotranspirativa tenha um comportamento constante no dia da passagem do satélite, de forma que possa ser aplicado para ampliar as estimativas instantâneas da ETR para escala diária. Contudo, essa suposição pode não ser válida para condições de restrição hídrica, como é o caso do cultivo de 2019, já que as frações estimadas nas datas de passagem foram utilizadas em

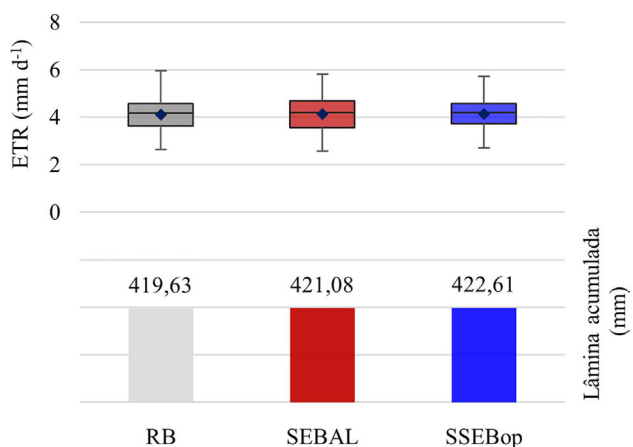


Figura 9 - Boxplot da variação da ETR_{RB} , ETR_{SEBAL} e ETR_{SSEBop} e lâmina acumulada para a cultura do trigo no ano agrícola de 2019.

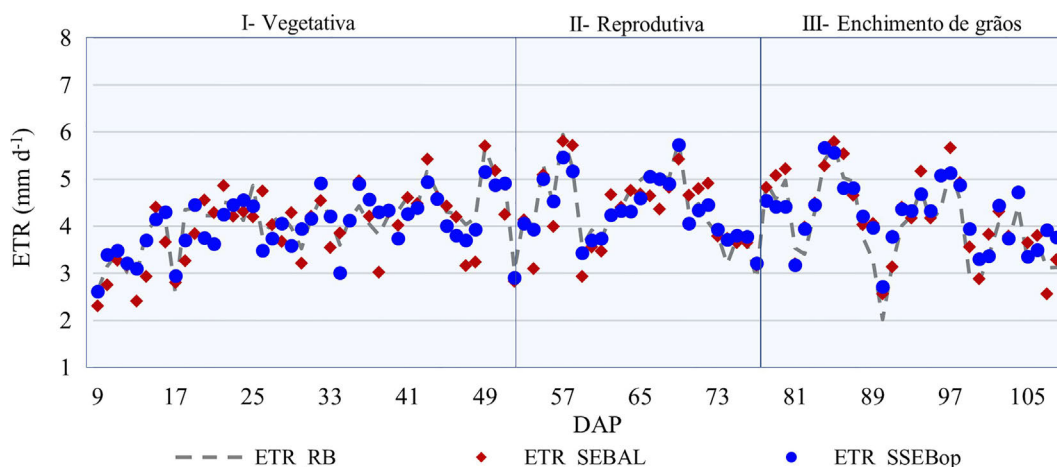


Figura 8 - Distribuição da ETR_{RB} , ETR_{SEBAL} e ETR_{SSEBop} para a cultura do trigo avaliada durante a safra de 2019 na região de Cristalina (GO).

mais dias consecutivos entre as aquisições. O aumento da TS no interior da área irrigada colaborou para um maior aquecimento do ar e do solo e a pouca representatividade da fração evapotranspirativa, adotada como constante durante o período de baixa disponibilidade hídrica, contribuíram para que o modelo SSEBop, que apresentou a média $4,14 \text{ mm d}^{-1}$ e acumulado de $422,61 \text{ mm}$, propagasse maior viés e superestimasse a ETR_{RB} em $2,98 \text{ mm}$.

3.4. Variabilidade na distribuição da ETR

Ao longo dos ciclos de desenvolvimento da cultura do trigo, os modelos SEBAL e SSEBop exprimiram diferenças nos padrões espaciais da evapotranspiração, distinção que pode estar relacionada à sensibilidade de cada modelo aos parâmetros de entrada. A fim de demonstrar a variabilidade na distribuição da ETR , foram selecionadas imagens referentes às fases fenológicas da cultura do trigo nas safras de 2018 (Fig. 10) e 2019 (Fig. 11).

Considerando as Figs. 10-11, nota-se que ambos os modelos foram capazes de captar os fluxos instantâneos da fração evapotranspirativa. Nas duas safras da cultura do trigo que foram avaliadas, as variações no padrão espacial exprimido pelo modelo SEBAL foram maiores, e foi per-

cebido que a variabilidade da ETR_{SEBAL} esteve mais intimamente relacionada ao NDVI, refletindo a distribuição dos pixels pelo processo de desenvolvimento vegetativo. Comportamento similar foi observado por Yang *et al.* (2015), nas fases intermediárias e final do ciclo da cultura do trigo. No entanto, é oportuno destacar que a TS também exerce grande impacto na variabilidade da ETR_{SEBAL} , mais propriamente na função que esse parâmetro tem na seleção dos pixels âncoras e, conseqüentemente, na determinação de H .

A ETR_{SSEBop} , ao longo das safras, demonstrou maior variabilidade dos dados espaciais em função da umidade do solo, refletida diretamente pela variação da TS no perímetro irrigado. Relação justificada pela premissa do modelo de que a dT entre a superfície do solo e do ar está relacionada de forma linear à umidade volumétrica do solo (Senay *et al.*, 2013).

A performance dos modelos que aplicam dados de sensoriamento remoto tende a ser afetada pela estrutura da modelagem, dados de entrada e a própria experiência do operador. O modelo SSEBop, ao assumir um limite predefinido de dT , elimina a necessidade de ancoragem dos pixels extremos. Dessa forma, a sensibilidade do modelo ao

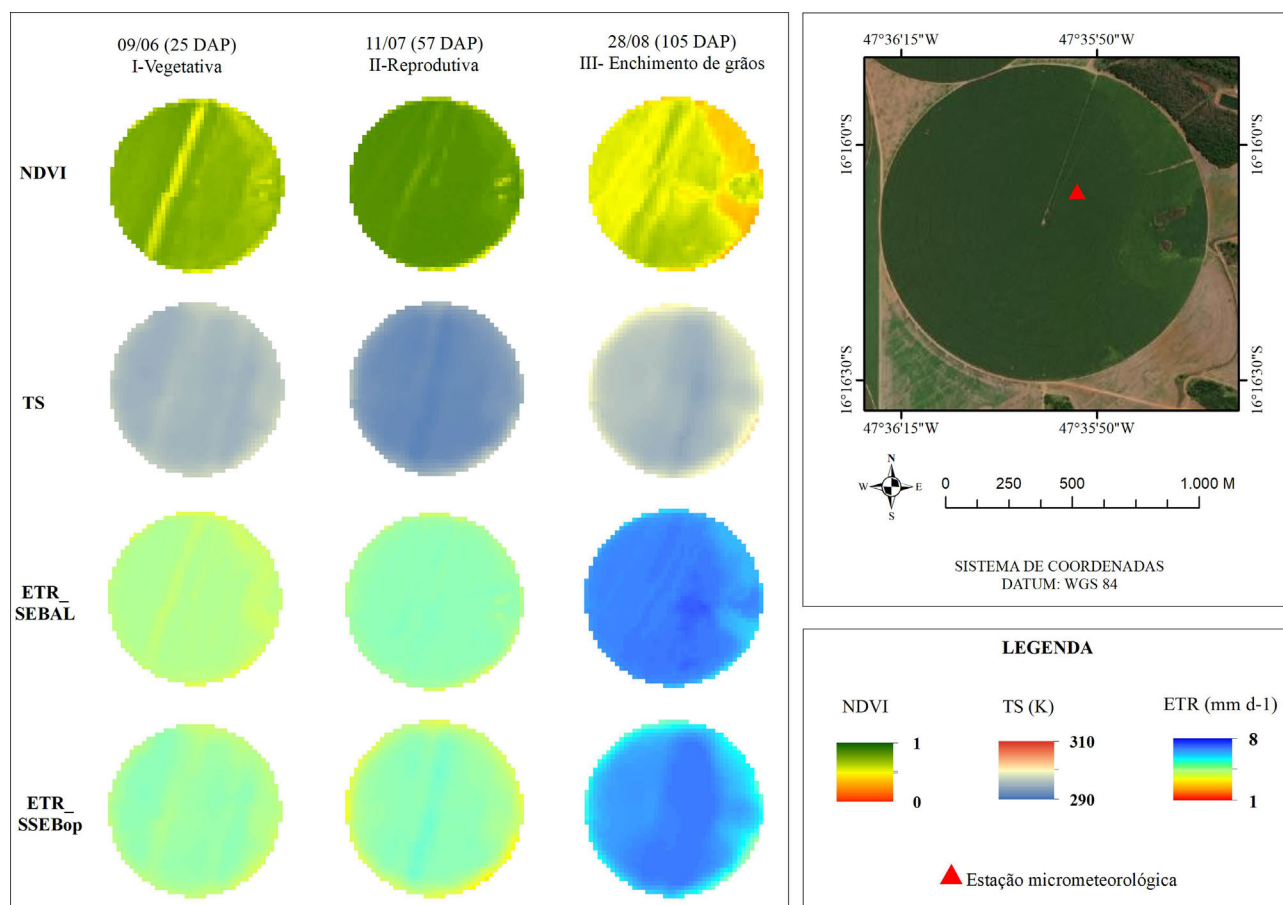


Figura 10 - Distribuição temporal e espacial do NDVI, Temperatura da Superfície (TS), ETR_{SEBAL} e da ETR_{SSEBop} para a cultura do trigo nos estágios fenológicos da safra de 2018 estimados na região de Cristalina (GO).

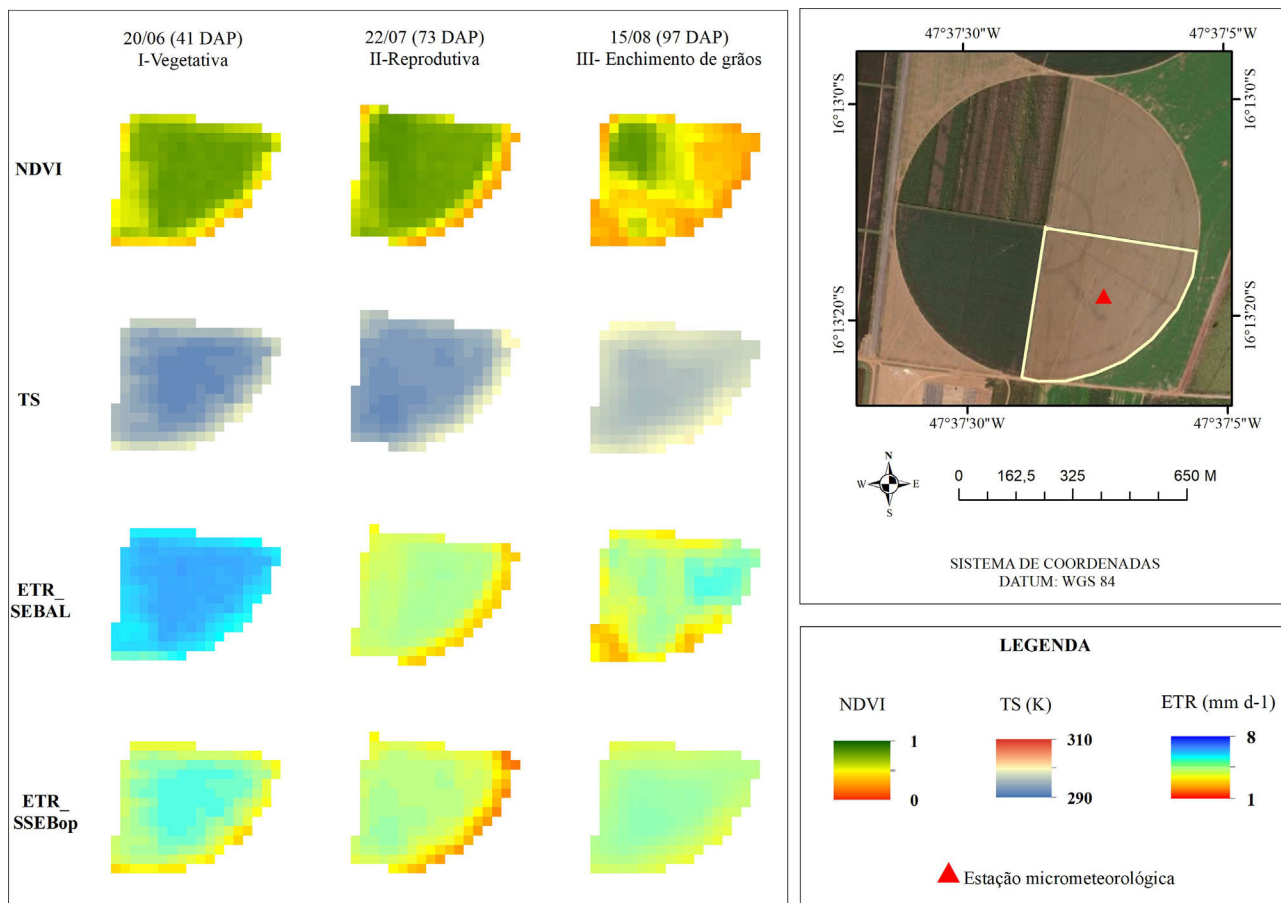


Figura 11 - Distribuição temporal e espacial do NDVI, Temperatura da Superfície (TS), ETR_{SEBAL} e da ETR_{SSEBop} , para a cultura do trigo nos estágios fenológicos da safra de 2019 estimados na região de Cristalina (GO).

erro de dT variará conforme a condição de umidade do solo, de modo que a ETR_{SSEBop} será pouco sensível ao erro de dT em caso de bom suprimento hídrico e muito sensível se o solo estiver seco (Senay *et al.*, 2014). Essa abordagem permite explicar o melhor desempenho do SSEBop em 2018, em que o pivô recebeu com mais frequência lâminas de irrigação.

As diferenças encontradas na estimativa da ETR são justificadas por possíveis imprecisões geradas pelo modelo SEBAL. Alguns estudos apontam que a origem dessa incerteza é devido à subjetividade na seleção dos pixels âncoras (Long e Singh, 2013; Paul *et al.* 2013). Nesse trabalho, a seleção dos pixels de referência foi feita de forma manual, de modo que o diferencial de temperatura mínimo nos pixels mais frios e máximo nos pixels quentes pudessem ser ancorados ao fluxo de calor sensível nas duas extremidades.

A subjetividade que existe na escolha dos pixels âncoras, no SEBAL, pode induzir o operador a não necessariamente escolher o pixel mais quente da cena. Timmermans *et al.* (2007), relataram que a sensibilidade na rugosidade do pixel mais quente, quando estava localizado em uma superfície muito heterogênea, propagou erros na

regressão linear, utilizada para estabelecer a variável dT . Long *et al.* (2011) indicam em seu estudo que um acréscimo de 2 K na TS pode gerar um aumento médio de 27,7% na estimativa de H .

De modo geral, as estimativas alcançadas no presente estudo pelo SEBAL concordam com as variações dos coeficientes de determinação relatados em outros trabalhos (Li *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2015; Rawat *et al.*, 2017). Contudo, apesar da solução completa do balanço de energia e da complexidade operacional do modelo SEBAL, o seu desempenho ainda que satisfatório, não foi o mais adequado para representar a variabilidade dos dados de campo, principalmente na ocorrência de advecção de calor sensível.

O modelo SSEBop, em ambos os ciclos avaliados, apresentou um desempenho melhor e mais satisfatório. As variações da ETR_{SSEBop} retrataram apropriadamente os dados coletados em campo e concordam com as correlações verificadas nos trabalhos de Senay *et al.* (2016), Oliveira-Guerra *et al.* (2020) e Mukherjee *et al.* (2021), assim como a correlação relatada por Lopes *et al.*, (2019), em condição de avaliação semelhante. A acurácia do SSEBop verificada neste estudo, confirma a boa capacidade do

modelo na estimativa da *ETR* para a cultura do trigo irrigado na região do Cerrado.

4. Considerações Finais

Visto que, tantos fatores intervenientes podem trazer maior complexidade na estimativa da *ETR*, torna-se de extrema importância aprimorar o desempenho dos modelos, por meio de calibrações e verificações. As informações que foram apresentadas podem auxiliar na compreensão das fontes de variações que implicam nos produtos dos dados modelados.

Considerando o período de estudo que abrangeu a estação seca na região do Cerrado, que é climatologicamente bem definida, a aplicação das metodologias foi facilitada tanto pela baixa cobertura de nuvens nas imagens quanto pela clareza em que se pôde selecionar as condições de contorno do pixel frio, dada a ausência da contribuição das chuvas na oferta hídrica.

O modelo SSEBop apresentou melhor desempenho e pode-se afirmar que o modelo tem uma aplicação viável devido sua simplicidade operacional, e é adequado para determinar a evapotranspiração da cultura do trigo. O modelo torna-se, portanto, uma ferramenta de grande importância tanto para os produtores rurais e pesquisadores quanto para os órgãos competentes de fiscalização de uso da água e extensão rural, colaborando para existir maior eficiência na utilização da água, especialmente em bacias hidrográficas onde há predominância da agricultura irrigada.

Agradecimentos

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF), pelo financiamento do projeto “Estimativa e monitoramento do consumo de água pela agricultura irrigada por meio de imagens de sensoriamento remoto orbitais e Sistemas Aéreos Não Tripulados”, processo 0193.002050/2017. À Agência Nacional de Águas (ANA), por acordo de cooperação com a Universidade de Brasília (UnB) (SEI: 23106.017285/2015-20). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES)-Código de Financiamento 001.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual de Procedimentos Técnicos e Administrativos de Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos**. Brasília: ANA, 2013.
- AHMED, B.M.; TANAKAMARU, H.; TADA, A. Application of remote sensing for estimating crop water requirements, yield and water productivity of wheat in the Gezira Scheme, **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 16, p. 4281-4294, 2010. doi
- ALBRECHT, J.C.; CHAGAS, J.H.; SOBRINHO, J.S.; SCHEEREN, P.L.; FRONZA, V. **Trigo BRS 394: Cultivar para o Cerrado do Brasil Central**. Brasília: Embrapa, 12 p., 2020.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements**. FAO. **Irrigation and Drainage Paper**, n. 56. Rome: FAO, 300 p., 1998..
- ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) - Advanced Training and User's Manual**. Idaho: University of Idaho, v. 1, 97 p., 2002.
- ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) - Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007. doi
- AZEVEDO, J.A. **Níveis de Tensão de Água no Solo e Suspensão da Irrigação em Três Períodos de Crescimento do Trigo Irrigado em Solo de Cerrado: Efeito Sobre a Produtividade, Componentes de Produção, Desenvolvimento e Uso de Água**. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 157 p., 1988.
- BALA, A.; PAWAR, P.S.; MISRA, A.K.; RAWAT, K.S. Estimation and validation of actual evapotranspiration for wheat crop using SEBAL model over Hisar district, Haryana, India. **Current Science**, v. 113, n. 1, p. 134-141, 2017.
- BASTIAANSSEN, W.G.; CHANDRAPALA, L. Water balance variability across Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use. **Agricultural Water Management**, v. 58, n. 2, p. 171-192, 2003. doi
- BASTIAANSSEN, W.G.M.; MENENTI, M.; FEDDES, R.A.; HOLTSLAG, A.A.M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212, p. 198-212, 1998. doi
- BASTIAANSSEN, W.G.; NOORDMAN, E.J. M.; PELGRUN, 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**, v. 131, n. 1, p. 85-93, 2005.
- BERLATO, M.A.; MOLION, L.B. **Evaporação e Evapotranspiração - IPAGRO. Boletim Técnico n. 7**. Porto Alegre: IPAGRO, 95 p., 1981..
- BEZERRA, B.G.; SILVA, B.B.; FERREIRA, J.N. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM-Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008. doi
- BHATTARAI, N.; SHAW, S.B.; QUACKENBUSH, L.J.; IM, J.; NIRLAULA, R. Evaluating five remote sensing based single-source surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in a humid subtropical climate. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 49, p. 75-86, 2016. doi
- BIGGS, T.W.; MARSHALL, M.; MESSINA, A. Mapping daily and seasonal evapotranspiration from irrigated crops using global climate grids and satellite imagery: Automation and methods comparison. **Water Resources Research**, v. 52, n. 9, p. 7311-7326, 2016. doi

- BOSCHINI, A.P.M.; SILVA, C.L.; OLIVEIRA, C.A.S.; OLIVEIRA JÚNIOR, M.P.; MIRANDA, M.Z.; FAGIOLI, M. Aspectos quantitativos e qualitativos do grão de trigo influenciados por nitrogênio e lâminas de água. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 5, p. 450-457, 2011. doi
- BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, v. 27, p. 779-787, 1926. doi
- CARGNIN, A.; SOUZA, M.A. de; FRONZA, V.; ALBRECHT, J.C.; SILVA, M.S.; SOARES SOBRINHO, J.; YAMANAKA, C.H.; FOGAÇA, C.M. **Progressos do Melhoramento Genético do Trigo de Sequeiro no Cerrado de Minas Gerais entre 1976 e 2005. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento n. 242**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 17 p., 2009.
- CARRILLO-ROJAS, G.; SILVA, B.; CÓRDOVA, M.; CÉLLERI, R.; BENDIX, J. Dynamic mapping of evapotranspiration using an energy balance-based model over an andean Paramo catchment of southern Ecuador. **Remote Sensing**, v. 8, n. 2, p. 1-24, 2016. doi
- CHEN, M.; SENAY, G.B.; SINGH, R.K.; VERDIN, J.P. Uncertainty analysis of the Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) model at multiple flux tower sites. **Journal of Hydrology**, v. 536, p. 384-399, 2016. doi
- DU, J.; SONG, K.; WANG, Z.; ZHANG, B.; LIU, D. Evapotranspiration estimation based on MODIS products and surface energy balance algorithms for land (SEBAL) model in Sanjiang Plain, Northeast China. **Chinese Geographical Science**, v. 23, n. 1, p. 73-91, 2013. doi
- FISHER, M.L.; CUNHA, T.; ROCHA, D.A.; ROSANELI, C.F.; BICUDO, R.M.; SGANZERLA, A. Crise hídrica em publicações científicas: olhares da bioética ambiental. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, n. 3, p. 586-600, 2016. doi
- FUMIS, T.F.; PEDRAS, J.F.; SAMPAIO, A.C. Análise de crescimento em cultivares de trigo (*Triticum aestivum* L.) submetidos a déficits hídricos, na região de Bauru-SP. **Irriga**, v. 2, n. 3, p. 101-114, 1997. doi
- GAVILAN, P.; BERENGENA, J. Accuracy of the Bowen ratio energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. **Irrigation Science**, v. 25, p. 127-140, 2007. doi
- GHARBIA, S.S.; SMULLEN, T.; GILL, L.; JOHNSTON, P.; PILLA, F. Spatially distributed potential evapotranspiration modeling and climate projections. **Science of The Total Environment**, v. 633, p. 571-592, 2018. doi
- GUERRA, A.F.; RODRIGUES, G.C.; ROCHA, O.C.; EVANGELISTA, W. **Necessidade Hídrica no Cultivo de Feijão, Trigo, Milho e Arroz Sob Irrigação no Bioma Cerrado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 100**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2003.
- HENDRICKX, J.M.H.; HONG, S.H.; FRIESEN, J.; COMPAORE, H.; GIESEN, N.V. de.; RODGERS, C.; VLEK, P.L.G. Mapping energy balance fluxes and root zone soil moisture in the White Volta Basin using optical imagery. Targets and Backgrounds XII: **Characterization and Representation**, v. 6239, p. 62390Q-1-62390Q-12, 2006.
- HORST, T.W.; WEIL, J.C. Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface layer. **Bound. Layer Meteorol.** v. 59, p. 279-296, 1992. doi
- HU, S.; ZHAO, C.; LI, J.; WANG, F.; CHEN, Y. Discussion and reassessment of the method used for accepting or rejecting data observed by a Bowen ratio system. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 15, p. 4506-4510, 2014. doi
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Brasília: IBGE, p. 1-148, 2019.
- KALMA, J.D.; MCVICAR, T.R.; MCCABE, M.F. Estimating land surface evaporation: A review of methods using remotely sensed surface temperature data. **Surveys in Geophysics**, v. 29, p. 421-469, 2008. doi
- KITE, G.W.; DROOGERS, P. Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 3-18, 2000. doi
- KLAR, A.E.; DENADAI, I.A.M. Resistência à seca em cultivares de trigo: qualidade e rendimento dos grãos e medições fisiológicas. **Irriga**, v. 1, n. 2, p. 1-25, 1996. doi
- KOLMOGOROV, A.N. Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione. **Giornale dell'Instituto Italiano degli Attuari**, v. 4, p. 83-91, 1933.
- LEE, X.; YU, Q.; SUN, X.; LIU, J.; MIN, Q.; LIU, Y.; ZHANG, X. Micrometeorological fluxes under the influence of regional and local advection: A revisit. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 122, p. 111-124, 2004. doi
- LI, H.; ZHENG, L.; LEI, Y.; LI, C.; LIU, Z.; ZHANG S. Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in North China Plain using remote sensing technology. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 11, p. 1271-1278, 2008. doi
- LONG, D.; SINGH, V.P.; LI, Z.L. How sensitive is SEBAL to changes in input variables, domain size and satellite sensor? **Journal Geophysical Research**, v. 116, p. 1-20, 2011. doi
- LONG, D.; SINGH, V.P. Assessing the impact of end-member selection on the accuracy of satellite-based spatial variability models for actual evapotranspiration estimation. **Water Resources Research**, v. 49, p. 2601-2618, 2013. doi
- LOPES, J.D.; RODRIGUES, L.N.; IMBUZEIRO, H.M.A.; PRUSKI, F.F. Performance of SSEBop model for estimating wheat actual evapotranspiration in the Brazilian Savannah region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 40, n. 18, p. 6930-6947, 2019. doi
- LOSGEDARAGH, S.; RAHIMZADEGAN, M. Evaluation of SEBS, SEBAL, and METRIC models in estimation of the evaporation from the freshwater lakes (Case study: Amir-kabir dam, Iran). **Journal of Hydrology**, v. 561, p. 523-531, 2018. doi
- LUCHIARI JR., A.; RIHA, S.J.; GOMIDE, R.L. Energy balance in irrigated wheat in the cerrados region of Central Brazil. **Scientia Agrícola**, v. 54, p. 78-88, 1997. doi
- MACHADO, C.C.; SILVA, B.B.; ALBUQUERQUE, M.B.; GALVÍNCIO, J.D. Estimativa do balanço de energia utilizando imagens TM- Landsat 5 e o algoritmo SEBAL no litoral sul de Pernambuco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 1, p. 55-67, 2014. doi

- MAFRON, P.A.; LAZZAROTTO, C.; MEDEIROS, S.L.P. TRIGO - Aspectos agrometeorológicos. *Ciência Rural*, v. 23, n. 2, p. 233-239, 1993. [doi](#)
- MCSHANE, R.R.; DRISCOLL, P.K.; SANDO, R. **A Review of Surface Energy Balance Models for Estimating Actual Evapotranspiration with Remote Sensing at High Spatiotemporal Resolution over Large Extents**. *Scientific Investigations Report 2017-5087*. Reston: U.S. Geological Survey, 19 p., 2017. [doi](#)
- MKHWANAZI, M.; CHÁVEZ, J.L.; ANDALES, A.A. SEBAL-A: A remote sensing ET algorithm that accounts for advection with limited data. Part I: Development and validation. *Remote Sensing*, v. 7, n. 11, p. 15046-15067, 2015. [doi](#)
- MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. **Principles of Environmental Physics**, 2ª ed. London: Edward Arnold, 291 p., 1990.
- MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. [doi](#)
- MUKHERJEE, J.; SHARMA, A.; DHAKAR, R.; SEHGAL, V.K.; CHAKRABORTY, D.; DAS, D.K. Estimation and validation of Actual Evapotranspiration (E_{ta}) of maize wheat cropping system using SSEBop model over IARI research farm, New Delhi, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 49, p. 1-15, 2021. [doi](#)
- NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.
- OLIVEIRA NETO, A.A.; SANTOS, C.M.R. **A Cultura do Trigo**. Brasília: CONAB, 218 p., 2017.
- OLIVEIRA-GUERRA, L.; MERLIN, O.; ER-RAKI, S. Irrigation retrieval from Landsat optical/thermal data integrated into a crop water balance model: A case study winter wheat fields in a semi-arid region. *Remote Sensing of Environment*, v. 239, p. 1-18, 2020. [doi](#)
- PAUL, G.; GOWDA, P.H.; VARA PRASAD, P.V.; HOWELL, T.A.; STAGGENBORG, S.A.; NEALE, C.M.U. Lysimetric evaluation of SEBAL using high resolution airborne imagery from BEAREX08. *Advances in Water Resources*, v. 59, p. 157-168, 2013. [doi](#)
- PAULA, A.C.P.; SILVA, C.L.; RODRIGUES, L.N.; SCHERERWARREN, M. Performance of the SSEBop model in the estimation of the actual evapotranspiration of soybean and bean crops. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 54, p. 1-11, 2019. [doi](#)
- PAYERO, J.O.; IRMAK, S. Daily energy fluxes, evapotranspiration and crop coefficient of soybean. *Agricultural Water Management*, v. 129, p. 31-43, 2013. [doi](#)
- PEEL, M.C.; FINLAYSON, B.L.; MCMAHON, T.A. Update world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 11, p. 1633-1644, 2007. [doi](#)
- PEREZ, P.J.; CASTELLVI, F.; IBÁÑEZ, M.; ROSELL, J.I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. *Agricultural and Forest Meteorological*, v. 97, n. 3, p. 141-150, 1999. [doi](#)
- PROFETA, A.L.; FARIA, S.D.; IMBUZEIRO, H.M.A. Estimativa da evapotranspiração real em área de relevo acidentado utilizando o SEBAL. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 70, n. 4, p. 1437-1469, 2018. [doi](#)
- RAWAT, K.S.; BALA, A.; SINGH, S.K.; PAL, R.K. Quantification of wheat crop evapotranspiration and mapping: a case study from Bhiwani District of Haryana, India. *Agricultural Water Management*, v. 187, p. 200-209, 2017. [doi](#)
- ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: **Proceedings 3 Earth Resources Technology Satellite Symposium**, Washington: NASA, p. 309-317, 1973.
- SCHERER-WARREN, M. Desmembramento de estimativas de evapotranspiração obtidas por sensoriamento remoto nas componentes de evaporação e transpiração vegetal. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 2, p. 361-373, 2012.
- SCHIRMBECK, J.; FONTANA, D.C.; ROBERTI, D.R.; SCHIRMBECK, L.W. Energy balance from images in humid climate- SEBAL and METRIC. *Agrometeoros*, v. 25, n. 2, p. 383-393, 2017.
- SCHMIDT, E.W.; VALIATI, M.I. Avaliação do manejo de irrigação para a cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris*) irrigada por pivô central na Agrícola Wehrmann em Cristalina - GO. *Revista Campo Digital*, v. 1, n. 1, p. 23-31, 2006.
- 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. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 49, n. 3, p. 577-591, 2013. [doi](#)
- SENAY, G.B.; BUDDE, M.; VERDIN, J.P.; MELESSE, A.M. A coupled remote sensing and simplified surface energy balance approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields. *Sensors*, v. 7, p. 979-1000, 2007. [doi](#)
- SENAY, G.B.; FRIEDRICH, M.; SINGH, R.K.; VELPURI, N.M. Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River basin. *Remote Sensing of Environment*, v. 185, p. 171-185, 2016. [doi](#)
- SENAY, G.B.; GOWDA, P.H.; BOHMS, S.; HOWELL, T.A.; FRIEDRICH, M.; MAREK, T. H.; VERDIN, J.P. Evaluating the SSEBop approach for evapotranspiration mapping with Landsat data using lysimetric observations in the semi-arid Texas High Plains. *Hydrology and Earth Systems Science*, v. 11, p. 723-756, 2014. [doi](#)
- SENAY, G.B.; MACKENZIE, F.; MORTON, C.; PARRISH, G.E.L.; SCHAUER, M.; KHAND, K.; KAGONE, S.; BOIKO, O.; HUNTINGTON, J. Mapping actual evapotranspiration using Landsat for the conterminous United States: Google Earth Engine implementation and assessment of the SSEBop model. *Remote Sensing of Environment*, v. 275, D113011, 2022. [doi](#)
- SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance teste for normality (complete samples). *Biometrika*, v. 52, p. 591-611, 1965.
- SHUKLA, J.; MINTZ, Y. Influence of land-surface evapotranspiration on the Earth's climate. *Science*, v. 215, n. 4539, p. 1498-1501, 1982.

- SINGH, R.K.; SENAY, G.B. Comparison of four different energy balance models for estimating evapotranspiration in the Midwestern United States. **Water**, v. 8, n. 9, p. 1-19, 2016. [doi](#)
- SOUZA, J.M.F. **Aplicação do algoritmo SAFER na Obtenção da Evapotranspiração Atual das Culturas em Condições de Cerrado**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Goiás, Goiás, 92 p., 2016.
- SPERA, S.A.; GALFORD, G.L.; COE, M.T.; MACEDO, M.N.; MUSTARD, J.F. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. **Global Change Biology**, v. 22, p. 3405-3413, 2016. [doi](#)
- STANNARD, D.I. A theoretically based determination of bowen ratio fetch requirements. **Boundary Layer Meteorology**, v. 83, p. 375-406, 1997. [doi](#)
- SWENSON, S.; WAHR, J. Estimating large-scale precipitation minus evapotranspiration from GRACE satellite gravity measurements. **Journal of Hydrometeorology**, v. 7, n. 2, p. 252-270, 2006. [doi](#)
- TASUMI, M.; TREZZA, R.; ALLEN, R.G.; WRIGHT, J.L. Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 19, p. 355-376, 2005. [doi](#)
- 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. [doi](#)
- THORNTHWAITE, C.W.; WILM, H.G. Report of the committee on evapotranspiration and transpiration. **Transactions of the American Geophysical Union**, v. 25, p. 686-693, 1944.
- TIMMERMANS, W.J.; KUSTAS, W.P.; ANDERSON, M.C.; FRENCH, A.N. An intercomparison of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL) and the two source energy balance (TSEB) modeling schemes. **Remote Sensing of Environment**, v. 108, n. 4, p. 369-384, 2007. [doi](#)
- VELOSO, G.A.; FERREIRA, M.E.; SILVA, B.B. da. Determinação da evapotranspiração real diária em áreas irrigadas do projeto Jaíba (Minas Gerais, Brasil), mediante imagens Landsat 5-TM. **Revista Cerrados**, v. 15, n. 1, p. 53-76, 2017.
- VICTORIA, D.C. **Estimativa da Evapotranspiração da Bacia do Ji-Paraná (RO) Através de Técnicas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento**. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 88 p., 2004.
- ZHOU, X.; BI, S.; YANG, Y.; TIAN, F.; REN, D. Comparison of ET estimations by the three-temperature model, SEBAL model and eddy covariance observations. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 769-776, 2014. [doi](#)
- YANG, J.Y.; MEI, X.R.; HUO, Z.G.; YAN, C.R.; HUI, J.U.; ZHAO, F.H.; QIN, L.I.U. Water consumption in summer maize and winter wheat cropping system based on SEBAL model in Huang-Huai-Hai Plain, China. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 14, n. 10, p. 2065-2076, 2015. [doi](#)
- YIN, L.; XIAOFENG, W.; FENG, X.; FU, B.; CHEN, Y. A comparison of SSEBop-Model-Based evapotranspiration with eight evapotranspiration products in the Yellow River Basin, China. **Remote Sensing**, v. 12, D2528, 2020. [doi](#)