



## Métodos de estimativa de evapotranspiração para o feijoeiro irrigado

Victor Ebenézer Dias Salgado<sup>1</sup>, Adriano da Silva Lopes<sup>2</sup>, Éder Duarte Fanaya Júnior<sup>3</sup>, Jhonatan da Silva Franco<sup>4</sup>, Sebastião Nilce Souto Filho<sup>5</sup>

**Resumo.** O cultivo do feijão obteve uma intensificação em sua produtividade com a adesão da terceira safra, variedades mais precoces e irrigação, principalmente via pivô central. A estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) é fundamental para o manejo da irrigação e o delineamento do balanço hídrico da cultura. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de cinco métodos empíricos de ET<sub>o</sub> (Hargreaves-Samani, Priestley & Taylor, Benevides-Lopes, Hamon e Jensen-Haise), comparados ao padrão Penman-Monteith FAO-56, na região de Aquidauana, Mato Grosso do Sul, Brasil. O estudo foi realizado na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, cuja as variáveis climáticas utilizadas foram obtidas na estação Meteorológica da Unidade Universitária no ano de 2020. A comparação dos valores de ET<sub>o</sub> foi realizada com base nos parâmetros coeficiente de determinação, índice de concordância de Willmott, índice de desempenho, estimativa do erro padrão, erro médio absoluto e raiz quadrada do quadrado médio do erro. O método Priestley & Taylor pode ser indicado para o manejo de irrigação na cultura do feijoeiro de inverno em Aquidauana-MS. Os métodos de estimativa de ET<sub>o</sub> que utilizam saldo de radiação solar como um de seus componentes apresentam melhor desempenho em comparação aos demais.

**Palavras-chave:** Evapotranspiração de Referência. Manejo de Irrigação. Penman-Monteith.

DOI:10.21472/bjbs.v10n23-003

Submitted on:  
11/02/2023

Accepted on:  
12/06/2023

Published on:  
12/25/2023



Open Access  
Full Text Article



## Evapotranspiration estimation methods for irrigated beans

**Abstract.** Bean cultivation has intensified productivity with the introduction of the third harvest, earlier varieties and irrigation, mainly via center-pivot. The estimation of reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) is fundamental for irrigation management and the outlining of the crop water balance. The objective of this work was to evaluate the performance of five empirical methods of (ET<sub>o</sub>), being: Hargreaves-Samani, Priestley & Taylor, Benevides-Lopes, Hamon and Jensen-Haise, compared to the standard Penman-Monteith FAO-56, in the Aquidauana region, Mato Grosso do Sul, Brazil. The study was conducted at

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Aquidauana, Mato Grosso do Sul, Brasil.  
E-mail: [victorebenezerds@gmail.com](mailto:victorebenezerds@gmail.com)

<sup>2</sup> Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Aquidauana, Mato Grosso do Sul, Brasil.  
E-mail: [lopes@uems.br](mailto:lopes@uems.br)

<sup>3</sup> Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Aquidauana, Mato Grosso do Sul, Brasil.  
E-mail: [ederdfanayajr@gmail.com](mailto:ederdfanayajr@gmail.com)

<sup>4</sup> Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Aquidauana, Mato Grosso do Sul, Brasil.  
E-mail: [theo.alvico@ufms.br](mailto:theo.alvico@ufms.br)

<sup>5</sup> Universidade Professor Edson Antônio Velano (UNIFENAS), Alfenas, Mato Grosso do Sul, Brasil.  
E-mail: [sebastiao.filho@unifenas.br](mailto:sebastiao.filho@unifenas.br)

the State University of Mato Grosso do Sul, where the climate variables used were obtained from the meteorological station of the University Unit in the year of 2020. The comparison of the estimated values of (ET<sub>o</sub>) was performed based on the parameter's coefficient of determination, willmott's concordance indexes, performance index, estimated standard error, mean absolute error, and square root of the mean square of the error. The Priestley-Taylor method can be indicated for irrigation management of winter bean crop in Aquidauana-MS. ET<sub>o</sub> estimation methods that use the solar radiation balance as one of its components perform better than the other methods.

**Keywords:** Reference Evapotranspiration. Irrigation Management. Penman-Monteith.

### Necesidad de agua del frijol de invierno estimada mediante modelos agrometeorológicos

**Resumen.** El cultivo de frijol aumentó su productividad con la incorporación de la tercera cosecha, variedades más tempranas y el riego, principalmente mediante pivote central. La estimación de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) es fundamental para la gestión del riego y el diseño del balance hídrico del cultivo. El objetivo de este trabajo fue evaluar el desempeño de cinco métodos empíricos ET<sub>o</sub> (Hargreaves-Samani, Priestley & Taylor, Benevides-Lopes, Hamon y Jensen-Haise), comparados con el estándar Penman-Monteith FAO-56, en la región de Aquidauana. Mato Grosso do Sul, Brasil. El estudio se realizó en la Universidad Estadual de Mato Grosso do Sul, donde las variables climáticas utilizadas fueron obtenidas de la Estación Meteorológica de la Unidad Universitaria en 2020. La comparación de los valores de ET<sub>o</sub> se realizó a partir del coeficiente de determinación de los parámetros, índice de acuerdo Willmott, índice de desempeño, estimación del error estándar, error absoluto medio y raíz cuadrada del error cuadrático medio. El método Priestley & Taylor puede recomendarse para el manejo del riego en cultivos de frijol de invierno en Aquidauana-MS. Los métodos de estimación de ET<sub>o</sub> que utilizan el balance de radiación solar como uno de sus componentes presentan un mejor rendimiento en comparación con los demás.

**Palabras clave:** Evapotranspiración de Referencia. Gestión del Riego. Penman-Monteith.

## INTRODUÇÃO

O feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma leguminosa amplamente cultivada no mundo. Na safra 2021, a cultura do feijão no Brasil alcançou área total plantada em torno de 2.907,9 mil ha<sup>-1</sup> e produtividade média de 1.079 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2021). A produtividade da cultura é determinada por alguns fatores como: sementes de boa qualidade, demanda hídrica e adubação.

O ciclo da planta do feijoeiro é dividido em quatro fases fenológicas: fase inicial, fase de desenvolvimento da cultura, fase de florescimento e fase de enchimento de vagens e maturação, sendo que os períodos de florescimento e enchimento de grãos são os mais críticos quanto a dependência de água (Oliveira *et al.*, 2018).

O feijoeiro apresenta ciclo curto, possibilitando sua adequação dentro de uma janela menor, preservando a produção de outros cultivos no mesmo ano-safra, podendo ser cultivado em três épocas distintas: de primeira safra, semeado entre agosto e dezembro; o de segunda safra, entre janeiro e abril e o de terceira safra, de maio a julho (CONAB, 2021).

A demanda hídrica de um cultivo é um dos principais pilares de produtividade e a evapotranspiração se constituiu como um importante componente desse fator, por meio deste parâmetro agrometeorológico ocorrem o planejamento agrícola e o manejo de irrigação (Oliveira *et al.*, 2020).

Pode ser conceituada como o conjunto dos componentes de transpiração nas plantas e evaporação da água no solo para atmosfera no estado de vapor. É considerada um elemento climático, justificando sua aplicação em estudos meteorológicos, climatológicos e hidrológicos (Mantovani *et al.*, 2009).

A necessidade hídrica do feijoeiro depende de vários fatores, como variedade, manejo adotado, estágio de desenvolvimento e condições edafoclimáticas, sendo que as fases finais são as mais exigentes da cultura (Oliveira, 2020).

O volume de água necessário para o feijoeiro em perspectivas de alta produtividade varia entre 300 a 500 mm, logo, uma demanda considerável de água para um período curto de ciclo, afetando a produtividade em situações de estresse hídrico, além disso, morfológicamente, a planta de feijão apresenta um sistema radicular pivotante raso, pouco desenvolvido, com sua maior parte concentrada na camada de até 0,2 m de profundidade do solo, fator comprometedor em períodos de estiagens (Dal Moro *et al.*, 2018).

Desta forma, o balanço hídrico climatológico é uma importante ferramenta que pode auxiliar o monitoramento da entrada de água no solo (irrigação, precipitação efetiva e ascensão capilar) e as saídas (evapotranspiração e percolação profunda), desconsiderando os meios por escoamento superficial e considerando apenas o armazenamento máximo adequado para a cultura. Logo, o balanço hídrico possibilita realizar a gestão dos recursos hídricos no solo, indispensável para o desenvolvimento de projetos de irrigação, garantindo a potencialidade produtiva da cultura (Frizzzone *et al.*, 2018).

O conhecimento da distribuição e disponibilidade hídrica de uma região, o estudo da ETo auxiliadas com o cálculo do balanço hídrico possibilita um manejo mais eficiente da irrigação, contribuindo para um uso racional desse recurso (Farinassi, 2018).

Em regiões afetadas pela escassez de água, torna-se necessário utilizar sistemas de irrigação, pois a produção se viabiliza mediante a aplicação artificial deste recurso. Em regiões afetadas em determinados períodos do ano, esta alternativa deve suprir a necessidade hídrica da cultura, complementando sua demanda e garantindo a produtividade (Ana, 2021).

As principais formas de irrigação do feijoeiro são por aspersão convencional, autopropelido e pivô central, sendo todos amplamente utilizados atualmente. O sistema por pivô central tem sido o mais apropriado para irrigar áreas individuais maiores, além de possibilitar bom controle da lâmina de água aplicada, com eficiência de aplicação variando de 75 a 90%. (Guimarães & Landau, 2020).

Segundo Oliveira (2020), existe grande viabilidade econômica em um sistema de irrigação por pivô central em pequenas áreas, pois aproximadamente em um prazo de cinco anos haverá o retorno do investimento.

O manejo da irrigação é de suma importância para o uso racional de água, dentre os métodos de estimativa de evapotranspiração destaca-se o padrão de Penman-Monteith FAO-56, devido a utilização de vários parâmetros para cálculo, logo apresenta um melhor desempenho quando aplicado em variados tipos de clima, sendo indicado para todas as regiões da Terra e o recomendado pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) como o modelo padrão para a estimativa da ETo e calibração de métodos empíricos (Allen *et al.*, 1998).

Com isso, é importante ressaltar que na grande maioria dos usuários da agricultura irrigada no Brasil não utiliza qualquer tipo de estratégia de uso e manejo na irrigação. Existem diversos métodos e estratégias para estimar a evapotranspiração. Logo, pode haver diferenças entre os mesmos, de modo a refletir em benefícios, como economia na utilização destes recursos.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de cinco modelos empíricos de estimativa de evapotranspiração de referência, parametrizados ao método padrão de Penman-Monteith FAO-56, em Aquidauana, Mato Grosso do Sul, Brasil.

## METODOLOGIA

Este trabalho foi conduzido na área experimental de irrigação da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), na Unidade Universitária de Aquidauana, MS, com coordenadas geográficas 20° 27'08'' Sul, 55° 40'15'' Oeste, altitude média de 191 m e segundo classificação climática Köppen-Geiger, o clima da região é Aw, classificado como tropical quente sub úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno. De acordo com Schiavo *et al.*, (2010), o solo da área foi identificado como Argissolo Vermelho distrófico.

Utilizou-se o cultivar BRS FC 402 de feijoeiro comum. A semeadura ocorreu no dia 08 de junho de 2020, juntamente com a adubação e inoculação por *Rhizobium tropici* Semia 4077 nas sementes. A emergência das plântulas ocorreu no dia 13 de junho. As aplicações de herbicidas ocorreram 20 dias após emergência (DAE), ambos seletivos, sendo o primeiro herbicida Flex®, recomendado para as folhas largas e o outro herbicida Fusilade 250EW®, recomendado para o controle de plantas daninhas de folhas finas. Realizou-se aplicação de inseticida Engeo Pleno S 30 DAE e a colheita foi realizada 84 DAE, com 90 dias de ciclo.

O delineamento foi realizado em blocos casualizados, onde as unidades experimentais foram compostas por 4 linhas de plantas com 5 m de comprimento, espaçadas de 0,45 m entre si, sendo que a

área útil composta pelas duas linhas centrais de plantas, com 4 m de comprimento, cada parcela corresponde a uma área de 3,6 m<sup>2</sup> na unidade experimental.

Os dados climatológicos foram coletados pela estação meteorológica da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, localizada próxima a área experimental. Os dados coletados na estação foram: temperatura (máxima, mínima e média), umidade relativa do ar, radiação solar global, precipitação, pressão atmosférica e de vapor d'água durante o período de cultivo do feijão de inverno.

Os balanços hídricos foram confeccionados da seguinte forma: a) com dados à campo, ou seja, os que foram utilizados ao longo do ciclo da cultura, para o manejo da irrigação; b) com métodos empíricos de estimativa da ETo, gerando assim simulações das lâminas de irrigação.

O sistema de irrigação utilizado foi o de pivô central em uma área de 0,9 ha com turno de rega variável, baseado no manejo de irrigação via clima pelo método padrão de Penman- Monteith FAO-56 (PM). Para as simulações de balanços hídricos da cultura e de irrigação, foram utilizados modelos empíricos de estimativa de evapotranspiração de referência (ETo), sendo eles: Hargreaves-Samani (HS), Priestley-Taylor (PT), Benevides-Lopes (BL), Hamon (HA) e Jensen-Haise (JH).

### Método de Penman-Monteith (PM)

É o método constituído como o padrão e recomendado pela FAO (Allen *et al.*, 1998).

$$ET_{o(PM)} = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left( \frac{900 U_2}{T_{med} + 273} \right) (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (1)$$

Em que:

ETo(PM) = Evapotranspiração de referência pelo método Penman-Monteith,

mm d<sup>-1</sup>; Δ = declinação da curva de saturação do vapor da água,

kPa °C<sup>-1</sup>; Rn = saldo de radiação,

MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>; G = fluxo de calor no solo,

MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>; γ = constante psicrométrica,

kPa°C<sup>-1</sup>; U2 = velocidade média do vento a 2 m acima da superfície do solo,

m s<sup>-1</sup>; Tmed = temperatura média do ar,

°C; es = pressão de saturação de vapor, kPa; ea = pressão atual de vapor, kPa.

### Método de Hargreaves-Samani (HS)

Este método foi desenvolvido em condições semiáridas, com dados obtidos por lisímetros como das temperaturas mínima, máxima e média do ar (Pereira *et al.*, 1997).

$$ET_{oHS} = 0,0135kt Ra (T_{max} - T_{min})^{0,5} (T_{med} + 17,8) \quad (2)$$

Em que:

$ET_o(HS)$  = evapotranspiração de referência segundo método Hargreaves-Samani,

mm d<sup>-1</sup>;  $Ra$  = radiação extraterrestre,

mm d<sup>-1</sup>;  $T_{máx}$  = temperatura máxima do ar,

°C;  $T_{mín}$  = temperatura mínima do ar,

°C;  $T_{med}$  = temperatura média do ar,

°C;  $kt$  = coeficiente empírico empregado em regiões continentais (0,162), adimensional.

### Método de Priestley & Taylor (PT)

Esta equação pode ser descrita como uma simplificação da equação padrão, caracterizada pela presença do termo energético corrigido por um coeficiente de ajuste empírico “ $\alpha$ ”, sendo este responsável pela energia demandada no processo de evapotranspiração do fator aerodinâmico (Pereira, *et al.*, 1997).

$$ET_{o(PT)} = \frac{\alpha \frac{(\Delta + \gamma)}{\gamma} (R_n - G)}{\lambda} \quad (3)$$

Em que:

$ET_o(PT)$  = evapotranspiração de referência segundo o método de Priestley & Taylor,

mm d<sup>-1</sup>;  $\alpha$  = parâmetro de Priestley & Taylor (1,26), adimensional;

$R_n$  = saldo de radiação,

MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>;  $\Delta$  = declinação da curva de saturação do vapor da água,

kPa °C<sup>-1</sup>;  $\gamma$  = constante psicrométrica,

kPa °C<sup>-1</sup>, adimensional;  $\lambda$  = fluxo de calor latente (2,45 MJ kg<sup>-1</sup>).

### Método de Benavides-Lopez (BL)

Este método se caracteriza pela utilização da temperatura média e umidade relativa do ar (Pereira *et al.*, 1997).

$$ET_{oBL} = 1,21 \cdot 10^{\left(\frac{7,45 T_{med}}{234,7 + T_{med}}\right)} (1 - 0,01 UR) + 0,21 T_{med} - 2,30 \quad (4)$$

Em que:

ET<sub>o</sub>(BL) = evapotranspiração de referência segundo o método de Benevides-Lopes,  
mm d<sup>-1</sup>; T<sub>med</sub> = Temperatura média do ar,  
°C; UR = Umidade relativa do ar, %.

### Método de Hamon (HA)

Esta metodologia foi desenvolvida em 1961 por Hamon, pois o mesmo observou que o método de Thornthwaite subestimava a evapotranspiração no inverno e superestimava no verão. O método incorpora a duração do dia e os efeitos da insolação, além de utilizar a temperatura do ar para estimar pressão de vapor de saturação (Pereira *et al.*, 1997):

$$ET_{o(HA)} = 0,55 \left( \frac{N}{12} \right)^2 \left( \frac{4,93 \exp(0,062 T_{med})}{100} \right) 25,4 \quad (5)$$

Em que:

ET<sub>o</sub>(HA) = evapotranspiração de referência segundo o método de Hamon,  
mm d<sup>-1</sup>; N = número de horas de brilho solar possíveis (fotoperíodo);  
T<sub>med</sub> = Temperatura média do ar, °C.

### Método de Jensen-Haise (JH)

Método desenvolvido que facilita a estimativa da evapotranspiração por não necessitar de muitas variáveis, necessita apenas dos dados de temperatura média diária e radiação solar global (Pereira *et al.*, 1997).

$$ET_{(JH)} = R_s(0,025T_{med} + 0,08) \quad (6)$$

Em que:

ET<sub>o</sub>(JH) = evapotranspiração de referência segundo o método de Jensen-Haise,  
mm d<sup>-1</sup>; R<sub>s</sub> = radiação solar global convertida em unidades de água evaporada,  
mm d<sup>-1</sup>; T<sub>med</sub> = temperatura diária média do ar, °C.

A ET da cultura (ET<sub>c</sub>) foi calculada por meio do produto entre a ET<sub>o</sub> e o coeficiente de cultura (K<sub>c</sub>). Em cada fase do ciclo do feijão de inverno foram utilizados os seguintes valores de K<sub>c</sub>: Fase 1

(inicial)  $K_c = 0,40$ ; Fase 2 (desenvolvimento da cultura)  $K_c$  entre  $0,40 - 1,15$ ; Fase 3 (Floração)  $K_c = 1,15$ ; Fase 4 (enchimento de vagens e maturação)  $K_c$  entre  $1,15 - 0,35$  (Allen *et al.*, 1998).

Foram calculadas a capacidade de água disponível, cujos incrementos estimados ao longo do ciclo da cultura e em função da simulação do aprofundamento do seu sistema radicular, bem como a disponibilidade real de água, adotando-se um fator de depleção de água no solo ( $f$ ) de 0,5 (Allen *et al.*, 1998).

O índice de satisfação das necessidades de água (ISNA) foi determinado mediante a utilização do balanço hídrico sequencial ao longo do ciclo da cultura (Equação 07).

$$ISNA = E_{Trj} / E_{Tci} \quad (7)$$

Em que:

( $E_{Trj}$ ) evapotranspiração real para o dia “ $i$ ”, mm;

( $E_{Tci}$ ) evapotranspiração da cultura para o dia “ $i$ ”, mm.

Com base no risco climático para a cultura, determinou-se três classes para se estabelecer o ISNA, onde: valores de  $ISNA > 0,60$  - a cultura estaria exposta a um baixo risco climático (favorável),  $0,50 < ISNA < 0,60$  - a cultura estaria exposta a um risco climático mediano (intermediário) e valores de  $ISNA < 0,50$  - a cultura estaria exposta a um elevado risco climático (desfavorável), o índice de penalização, que varia de zero a um e representa a fração entre a quantidade de água consumida pela planta e a quantidade que seria demandada para se garantir a máxima produtividade (Assad *et al.*, 1998).

Para exatidão dos métodos empíricos, foi realizada análise para determinação do índice de concordância ( $d$ , Equação 08), de Willmott *et al.* (1985); do índice de desempenho ( $c$ , Equação 09), de Camargo & Sentelhas (1997); da estimativa do erro padrão (EEP, Equação 10), descrita por Allen *et al.* (1998); do erro médio absoluto (“mean bias error” – MBE, Equação 11); e da raiz quadrada do quadrado médio do erro (“root mean square error” – RMSE, Equação 12), obtidos pelas equações:

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (8)$$

$$c = r \cdot d \quad (9)$$

$$EEP = \sqrt{\frac{\sum (O_i - P_i)^2}{n-1}} \quad (10)$$



$$MBE = \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) / n \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n} \quad (12)$$

Em que:

d – índice de concordância (adimensional),

P<sub>i</sub> – valores estimados pelos métodos (mm d<sup>-1</sup>),

O<sub>i</sub> – valores estimados pelo método padrão - PM (mm d<sup>-1</sup>),

$\bar{O}$  – média dos valores estimados pelo método padrão (mm d<sup>-1</sup>),

c – índice de desempenho (adimensional),

r – coeficiente de correlação (adimensional),

EEP – estimativa do erro padrão (mm d<sup>-1</sup>),

n – número de observações.

A análise de desempenho foi feita comparando-se os valores de ETo, estimados pelos cinco modelos empíricos, com o de PM. Sendo que a análise de regressão linear foi para obtenção dos coeficientes da equação ( $Y = ax + b$ ) e dos coeficientes de correlação (R) e determinação (R<sup>2</sup>).

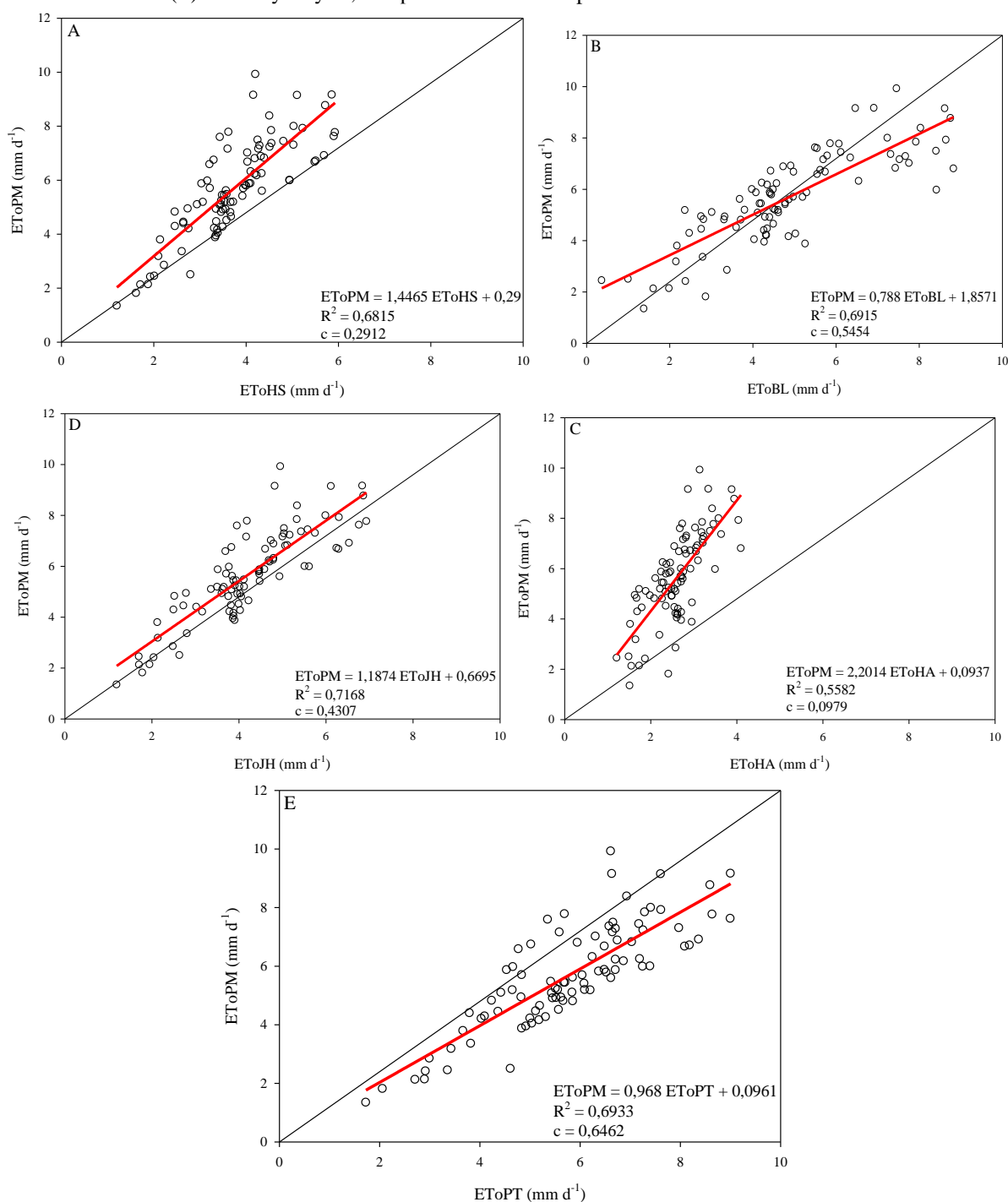
A interpretação do índice “c” foi efetivada conforme estabelece Camargo e Sentelhas (1997): “ótimo” ( $c \geq 0,85$ ); “muito bom” ( $0,76 \leq c \leq 0,84$ ); “bom” ( $0,66 \leq c \leq 0,75$ ); “mediano” ( $0,61 \leq c \leq 0,65$ ); “sofrível” ( $0,51 \leq c \leq 0,60$ ); “mau” ( $0,41 \leq c \leq 0,50$ ); e “péssimo” ( $c \leq 0,40$ ). Todas as análises foram realizadas no *software* Microsoft Excel.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os índices de desempenho satisfatório (c) variam de 0,098 a 0,646 (Figura 1) dos métodos avaliados comparados com o padrão, também pode-se visualizar as funções do método padrão Penman-Monteith-FAO 56 (EToPM).

Pode-se visualizar as funções em relação aos métodos empíricos de estimativa de evapotranspiração de referência (ETo), com valores dos coeficientes angulares (a), lineares (b) e determinação (R<sup>2</sup>). No qual verifica-se que apenas os métodos de Jensen- Haise (EToJH), Hamon (EToHA) e Hargreaves-Samani (EToHS) apresentaram coeficiente angular acima de 1.

Figura 1. Correlação entre os modelos empíricos: (A) Hargreaves-Samani, (B) Benevides-Lopez, (C) Hamon, (D) Jensen-Haise e (E) Priestley-Taylor, comparados ao modelo padrão de Penman-Monteith FAO-56.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Mediante a comparação dos métodos avaliados com o padrão (Figura 1), pode-se observar que o método que apresentou melhor desempenho foi o de Priestley-Taylor (ET<sub>o</sub>PT) com valor do índice de desempenho “c” classificado como mediano conforme literatura de Camargo & Sentelhas (1997), apresentando coeficiente de determinação “R<sup>2</sup>” de 0,693 e índice de desempenho de 0,646.

Na sequência, os métodos que apresentaram os índices de desempenho em ordem decrescente foram EToBL, EToJH, EToHS e EToHA com valores de desempenho de 0,545 (suficiente), 0,431 (mau), 0,291 (péssimo) e 0,098 (péssimo), respectivamente. Com estes resultados, pode-se inferir que o método (ETOPT) se destacou diante dos demais, porém ele não apresentou índice de desempenho muito satisfatório, não ultrapassando o valor de 0,65 (Camargo & Sentelhas, 1997).

A maior inclinação das retas dos modelos lineares foi observada no modelo de EToHA com coeficiente angular de 2,2014 e  $R^2$  de 0,5582 (Figura 1). No entanto, esses valores, apesar de serem altos, não predizem um bom resultado do conjunto do método, que deve ser interpretado conforme o índice de concordância (d), que expressa uma medida de exatidão do método; o coeficiente de correlação (r), que expressa uma medida da precisão do método; e o índice “c”, que expressa um desempenho conjunto do método (Camargo & Sentelhas, 1997).

No trabalho de Moura *et al* (2013), dentre os métodos avaliados, os métodos que são baseados na temperatura do ar, dentre eles Hargreaves-Samani, apresentou desempenho “ótimo” nas escalas quinzenal a mensal. Dos métodos baseados na radiação solar, destaca-se o melhor desempenho para o método da Radiação Solar, seguido Jensen-Haise. Outros métodos avaliados baseados em modelagem estatística não apresentaram muita eficiência, estimando ETo com baixa precisão, resultando em baixos coeficientes de determinação e desempenho.

Segundo o estudo de Lima *et al* (2016), a equação de Hargreaves-Samani, se mostrou uma melhor alternativa para se estimar a ETo em locais com disponibilidade de dados limitada, porém em seu trabalho superestimou o método padrão Penman-Monteith (PM) em todos meses de avaliação.

De acordo com o trabalho de Cunha *et al* (2013) entre os melhores métodos para estimativa de ETo, Hargreaves-Samani e Jensen-Haise foram conceituados como os últimos indicados para a região de Chapadão do Sul, MS e os métodos Priestley-Taylor e Hamon não devem ser utilizados para a estimativa da evapotranspiração de referência nesta região.

Os índices de desempenho ISNA podem variar de 0 a 1, indicando períodos de suprimento ou não da água demandada pela cultura, é bastante utilizado em trabalhos de zoneamento de risco e determinação de épocas de semeadura segundo Farias *et al.* (2001), na (Tabela 1) pode-se visualizar esses índices no ciclo do feijão.

No consórcio realizado no trabalho de Andrade Júnior *et al.* (2009) das culturas de algodão em caroço e grãos de feijão-caupi, obteve-se que é mais vantajoso sob condições de baixa disponibilidade hídrica no solo, pois apresentou ISNA de 0,617, indicando maior resistência ao estresse hídrico.

No estágio fenológico inicial (F1), a demanda hídrica é menor, sendo mais tolerante ao estresse nessa fase, foi constatado que nesta fase todos os métodos ficaram abaixo do recomendado com o índice menor que 0,50 se caracterizando como de alto risco climático.

Na fase de desenvolvimento da cultura (F2), a demanda hídrica ganha maior relevância devido ser a fase de desenvolvimento vegetativo da cultura, porém dentre todos os métodos, apenas (PT) e o modelo padrão foram classificados como de risco mediano, os demais foram identificados como de baixo risco.

Tabela 1. Índices de satisfação das necessidades da água (ISNA) e evapotranspiração acumulada da cultura (ET<sub>c</sub>acumulada) estimada por modelos empíricos, para um balanço hídrico da cultura (sem irrigação), no ano de 2020, na cultura do feijoeiro de inverno, em Aquidauana-MS.

| Modelos   | ISNA |      |      |      | ET <sub>c</sub> acumulada (mm) |       |        |       |
|-----------|------|------|------|------|--------------------------------|-------|--------|-------|
|           | F1   | F2   | F3   | F4   | F1                             | F2    | F3     | F4    |
| <b>PM</b> | 0,28 | 0,58 | 0,16 | 0,66 | 24,92                          | 67,36 | 251,55 | 66,47 |
| <b>HS</b> | 0,32 | 0,69 | 0,25 | 0,77 | 14,87                          | 45,24 | 158,78 | 47,83 |
| <b>BL</b> | 0,28 | 0,62 | 0,20 | 0,72 | 20,80                          | 52,66 | 222,23 | 53,54 |
| <b>HA</b> | 0,35 | 0,74 | 0,35 | 0,84 | 11,15                          | 32,76 | 114,62 | 31,23 |
| <b>JH</b> | 0,30 | 0,66 | 0,22 | 0,75 | 16,91                          | 49,49 | 179,94 | 53,79 |
| <b>PT</b> | 0,27 | 0,57 | 0,16 | 0,63 | 23,23                          | 71,92 | 244,08 | 72,22 |

F1 - Fase inicial; F2 - Fase de desenvolvimento da cultura; F3 - Fase de florescimento; F4 - Fase de enchimento de vagens e maturação. PM – Penman-Monteith FAO-56; HS – Hargreaves-Samani; BL – Benevides-Lopez; HA – Hamon; JH – Jensen-Haise; PT – Priestley-Taylor.

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A fase (F3) é onde ocorre o florescimento, logo é importante a água nesta etapa. Porém, todos os métodos de ETO ficaram com classificação de elevado risco climático. E na fase (F4), como se trata de etapa de enchimento de grãos é extremamente dependente deste recurso para realização e conclusão deste processo, logo o suprimento de demanda hídrica nesta etapa é fundamental,

Na fase final (F4) foi constatou-se que em todos os métodos o índice de Satisfação de Necessidade de água (ISNA) obtiveram um desempenho de baixo risco climático para a cultura do feijoeiro. Nesta fase também ocorre a maturação, estágio que a demanda hídrica cai consideravelmente.

No trabalho realizado pela Embrapa Meio-Norte, foram avaliados cultivo de feijoeiro e mamoneira. Obteve-se que em cultivo de sistema solteiro houve maiores índices de ISNA para o feijão-caupi e para a mamoneira. Similarmente, à medida que aumentou os níveis de deficiência hídrica no solo, apresentou-se uma tendência de queda nos valores de ISNA e de rendimentos de grãos e de bagas e no consórcio observou-se uma maior demanda evapotranspirativa em relação ao cultivo solteiro (Andrade Júnior *et al.*, 2008).

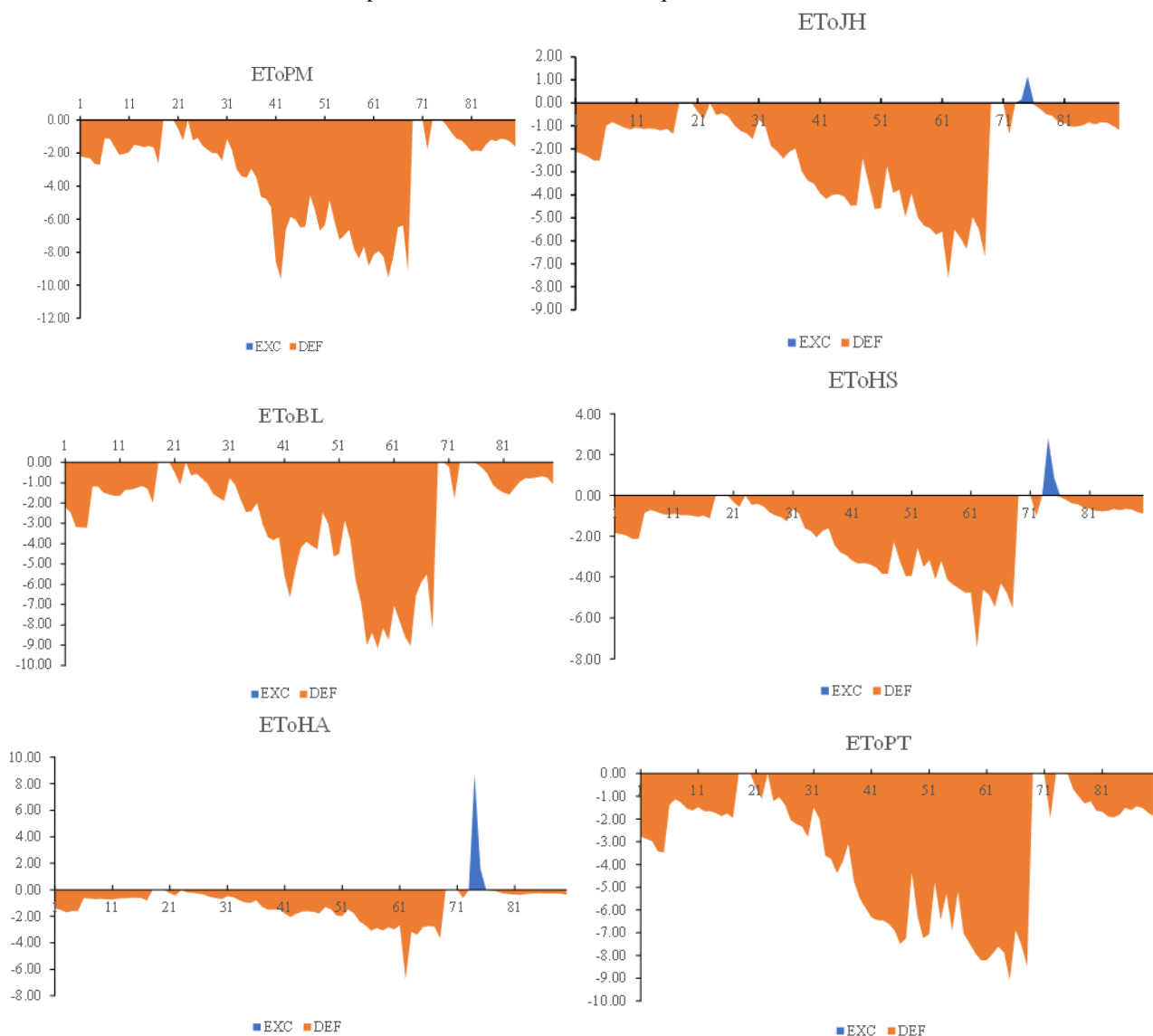
Semelhantemente a Bispo *et al.* (2017), o ISNA nas fases de brotação, emergência e maturação, apresentou baixo riscos de perdas de produtividade por deficiência hídrica, ou seja, a cultura estava sob uma condição de risco mínimo correspondentes às essas duas fases.

Em relação a ET<sub>c</sub>acumulada, o método PT apresentou um resultado de 411,45 mm no final do ciclo da cultura, sendo muito próximo ao padrão PM que teve uma ET<sub>c</sub> de 410,30 mm. O método de BL foi 14,9% inferior ao padrão com 349,23 mm, todos os outros métodos obtiveram valores menores ao

padrão, sendo o que apresentou a maior diferença foi o de HA que apresentou 189,76 mm, uma ETC 53,75% menor que o padrão Penman-Monteith FAO- 56.

Segundo Pereira (2005), o balanço hídrico climatológico (BHC) é uma ferramenta desenvolvida para determinar o regime hídrico de um determinado local. Para sua utilização, necessita-se de alguns parâmetros, como capacidade de água disponível (CAD), dados pluviométricos locais e evapotranspiração potencial. Essas informações permitem fazer a estimativa da evapotranspiração real, assim como deficiência ou o excedente hídrico, e o total de água armazenada no solo.

Figura 2. Balanço hídrico ao longo do ciclo da cultura do feijoeiro de inverno, utilizando diferentes modelos empíricos para estimativa da ETo, em Aquidauana-MS.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

No balanço hídrico, pode-se analisar (Figura 2) as deficiências e excessos hídricos ocorridos nos métodos empíricos (ETOB, ETOHA, ETOBL, ETOHA, ETOJH e ETOPT). Desta forma, foi

observado que os métodos (ET<sub>0</sub>JH, ET<sub>0</sub>HA, ET<sub>0</sub>HS) foram os que apresentaram excessos hídricos na cultura, sendo que todos ocorreram na mesma época no ciclo da cultura.

Constatou-se que o maior excesso ocorreu no modelo (HA). Os métodos (ET<sub>0</sub>PT, ET<sub>0</sub>BL) juntamente com o modelo padrão PM não apresentaram excessos, as deficiências mais consideráveis foram observadas nos métodos ET<sub>0</sub>BL, ET<sub>0</sub>PM e ET<sub>0</sub>PT seguidas por ET<sub>0</sub>JH. Os métodos ET<sub>0</sub>HS foram o que apresentaram as menores deficiências nos balanços hídricos.

Pelos resultados obtidos no trabalho de Lima *et al* (2006), constatou-se que o delineamento do balanço hídrico correto do ciclo só pode ser efetuado através da determinação da evapotranspiração (ET), em sua pesquisa relacionada ao feijoeiro, obteve-se os seguintes índices, ET média diária de 4,12 mm, sendo que o maior consumo ocorreu na fase reprodutiva, com valor médio de 3,65 mm d<sup>-1</sup> e um total de 383,02 mm.

Pode-se observar as laminas irrigadas e total (Tabela 2), sendo que a lamina total é caracterizada pelo total da quantidade irrigada adicionada a precipitação que ocorreu durante o ciclo.

Tabela 2. Lâmina de irrigação (LI) e lâmina total (LT) aplicadas durante o ciclo do feijão de inverno, utilizando dados coletados à campo (PM) e simulados (HS, BL, HA, JH e PT), safra 2020, em Aquidauana, MS

| Fases | PM     |        | HS     |        | BL     |        | HA     |        | JH     |        | PT     |        |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       | LI     | LT     | LI     | LT     | LI     | LT     | LI     | LT     | LI     | LT     | LI     | LT     |
| F1    | 35,50  | 35,50  | 20,22  | 20,22  | 29,80  | 29,80  | 20,69  | 20,69  | 18,96  | 18,96  | 30,23  | 30,23  |
| F2    | 69,41  | 108,55 | 29,52  | 68,66  | 29,90  | 69,04  | 32,08  | 71,22  | 46,43  | 85,57  | 57,60  | 96,74  |
| F3    | 202,62 | 255,54 | 163,28 | 216,20 | 201,75 | 254,67 | 121,76 | 174,68 | 207,40 | 260,32 | 246,70 | 299,62 |
| F4    | 28,29  | 58,97  | 0,00   | 30,68  | 0,00   | 30,68  | 0,00   | 30,68  | 0,00   | 30,68  | 0,00   | 30,68  |
| Total | 335,82 | 458,56 | 213,02 | 335,76 | 261,45 | 384,19 | 174,53 | 297,27 | 272,79 | 395,53 | 334,53 | 457,27 |

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

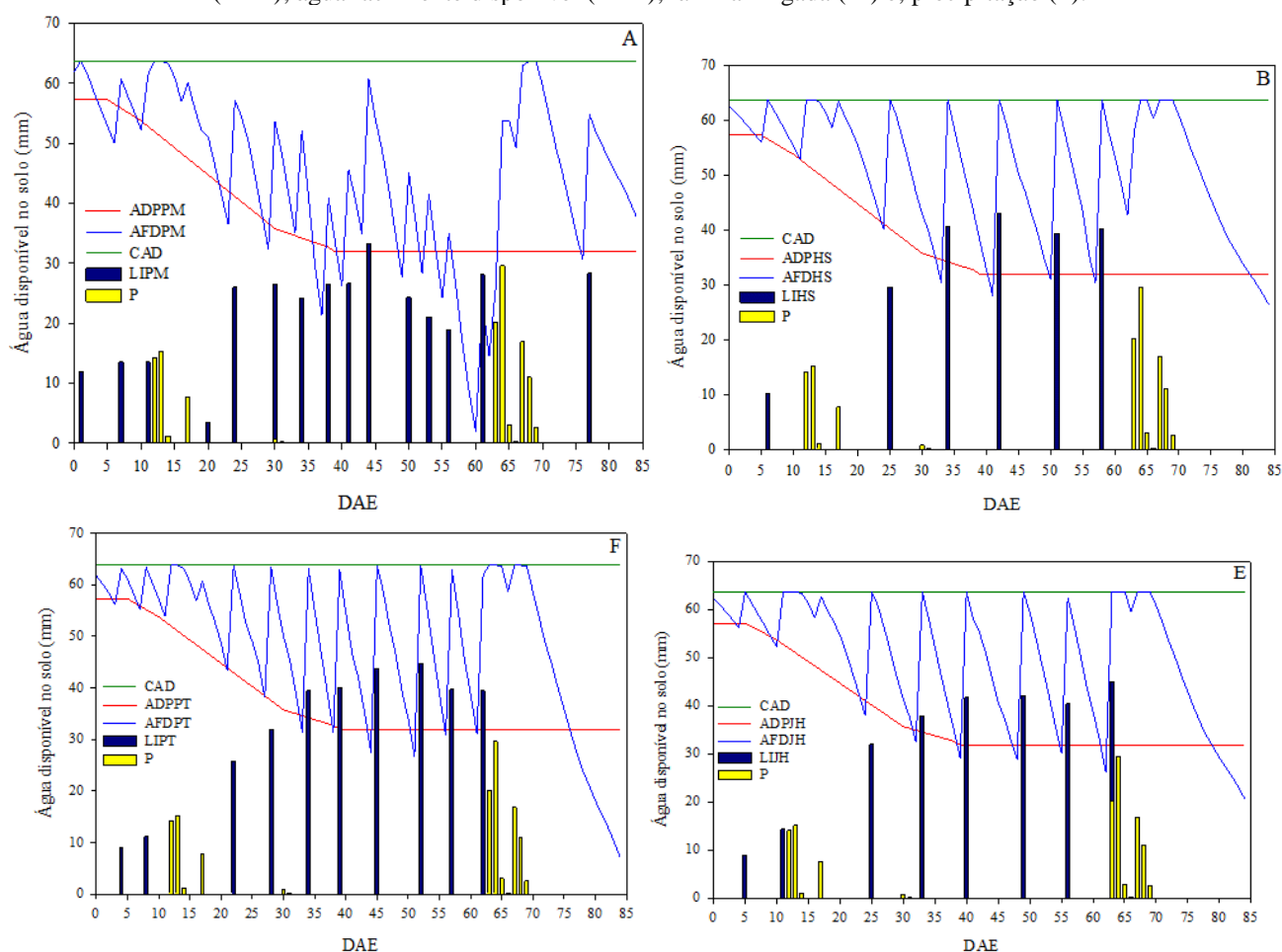
Com relação as laminas nas fases fenológicas (Tabela 2), constatou-se que, na fase F2, o modelo padrão PM contabilizou lâmina de irrigação (LI) de 69,41 mm, com resultado de aproximadamente 57% superior ao resultado obtido pelo modelo (HS) 29,52 mm. O comparando com os métodos em F2, todos o subestimaram, sendo o que mais se aproximou foi o modelo de (PT) com lamina de (57,60 mm) sendo aproximadamente 17% inferior ao modelo padrão.

Na fase F3, PT apresentou BL uma LI de 201,75 mm, valor muito próximo ao PM 202,62 mm, simultaneamente JH também apresentou LI semelhante ao modelo padrão 207,4 mm. HS e HA obtiveram valores inferiores ao modelo padrão, 163,28 e 121,76 mm respectivamente. O método de PT foi o único que apresentou LI superior ao modelo padrão, com lamina de 246,70mm.

Em F4, por ser o período final do ciclo da cultura, ocorre a diminuição das laminas irrigadas, devido a diminuição da exigência hídrica. O modelo padrão proporcionou uma LI de (28,29 mm), os demais modelos HS, BL, HA, HJ e PT obtiveram LI igual a zero.

A disponibilidade de água para a cultura (Figura 3), durante todo seu ciclo, em dias, demonstrando como ocorreu a perda de água e a reposição feita pela irrigação, utilizando todos os métodos analisados.

Figura 3. Balanço hídrico de irrigação, utilizando os modelos empíricos de (A) Penman-Monteith FAO-56; (B) Hargreaves-Samani; (C) Benevides-Lopez; (D) Hamon; (E) Jensen-Haise e; (F) Priestley-Taylor, para a estimativa da ETo, na cultura do feijoeiro de inverno, em Aquidauana-MS. Capacidade de água disponível (CAD); água disponível para Planta (ADP); água facilmente disponível (AFD); lâmina irrigada (LI) e; precipitação (P).



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

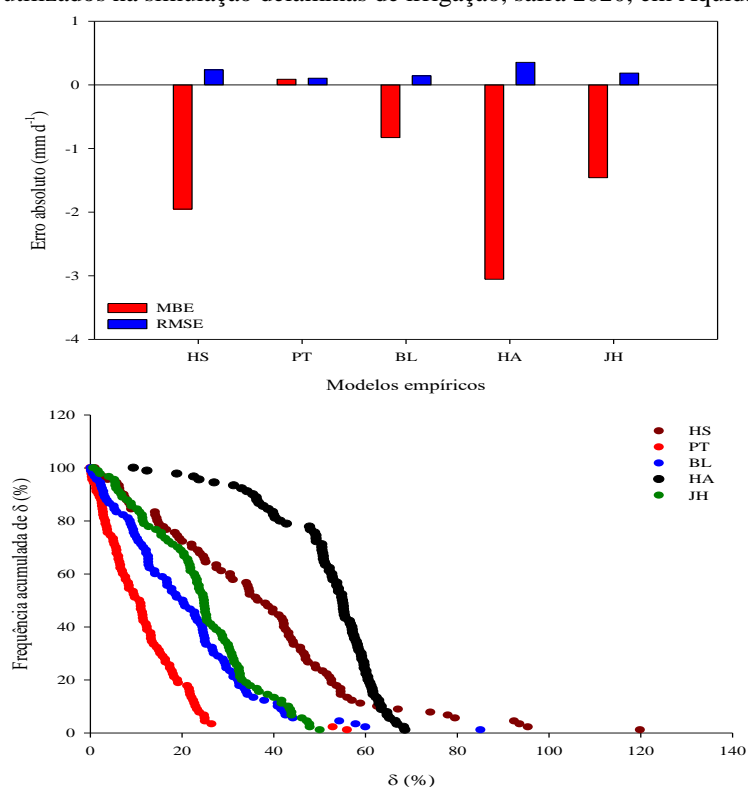
No estudo realizado por Silva *et al* (2016) foi apresentado um consumo hídrico na cultura do feijão caupi irrigado por aspersão que resultou em uma lâmina de 463,7 mm no final do experimento. Os resultados evidenciam que a cultura apresentou maior consumo hídrico na fase de desenvolvimento vegetativo e menor na fase de germinação, sendo de 159 mm, enquanto que para todo o ciclo o foi de 400,1 mm.

Com relação ao balanço hídrico, o Limite inferior da AFD (água facilmente disponível) pode ser visualizado pela linha vermelha nos gráficos da Figura 3, em todos os métodos pode-se observar que a água disponível em alguns momentos ultrapassou essa margem devido ao manejo da irrigação

priorizar a precipitação prevista antecipadamente. A lamina irrigada foi de 335,82 mm para o método padrão e aproximadamente 334,53 mm para o método Priestley-Taylor, uma diferença mínima entre ambos.

A complementação de irrigação variou conforme o método analisado, mas pode-se frisar que o método que demandou a maior lâmina foi o padrão, juntamente com Priestley-Taylor não havendo diferença entre ambos.

Figura 4. Erro médio absoluto, raiz quadrada do quadrado médio do erro e probabilidade do erro ( $\delta$ ), nos métodos empíricos utilizados na simulação de lâminas de irrigação, safra 2020, em Aquidauana, MS.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

O MBE representou o desvio das médias e fornece informações relevantes sobre o desempenho dos modelos utilizados neste trabalho. Pode-se observar que PT foi o único modelo que superestimou o método padrão PM, enquanto que HS, BL, HA e JH subestimaram o padrão. Ele obteve menores erros dentre os avaliados, desta forma comprovando o seu melhor ajuste ao método padrão. Em relação ao RMSE, quanto menores forem as probabilidades de erro ( $\delta$ ), melhor será o ajuste do método em relação ao método padrão. Desta forma, o método de PT apresentou melhores resultados perante aos demais métodos avaliados no ciclo do cultivo.

Os parâmetros analisados por MBE e RMSE comprovam o melhor desempenho de PT, em que a lâmina total (LT) deste foi apenas 0,28% inferior ao padrão PM, sendo de 1,29 mm de diferença



de lâmina bruta ao término do ciclo do feijoeiro. Logo, praticamente sem diferença entre ambos modelos, sendo a mesma mínima.

Conforme observa-se a probabilidade do erro no modelo PT apresenta o melhor dentre os resultados (Figura 4) dos modelos avaliados para o feijoeiro em 2020.

## CONCLUSÃO

O método Priestley Taylor apresenta o melhor desempenho, sendo o mais indicado para o manejo de irrigação na cultura do feijoeiro de inverno em Aquidauana-MS.

Pela observação dos parâmetros analisados, pode-se também concluir que os métodos que são constituídos por fatores como a radiação solar possuem uma melhor estimativa da evapotranspiração do que aqueles que utilizam somente temperatura do ar ou saturação.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. (Brasil). Atlas irrigação-Uso da agricultura irrigada. 2. ed. rev. e atual. Brasília-DF: ANA, 2021. 11 p. Disponível em: <[https://www.gov.br/ana/pt-br/centrais-de-conteudos/publicacoes/Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada.pdf](https://www.gov.br/ana/pt-br/centrais-de-conteudos/publicacoes/Atlas_irrigação: uso da água na agricultura irrigada.pdf)>. Acesso em: 20 out. 2021.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMIT, M.. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 300 p. 1998. (FAO. **Irrigation and Drainage Paper**, 56).
- ANDRADE JÚNIOR. A.; OLIVEIRA. S. R. M.; RIBEIRO. V. Q.; RIBEIRO. J. L.; MASCHIO. R.. **Índice de satisfação da necessidade de água do algodoeiro herbáceo em sistemas monocultivo e consorciado com feijão-caupi**, XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Belo Horizonte – MG, 6f, 2009.
- ANDRADE JÚNIOR. A.S.; MELO. F. B.; MASCHIO. R.; RIBEIRO. V. Q.; MORAIS. E. L. C. Índice de satisfação da necessidade de água da mamoneira em monocultivo e consorciada com feijão-caupi. Embrapa Meio-Norte-Artigo em anais de congresso (ALICE). CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, Salvador, 2008.
- ASSAD, E. D.; SANO, E. E.; BEZERRA, H. D. S.; SILVA, S. D.; LOBATO, E. J. E. Uso de modelos numéricos de terreno na espacialização de épocas de plantio. **Sistemas de Informações Geográficas. Aplicações na agricultura. Brasília: EMBRAPA-SPI/Embrapa Cerrados**, 1998. p.311-327.
- 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, Edição Especial, IRRIGA & INOVAGRI**, p. 94-101, 2017.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. (Brasil). Grãos: safra 2021/22. **Boletim de Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília-DF, v. 9, n. 3, p. 49, 2021. Disponível

em: <file:///E-book\_BoletimZdeZSafrasZ-Z3oZlevantamento- compactado.pdf >. Acesso em: 10 jan. 2022.

CUNHA, F. F.; MAGALHÃES, F. F.; CASTRO, M. A. Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Chapadão do Sul-MS. **Revista Engenharia na Agricultura-Reveng**, v. 21, n. 2, p. 159-172, 2013.

DAL MORO, M. BARCELOS. Q. L. ARANTES. K. R. **Desempenho de cultivares de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) sobdiferentes manejos de irrigação**. 2018. 40f. Monografia de (graduação). Instituto e ciências agrárias e ambientais, Sinop; MT. UFMT, 2018.

FARIAS. J. R. B.; ASSAD. E. D.; ALMEIDA. I. R.; EVANGELISTA. B.A.; LAZZAROTTO. C.; NEUMAIER.; NEPOMUCENO. A. . Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001.

FARINASSI, L. G. **Necessidades hídricas do feijoeiro irrigado no noroeste paulista**. 2018. 108f. Dissertação de (Mestrado), area de conhecimento : Manejo do solo e agua, Ilha solteira; SP, 2018.

FRIZZONE. J. A.; REZENDE. R.; CAMARGO. A. P.; COLOMBO. A.; *et al.* **Irrigação por aspersão: sistema pivô central**. Maringá-PR: EDUEM, 2018. 355 p.

GUIMARAES, D. P.; LANDAU, E. C. **Georreferenciamento dos pivôs centrais de irrigação no Brasil: ano base 2020**. Embrapa Milho e Sorgo-Boletim de Pesquisa e desenvolvimento, 63p, 2020.

LIMA JUNIOR. J. C.; ARRAES. F. D. D.; OLIVEIRA. J. B.; NASCIMENTO. F. A. L.; MACÊDO. K. G. Parametrização da equação de Hargreaves e Samani para estimativa da evapotranspiração de referência no Estado do Ceará, Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, p. 447-454, 2016.

LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOARES, W. A.; SOUZA, E. S.; LIRA, C. B. O. Balanço hídrico no solo cultivado com feijão caupi. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 1, n. 1, p. 89-95, 2006.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. Irrigação: princípios e métodos. atual. e ampl. **Viçosa**, MG: UFV. 2009.

MOURA. A. R. C.; MONTENEGRO. S. G. L.; ANTONINO. A. C. D.; AZEVEDO. J. R. G.; SILVA. B. B.; OLIVEIRA. L. M. Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no estado de Pernambuco-Brasil. **Revista Brasileira de meteorologia**, v. 28, p. 181-191, 2013.

OLIVEIRA A. P. Análise da Precipitação no Núcleo Regional de Londrina e a Produtividade do Feijão – Entre 2009 a 2018. 2020. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020

OLIVEIRA, E. R.; SILVA, T. C.; RAMOS, R. F. O. Evapotranspiração de referência em Januária-MG pelos métodos tanque classe “A” eHargreaves-Samani. *Colloquium Agrariae*, v. 16, n.1, p. 48-54, 2020.

OLIVEIRA, M. D. C., de OLIVEIRA, L. F. C., WENDLAND, A., GUIMARÃES, C., QUINTELA, E., BARBOSA, F. R.; CARVALHO, M. C. S.; LOBO JUNIOR, M.; SILVEIRA, P. M. (2018). Conhecendo a fenologia do feijoeiro e seus aspectos fitotécnicos. Embrapa Arroz e Feijão-Livro técnico (INFOTECA-E). Brasília, DF: Embrapa, 2018. 2.ed.rev.ampl. 61 p. 2018

OLIVEIRA. J. T.; OLIVEIRA. R. M.; OLIVEIRA. R. A.; OLIVEIRA. E.M.; BOTELHO. M. E.; FERREIRA. P. M. O. Viabilidade econômica de irrigação por pivô central em pequenas áreas

cultivadas com feijão, soja e milho. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 14, n. 4, p. 4171-4179, 2020.

PEREIRA, A. R. Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. **Bragantia**, v. 64, n. 2, p. 311-313, 2005.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 183p. 1997.

SCHIAVO, J. A.; PEREIRA, M. G.; MIRANDA, L. P. M.; DIAS NETO, A. H.; FONTANA, A. A. Caracterização e classificação de solos desenvolvidos de arenitos da formação Aquidauana-MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 34, n. 3, p. 881-889, 2010.

SILVA, V. P. R.; SILVA, B. B.; BEZERRA, J. R. C.; ALMEIDA, R. S. R. Consumo hídrico e viabilidade econômica da cultura do feijão caupi cultivado em clima semiárido. **Irriga**, v. 21, n. 4, p. 662-672, 201.