

## Métodos empíricos para estimativa de evapotranspiração de referência nos municípios lindeiros ao lago de Itaipu

### Performance of empirical methods for estimation of reference evapotranspiration in the cities surround the Itaipu lake

#### RESUMO

Evapotranspiração é a perda de água que ocorre em superfícies evaporantes como o solo e as plantas, sendo uma variável fundamental no planejamento econômico e ambiental, já que possibilita a determinação de balanço hídrico, zoneamento agroclimático, gerenciamento de recursos hídricos e racionalização do uso da água para irrigação. Devido à dificuldade para a obtenção de dados meteorológicos na região oeste do Paraná, uma vez que a região apresenta apenas duas estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), esta pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho de métodos empíricos para a estimativa de evapotranspiração de referência que necessitem de poucos dados de entrada. Para isso, foram avaliados os seguintes métodos: Hargreaves-Samani, Camargo, Thornthwaite-Camargo, Penman Monteith com dados faltantes e Jensen-Haise. Estes métodos foram comparados com o desempenho do método de Penman-Monteith, recomendado pela FAO56. O método de Penman-Monteith com dados incompletos apresentou melhor desempenho, sendo recomendado para estimativas de evapotranspiração de referência nos municípios lindeiros ao lago de Itaipu.

**PALAVRAS-CHAVE:** Evaporação. Oeste do Paraná. Recursos hídricos.

#### ABSTRACT

Evapotranspiration is the loss of water that occurs on evaporating surfaces such as soil and plants, being a fundamental variable in economic and environmental planning, since it allows the determination of water balance, agroclimatic zoning, management of water resources and rationalization of the use of water for irrigation. Due to the difficulty in obtaining meteorological data in the western region of Paraná, since the region has only two meteorological stations from the National Institute of Meteorology (INMET), this research aimed to evaluate the performance of empirical methods to estimate evapotranspiration reference points that require little input data. For this, the following methods were evaluated: Hargreaves-Samani, Camargo, Thornthwaite-Camargo, Penman Monteith with missing data and Jensen-Haise. These methods were compared with the performance of the Penman-Monteith method, recommended by FAO56. The Penman-Monteith method with incomplete data showed better performance, being recommended for reference evapotranspiration estimates in the municipalities surround the Itaipu lake.

**KEYWORDS:** Evaporation. West of Paraná. Water resources.

**Tharsos Hister Giovanela**  
[tharsoshg@gmail.com](mailto:tharsoshg@gmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Santa Helena, Paraná, Brasil

**Fabício Correia de Oliveira**  
[fcoliveira@utfpr.edu.br](mailto:fcoliveira@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Santa Helena, Paraná, Brasil

**Vinicius Amadeu Stuani Pereira**  
[vpereira@utfpr.edu.br](mailto:vpereira@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Santa Helena, Paraná, Brasil

**Anderson Sandro da Rocha**  
[andersonrocha@utfpr.edu.br](mailto:andersonrocha@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Santa Helena, Paraná, Brasil

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autorial:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Evapotranspiração é o processo de perda de água de superfícies evaporantes para a atmosfera. O termo agrupa dois processos, evaporação e transpiração, representando a passagem da água do estado líquido para o estado de vapor em superfícies inanimadas e vivas, respectivamente (REICHARDT & TIMM, 2012). A evapotranspiração em condições padronizadas é chamada evapotranspiração de referência ou evapotranspiração potencial (ET<sub>o</sub>) e pode ser utilizada para obter outras formas de evapotranspiração, como a evapotranspiração de cultura e evapotranspiração real (ALLEN et al., 2015).

A evapotranspiração de referência é uma variável fundamental na gestão de recursos hídricos em culturas irrigadas, pois quando multiplicada pelo coeficiente de cultura (K<sub>c</sub>), obtém-se a evapotranspiração de cultura, que representa a necessidade hídrica de uma cultura em cada fase do seu ciclo (ALLEN et al., 1998). Além disso, ela possui diversas aplicações nas áreas agrícolas e ambientais, podendo ser utilizada para balanços hídricos, caracterização climática, previsões de produtividade e pode demonstrar a demanda hídrica da atmosfera local (ALLEN et al., 1998; SILVA et al., 2019; CECÍLIO et al., 2012).

A determinação da ET<sub>o</sub> pode ser feita diretamente por meio de lisímetros de drenagem ou de pesagem. Porém, lisímetros possuem custo de manutenção muito elevados, o que impede de serem amplamente utilizados (VALIPOUR, 2015; LIBARDI, 2018), sendo utilizado por universidade e instituições de pesquisa. A determinação da evapotranspiração de forma indireta é feita por meio de modelos matemáticos, chamados métodos empíricos, que se baseiam em uma ou mais variáveis meteorológicas para estimar os valores da ET<sub>o</sub> (VALIPOUR, 2015).

Os métodos empíricos são uma alternativa de fácil aplicação que pode apresentar resultados satisfatórios. O modelo de Penman-Monteith se tornou o método padrão para as estimativas de ET<sub>o</sub> a partir do Boletim 56 da FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*), pois apresenta um desempenho muito bom na maior parte dos climas (ALLEN et al., 1998). Entretanto, a utilização do Penman-Monteith é limitada devido ao grande número de variáveis meteorológicas necessárias para que a estimativa seja feita (DROOGERS & ALLEN, 2002).

Existem diversos métodos para estimativa de evapotranspiração alternativos ao Penman-Monteith, que utilizam menos dados de entrada ou dados mais fáceis de obter. Porém, estes modelos matemáticos foram desenvolvidos para regiões específicas, necessitando validação para serem aplicados em outras regiões. A validação é realizada por meio de análises de desempenho utilizando o método Penman-Monteith como referência, sendo realizadas por meio de regressões lineares e métodos estatísticos (ČADRO et al., 2019).

Quando o lago de Itaipu foi formado, 15 municípios brasileiros tiveram terras alagadas e posteriormente vieram a ser conhecidos como municípios lindeiros ao lago de Itaipu. A Itaipu Binacional faz um repasse mensal de Royalties a esses municípios, que é relativo à área alagada. Além disso, a Itaipu Binacional tem um comprometimento com o desenvolvimento sustentável na região, incentivando ações socioambientais que preservam a fauna, flora e os recursos naturais. As ações se baseiam na segurança hídrica e no manejo integrado de água e solo (ROCHA & BADE, 2018; ROESLER, 1996). Assim, a definição do melhor método empírico para estimativa de evapotranspiração de referência nos municípios

lindeiros é essencial na aplicação das práticas de desenvolvimento sustentável incentivadas pela Itaipu Binacional.

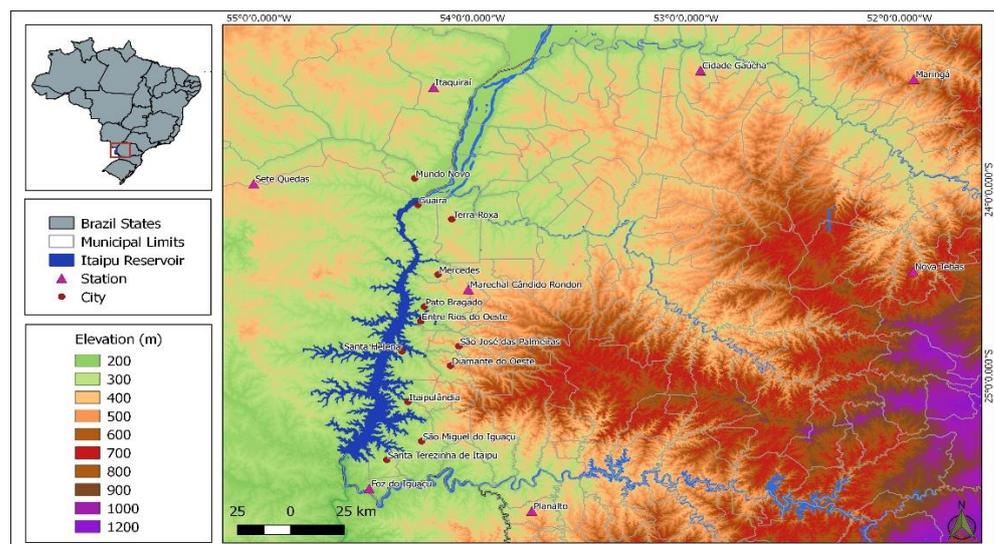
Devido à dificuldade para a obtenção de dados meteorológicos na região oeste do Paraná, uma vez que a região apresenta apenas duas estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), esta pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho de métodos empíricos para a estimativa de evapotranspiração de referência que necessitem de poucos dados de entrada, considerando a região dos municípios lindeiros ao lago de Itaipu.

## MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada na região brasileira dos municípios lindeiros ao lago de Itaipu. Foram analisados 15 municípios, sendo 14 no estado do Paraná e um no estado de Mato Grosso do Sul. Todos os municípios possuem clima subtropical úmido, classificado segundo Köppen como Cfa. A precipitação média anual para 12 dos 15 municípios é em torno de 1600 mm a 1800 mm, exceto os municípios de Terra Roxa, Guaíra e Mundo Novo que apresentam precipitação entre 1400 mm a 1600 mm. As chuvas apresentam médias acima dos 100 mm em três estações do ano, diminuindo no inverno. As temperaturas médias anuais ficam entre 21 °C e 24 °C e a umidade relativa média anual fica sempre acima dos 70% (NITSCHKE et al., 2019). A altitude dos municípios lindeiros varia de 220 a 571 metros em relação ao nível do mar.

Para realização da pesquisa foram utilizados dados meteorológicos proveniente da rede de estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram utilizados dados provenientes de 6 estações localizadas no estado do Paraná e duas no estado do Mato Grosso do Sul (Figura 1).

Figura 1 - Localização da área de estudo e estações meteorológicas utilizadas



Fonte: Elaborado pelos autores

Foram utilizados dados meteorológicos horários de temperatura do ar instantânea máxima e mínima (°C), velocidade do vento a 2 m de altura ( $m s^{-1}$ ),

radiação solar ( $\text{MJ m}^2 \text{d}^{-1}$ ) e umidade relativa instantânea máxima e mínima (%) para um período de três anos (1º de janeiro de 2016 a 31 de dezembro de 2018). Os dados horários foram convertidos para dados diários. Visando proporcionar maior consistência e confiabilidade dos resultados, os dias que apresentaram falhas de leituras em uma ou mais variáveis foram substituídos pela média dos outros anos avaliados equivalente ao mesmo dia com dado faltante.

Inicialmente, foi estimada a evapotranspiração de referência diária (ET<sub>o</sub>) do período em estudo para cada uma das estações meteorológicas, utilizando 5 modelos de estimativa, sendo eles: Camargo (CAMARGO, 1971), Hargreaves-Samani (HARGREAVES & SAMANI, 1985), Jensen-Haise (JENSEN & HAISE, 1963), Penman-Monteith com dados faltantes (ALLEN et al., 1998) e Thornthwaite-Camargo (CAMARGO et al., 1999). Dados de saldo de radiação e radiação solar foram substituídos pela equação de estimativa de radiação solar de Hargreaves-Samani (HARGREAVES & SAMANI, 1985).

Em seguida, os métodos foram avaliados visando selecionar os que apresentaram melhores desempenhos. O método de Penman-Monteith foi utilizado como referência para comparação com os demais métodos (ALLEN et al., 1998).

Para fins de caracterização do processo de ET<sub>o</sub> na região dos municípios lindeiros, foram aplicadas duas equações, ambas derivadas do Penman-Monteith. Estas equações representam os termos aerodinâmico e radioativo presentes no Penman-Monteith e demonstram os valores da contribuição de cada termo para os valores de evapotranspiração de referência. Sempre que somados os dois valores, devem ser iguais a evapotranspiração estimada pelo método padrão (FLUMIGNAN et al., 2016).

Após calculados os valores de estimativa de ET<sub>o</sub> para os locais onde estão instaladas as estações meteorológicas, visando determinar o método de estimativa, baseado em valores de temperatura do ar, que apresenta melhor desempenho para região, os dados diários provenientes destes melhores métodos e do Penman-Monteith foram interpolados para os municípios lindeiros, utilizando o método do inverso do quadrado da distância.

A avaliação do desempenho dos métodos foi realizada por meio de regressão linear relacionando os valores de ET<sub>o</sub> obtidos por Penman-Monteith em função dos valores de ET<sub>o</sub> provenientes dos demais métodos analisados. Além disso, foram determinados os valores de coeficiente de determinação,  $r^2$ , índice de concordância de Willmott, d, índice de desempenho, c, e da raiz quadrada do erro médio, RMSE (CAMARGO & SENTELHAS, 1997), (ČADRO et al., 2019), (ALLEN et al., 1998).

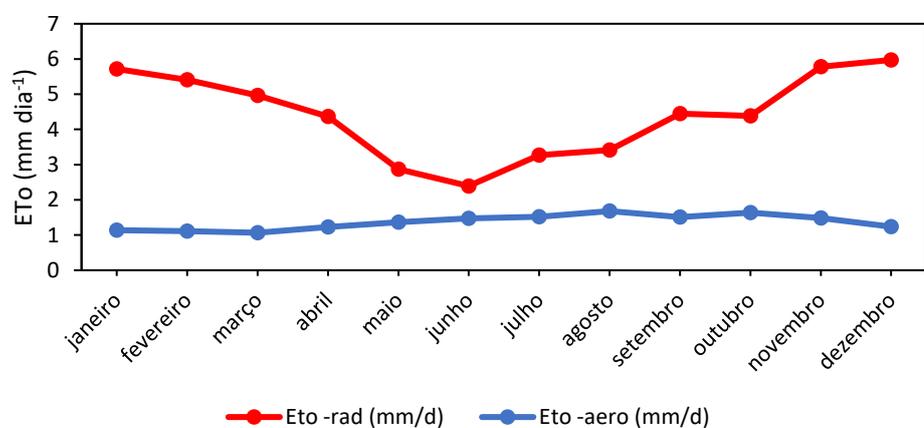
A variabilidade dos métodos também foi avaliada por meio de gráficos do tipo *BoxPlot*.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação à ET<sub>o</sub> na região dos municípios lindeiros ao lago de Itaipu, considerando os resultados obtidos pelo método Penman-Monteith, os valores ficaram entre o intervalo de 2 a 10  $\text{mm d}^{-1}$ , com a média em torno de 5,79  $\text{mm d}^{-1}$ . Os menores valores foram observados nos meses de maio, junho e julho. A partir de agosto, os valores aumentam, atingindo os maiores valores nos meses entre outubro e janeiro. Em fevereiro, os valores começam a decrescer novamente.

A Figura 2 demonstra os valores médios mensais do Penman-Monteith Radioativo (em vermelho) e do Penman-Monteith Aerodinâmico (em azul). É possível observar que os valores do Penman-Monteith gerados pela parte aerodinâmica variam pouco no decorrer do ano, com valores próximos a  $\text{mm d}^{-1}$ . Devido à umidade relativa média anual dos municípios limieiros permanecer acima dos 70% o ano todo, resultando em uma atmosfera com baixo potencial evaporativo. Os maiores valores da parcela aerodinâmica ocorrem nos meses de julho, agosto e setembro, os meses com menor umidade relativa do ar e com menos pluviosidade nessa região.

Figura 2 – Gráfico com as médias mensais dos valores do Penman-Monteith aerodinâmico e do Penman-Monteith radioativo.



Fonte: Elaborado pelos autores

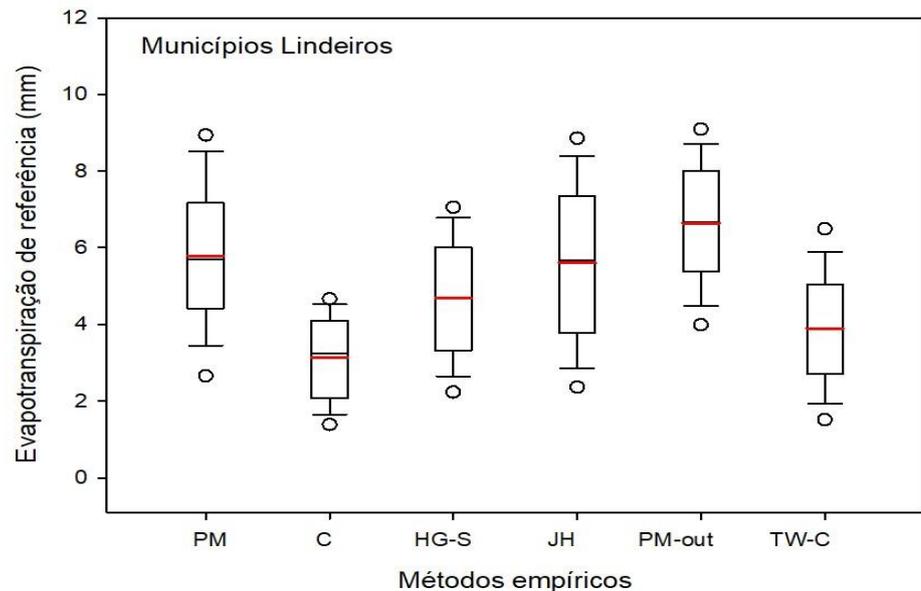
O gráfico demonstra claramente a influência da radiação solar incidente nos valores de evapotranspiração, seguindo a mesma curva dos valores de radiação solar no topo da atmosfera no hemisfério sul, que decrescem entre janeiro e junho e crescem entre julho e dezembro. No mês de janeiro, a parcela radioativa do método representa 83% dos valores de evapotranspiração, enquanto no mês de junho representa 62%. Anualmente, o termo radioativo representa 76% dos valores de evapotranspiração e o termo aerodinâmico representa 24%.

Devido ao baixo potencial evaporativo que a atmosfera dos municípios limieiros apresentam, métodos baseados em parâmetros atmosféricos como umidade do ar, temperatura do ar e déficit de pressão de vapor apresentam péssimo desempenho na região, pois os valores que estes métodos gerariam seriam muito baixos em relação ao Penman-Monteith. Dessa forma, pela alta influência do termo radioativo, métodos baseados em valores de radiação tendem a apresentar um desempenho muito mais satisfatório.

Em relação à ETo determinado por diferentes métodos (Figura 3), os métodos Jensen-Haise (JH), Hargreaves-Samani (HG-S), Penman-Monteith com dados incompletos (PM-out) e Thornthwaite-Camargo (TW-C) apresentaram maior variabilidade dos valores de ETo em relação ao método de Camargo (C). Isso demonstra grande influência da radiação solar sobre o processo de evapotranspiração (FILHO et al., 2010). Assim, métodos baseados em alguma forma de medição ou estimativa de radiação solar ou saldo de radiação, apresentam melhor desempenho nas estimativas diárias de evapotranspiração

(PILAU et al., 2015). Entretanto, foi observado que a utilização de radiação solar como dado de entrada provocou maior variabilidade nos valores de ETo em relação aos modelos baseados na temperatura do ar.

Figura 3 – Gráficos com os intervalos de dados e variabilidade do Penman-Monteith e dos métodos empíricos.



Fonte: Elaborado pelos autores

O método Jensen-Haise tem como dado de entrada original a radiação solar, ao contrário do Penman-Monteith com dados incompletos que utiliza o saldo de radiação líquida, fazendo com que o Jensen-Haise se adeque mais aos valores de radiação solar global, estimados pela equação de Hargreaves-Samani do que o Penman-Monteith com dados incompletos. O método de Hargreaves Samani apresentou uma variabilidade similar ao Penman-Monteith, porém subestimou a evapotranspiração em alguns dias. O método com variabilidade mais similar ao Penman-Monteith foi o de Jensen-Haise, que resultou maior parte dos seus valores estimados dentro do intervalo do método padrão, com poucos valores acima e abaixo do intervalo do Penman-Monteith.

Os métodos de Camargo e Thornthwaite-Camargo apresentaram poucos valores no mesmo intervalo que o Penman-Monteith, indicando que ambos os modelos subestimaram bastante a evapotranspiração nos municípios lindeiros. Como a temperatura do ar depende da radiação solar e da umidade relativa do ar, métodos baseados somente na temperatura média do ar, como o Camargo, não apresentam boas estimativas em locais com grande amplitude térmica (CAVALCANTE et al., 2011).

Tabela 1 – Valores do coeficiente de determinação,  $r^2$ , índice de concordância de Willmott, d, índice de desempenho, c e da raiz quadrada do erro médio, RMSE dos métodos empíricos em relação ao Penman-Monteith.

Método	$r^2$	c	d	RMSE
Camargo (C)	0,384	0,773	0,9995	3,08
Hargreaves-Samani (HG-S)	0,648	0,859	0,9998	1,61
Jensen-Haise (JH)	0,618	0,845	0,9999	1,36
Penman-Monteith incompleto (PM-I)	0,694	0,881	0,9998	1,38
Thornthwaite-Camargo (TW-C)	0,545	0,800	0,9996	2,32

Fonte: Elaborado pelos autores

O método de Camargo apresentou os piores valores de “c” e  $r^2$ , bem como os valores mais altos de RMSE. Isso acontece pois o método utiliza apenas dados de temperatura média do ar, que não representam a variação de temperatura da atmosfera. Ao contrário do método Thornthwaite-Camargo, que utiliza dados da amplitude térmica diária, se adequando mais a regiões continentais, apresentando desempenho do índice “c” “muito bom”. Os valores de  $r^2$  foram medianos, porém o alto RMSE impede a sua utilização.

A equação de Jensen-Haise obteve o menor valor de RMSE, com valor de c classificado como “muito bom”. Seu valor de  $r^2$  permaneceram inferior aos métodos Hargreaves-Samani e Penman-Monteith incompleto.

Os métodos Hargreaves-Samani e Penman-Monteith incompleto apresentaram índice c como “ótimo”, juntamente com os melhores valores de  $r^2$ . O método de Hargreaves-Samani apresentou valor de RMSE maior do que o Penman-Monteith incompleto, o que impede a sua utilização sem que seja feita uma calibração prévia. Os resultados obtidos com o método Hargreaves-Samani corroboram com os dados obtidos por (GURSKI et al., 2018) que apontam bom desempenho do método no estado do Paraná. O Penman-Monteith incompleto se sobressaiu aos demais métodos em valores de “c” e  $r^2$ , com o segundo menor valor de RMSE, ou seja, apresentou menores erros de estimativas e melhor precisão dos valores.

## CONCLUSÕES

Dentre os métodos empíricos avaliados, o modelo de Penman-Monteith com dados incompletos apresentou melhor desempenho, sendo recomendado para estimativas de evapotranspiração de referência nos municípios lindeiros ao lago de Itaipu. O método Jensen-Haise, Hargreaves-Samani e Thornthwaite-Camargo apresentaram desempenhos inferiores ao de Penman-Monteith com dados incompletos, no entanto, seus resultados indicam potencial para serem utilizados após calibração dos coeficientes. O modelo de Camargo apresentou menor desempenho para as estimativas de evapotranspiração, não sendo recomendado sua utilização para região.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e à Fundação Araucária pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998.

ČADRO, S.; CHERNI-ČADRO, S.; MARKOVIĆ, M.; ŽUROVEC, J. A reference evapotranspiration map for Bosnia and Herzegovina. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 7, n. 1, p. 89–101, 2019.

CAMARGO, A. P. **Balanço hídrico no Estado de São Paulo**. 3. ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1971.

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**, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.

CECÍLIO, R. A.; DA SILVA, K. R.; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. R. M. Método para a espacialização dos elementos do balanço hídrico climatológico. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 47, n. 4, p. 478–488, 2012.

CAMARGO, A. P.; MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C.; PICINI, A. G. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 2, p. 252–257, 1999.

CAVALCANTE, E. G.; OLIVEIRA, A. D.; DE ALMEIDA, B. M.; SOBRINHO, J. E. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do semiárido Nordeste. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. SUPPL. 1, p. 1699–1708, 2011.

DROOGERS, P.; ALLEN, R. G. **Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions**. 2002.

FLUMIGNAN, D. L.; FIGUEIREDO, L. H. S.; SILVA, J. A.; FIETZ, C. R.; COMUNELLO, E. **Evapotranspiração de Referência (ET) na Região 0 de Dourados**, Mato Grosso do Sul. Embrapa, v. 12, n. 4, p. 6, 2016.

GURSKI, B. C.; JERSZURKI, D.; DE SOUZA, J. L. M. Alternative reference evapotranspiration methods for the main climate types of the state of Paraná, Brazil. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 53, n. 9, p. 1003–1010, 2018.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 1, n. 2, p. 96–99, 1985.

JENSEN, M.; HAISE, H. Estimating Evapotranspiration from Solar Radiation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE**, v. 89, n. 14, p. 15–41, 1963.

LEMOS FILHO, L. C. A.; CARVALHO, L. G.; EVANGELISTA, A. W. P.; ALVES JÚNIOR, J. Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 12, p. 1294–1303, 2010.

LIBARDI, L. G. P.; FARIA, R. T. DE; DALRI, A. B.; ROLIM, G. D. S.; PALARETTI, L. F. High precision weighing lysimeters for evapotranspiration measurements of sugarcane pre-sprouted plantlets. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v. 38, n. 2, p. 208–216, 2018.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. DA S.; PINTO, L. F. D. **Atlas do Estado do Paraná**, p. 2010, 2019.

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 4–20, 2015.

PILAU, F. G.; BATTISTI, R.; SOMAVILLA, L.; RIGHI, E. Z. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência nas localidades de Frederico Westphalen e Palmeira das Missões, RS. **Ciência Rural**, v. 42, n. 2, p. 283–290, 2012.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera**. 2. ed. São Paulo: Manole, 2012.

Rocha, A. S.; Bade, M. R. **Geografia da Bacia Hidrográfica do Paraná três**. 1. ed. Jundiaí, SP: Ed. In House, 2018.

ROESLER, M. R. Costa Oeste Do Paraná E a Hidrelétrica Binacional De Itaipu: **Um Estudo Sobre a Dinâmica Da Gestão Ambiental Nos Municípios Lindeiros**, 1996.

SILVA, E. H. F. M.; GONÇALVES, A. O.; PEREIRA, R. A.; et al. Soybean irrigation requirements and canopy-atmosphere coupling in Southern Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 218, n. March, p. 1–7, 2019.

VALIPOUR, M. **Temperature analysis of reference evapotranspiration models.**  
*Meteorological Applications*, v. 22, n. 3, p. 385–394, 2015.