



Análisis comparativo de la evapotranspiración de referencia con métodos empíricos en la cuenca del río Mosna

Comparative analysis of reference evapotranspiration with empirical methods in the Mosna river basin

Adan Acevedo Cruz^{1*} Esteban Reyes Roque²

¹Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo, Perú.

²Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo - Huaraz - Perú.

Recibido: 20 Feb, 2024 | Aceptado: 28 May, 2024 | 20 Jul.2024

Autor: de correspondencia*: acevedoc@unasam.edu.pe

Como citar este artículo: Acevedo Cruz, A., & Reyes Roque, E. Análisis comparativo de la evapotranspiración de referencia con métodos empíricos en la cuenca del río Mosna. *Aporte Santiaguino*, 17(1). <https://doi.org/10.32911/as.2024.v17.n1.1132>

RESUMEN

La estimación precisa de la evapotranspiración de referencia (ET_o) es un factor fundamental para la planificación y gestión del recurso hídrico. El método recomendado por la FAO de Penman-Monteith es globalmente aceptado como el método estándar para el cálculo de la ET_o. Sin embargo, este método requiere diversos parámetros meteorológicos que generalmente no se encuentran en las estaciones meteorológicas. En ese contexto, el objetivo de esta investigación fue evaluar el desempeño de tres métodos empíricos con respecto al método de referencia en la cuenca del río Mosna. Se utilizó los datos diarios proporcionados por el SENAMHI y NASA POWER. Los métodos empíricos de Hargreaves-Samani, Thornthwaite y Turc subestimaron la ET_o en un 1,2 %, 56 % y 45 % en comparación con Penman-Monteith. Solamente el método de Hargreaves-Samani mostró un buen desempeño de la ET_o con respecto a Penman-Monteith, evaluado mediante los estadísticos de prueba de R² de 0,86, EPCM de 0,006, RECM de 0,080 y NSE de 0,975. Por lo tanto, el método de Hargreaves-Samani, que requiere únicamente como dato de entrada la temperatura, puede ser utilizado en esta cuenca.

ABSTRACT

Palabras Clave: Recurso hídrico; Evapotranspiración de referencia; Penman-Monteith; Hargreaves-Samani; río Mosna.

The accurate estimation of the reference evapotranspiration (ET_o) is a fundamental factor for the planning and management of water resources. The Penman-Monteith method recommended by the FAO is globally accepted as the standard method for calculating ET_o, however, this method requires various meteorological parameters, which are generally not found in meteorological stations. In this context, the objective of this research was to evaluate the performance of three empirical methods with respect to the reference method in the Mosna river basin. Daily data provided by SENAMHI and NASA POWER were used in the study. The empirical methods of Hargreaves - Samani, Thornthwaite and Turc underestimated ET_o by 1.2%, 56% and 45% compared to Penman-Monteith. Only the Hargreaves - Samani method showed good performance of the ET_o with respect to Penman-Monteith evaluated by the test statistics of R² of 0.86, EPCM of 0.006, RECM of 0.080 and NSE of 0.975. Therefore, the Hargreaves - Samani method that requires only temperature as input can be used in this basin.

Keywords: Water resource; Reference evapotranspiration; Penman-Monteith; Hargreaves-Samani; Mosna River.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de atribución de Creative Commons, que permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que se cite debidamente la obra original.



INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso indispensable para la vida, pero cada vez es más escaso, especialmente en el sector agrícola. Las previsiones indican que para el año 2050, la demanda de agua para actividades agrícolas aumentará un 60 %, principalmente en los cultivos de regadío (Müller Schmied et al., 2016; Boretti y Rosa, 2019). En este posible escenario, la planificación y gestión del recurso hídrico serán fundamentales para un uso eficiente del agua.

La estimación precisa de la evapotranspiración de referencia (ETo) es un factor fundamental para la gestión del riego, los equilibrios hídricos en las cuencas, la planificación de los recursos hídricos y también para los estudios hidrológicos y climatológicos (Pour et al., 2020). knowledge on the changes and the cause of the changes in ETo is very limited in tropical regions. The trends in ETo , the factors influencing the changes in ETo and the change point (year. No obstante, la estimación precisa de la ETo es quizás la más difícil de las variables hidrometeorológicas debido a las complejas interacciones entre el suelo, planta y atmósfera (Pandey, Dabral, & Pandey, 2016) Assam Bengal Plain (ABP).

La evapotranspiración de referencia se puede cuantificar directamente con lisímetros, métodos de equilibrio de energía y los dispositivos de covarianza de remolinos (Li et al., 2018) the FAO-56 Penman–Monteith (PM. Aunque los lisímetros son uno de los instrumentos más precisos para medir la ETo , su implementación no es adecuada debido al alto costo y tiempo necesario para las mediciones complejas, lo cual dificulta la instalación en zonas agrícolas (Villa et al., 2021) México, el volumen de agua de riego se asigna a partir de la evapotranspiración de referencia (ETo). Del mismo modo, el uso de instrumentos para la medición de la ETo también resulta ser costoso y difícil de operar (Zhao et al., 2021).

Otra estrategia indirecta de calcular la ETo es el uso de fórmulas empíricas. Para la estimación de la ETo , la Organización para la Agricultura y Alimentación (FAO) recomienda la ecuación de Penman–Monteith, propuesto por Allen et al. (1998). Esta ecuación es aceptada como el método estándar para el cálculo de la ETo ; primero, porque no requiere calibración local en diferentes regiones geográficas y, segundo, porque ha sido probada y calibrada con lisímetros en diferentes entornos climáticos (Feng et al., 2017; Islam et al., 2019) especially in Bangladesh because of limited freshwater availability in the dry season, despite the fact that the country's agriculture sector requires large quantities of water for the crop production. Hence, gaining a better understanding of changes in water requirements in Bangladesh during dry periods is important in the management of agricultural water resources. This study assesses the recent impacts of climate change on the design water requirement (DWR. Sin embargo, una limitante de este método es que requiere la entrada de varios parámetros meteorológicos como las temperaturas máximas y mínimas, la humedad relativa, la velocidad del viento y la radiación solar, que no están disponibles en todos los lugares, especialmente en países pobres donde el reto es conseguir datos meteorológicos (Salam et al., 2020). Por lo tanto, una alternativa es utilizar métodos empíricos para el cálculo de la ETo que se alimentan de pocas variables meteorológicas.

En la cuenca del río Mosna, situada en la vertiente del marañón, debido a la baja información meteorológica, la ETo ha sido muy poco estudiada. En ese sentido, el objetivo de esta investigación fue realizar el análisis comparativo de la ETo con tres métodos empíricos y el método estándar, utilizando la información proporcionada por el SENAMHI y del sistema NASA POWER.

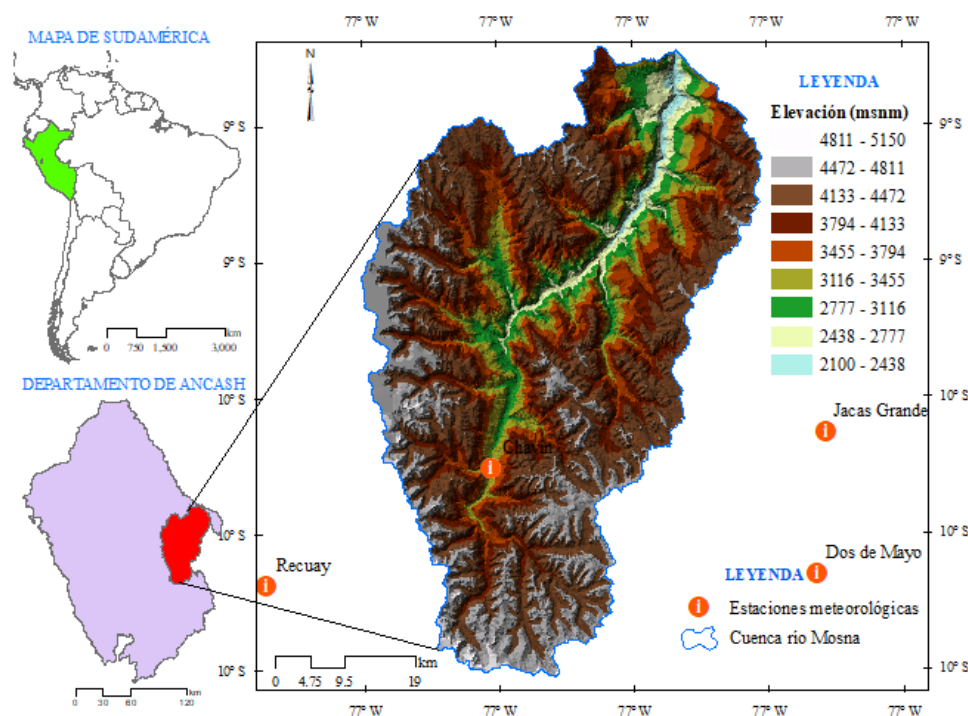
MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La cuenca del río Mosna se ubica en la vertiente del Marañón, en la sierra central del Perú. Es una cuenca que abarca las provincias de Huari y Antonio Raymondi en el departamento de Ancash. Sus coordenadas geográficas varían entre $9^{\circ} 04' 10''$ y $10^{\circ} 13' 40''$ de latitud sur y $69^{\circ} 56' 00''$ y $77^{\circ} 10' 10''$ de longitud oeste. La altitud de la cuenca se extiende desde 1970 hasta 5504 m s. n. m. en el nevado de Cajat (ANA, 2015).

Figura 1

Ubicación del área de estudio y distribución de las estaciones meteorológicas



Datos meteorológicos y su procesamiento

Las observaciones diarias de las temperaturas mínima y máxima y las humedades relativas se obtuvieron de las estaciones meteorológicas de Chavín, Chiquián, Dos de Mayo, Jacas Grande, Piscobamba, Pomabamba, Recuay y Yungay, las cuales son administradas por el SENAMHI (1964-2023). La velocidad del viento se descargó de la página de NASA POWER (1981-2021). La radiación solar se determinó con la ecuación de Allen et al. (1998).

La consistencia de la información meteorológica se realizó con el método de curva de doble masa, donde cada estación se comparó con la estación próxima, como recomiendan Ruiz Alvarez et al. (2020). Se encontró que los datos son consistentes.

Cálculo de la evapotranspiración de referencia con métodos empíricos

La evapotranspiración de referencia mensual en cada estación meteorológica se estimó con los métodos empíricos propuestos por Hargreaves y Samani (1985), Thornthwaite (1948), Turc (1961) y el método estándar según la metodología descrita por Allen et al. (1998). Los cálculos de la ETo se realizaron con hojas de Excel y el software CROPWAT, versión 8,0.

Tabla 1

Descripción de los métodos empíricos y estándar utilizados en el estudio

Ecuaciones	Métodos empíricos	Referencias
Penman-Monteith	$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_m + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)}$	Allen et al. (1998)
Hargreaves y Samani	$ET_o = 0,0023 * R_a * (T_m + 17,8) * (T_{max} - T_{min})^{0,5}$	Hargreaves y Samani (1985)
Thorntwaite	$ET_o = 16d \left(\frac{10T_m}{I} \right)^a ; I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{I_j}{5} \right)^{1,5}$ $a = 0,49 + 0,01791I - 0,0000771I^2 + 0,000000675I^3$ $ET_o = a_t 0,013 \left(\frac{T_m}{T_m + 15} \right) \left(\frac{23,8856 * R_s + 50}{\lambda} \right)$	Thornthwaite (1948)
Turc	$HR \geq 50\%; a_t = 1, HR \leq 50\%; a_t = 1 + \left(\frac{50 - HR}{70} \right)$	Turc (1961)

R_n = radiación neta (MJ/m²/día); G = densidad del flujo de calor (MJ/m²/día); T_m = temperatura media (°C), U_2 = velocidad del viento a 2 m de altura (m/s), e_s = presión de vapor de saturación (kPa); e_a = presión real de vapor (kPa); $e_s - e_a$ = déficit de presión de vapor a 2 m (kPa); γ = pendiente de la curva de tensión de vapor saturado (kPa/°C); Δ = constante psicrométrica (kPa/°C); T_{min} = temperatura mínima (°C); T_{max} = temperatura máxima (°C), R_a = radiación extraterrestre (MJ/m²/día); I = índice de calor térmico anual; d = número de días por mes; a = constante empírico; a_t = variante dependiente de humedad relativa; HR = humedad relativa (%); λ = calor latente de vaporización (MJ/kg); R_s = radiación solar (MJ/m²/día).

Análisis estadístico de la evapotranspiración de referencia

La comparación de las medidas entre los métodos empíricos y el de la referencia se realizó con el análisis de varianza (P-valor ≤ 0,05) y el análisis de comparaciones múltiples de Tukey, para el intervalo de confianza del 95 %. También, se realizó la regresión lineal entre los datos de la ET_o, calculada con métodos empíricos con respeto al método de referencia. Los estadísticos de prueba utilizados fueron el coeficiente de determinación (R²), error de predicción cuadrático medio (EPCM), raíz del error cuadrático medio (RECM) y la eficiencia de Nash (NSE), los cuales se calcularon con las siguientes ecuaciones.

$$R2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (z(x_i) - z(x))(z(x_i) - z(x))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (z(x_i) - z(x))^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (z(x_i) - z(x))^2}} \right]^2$$

$$EPCM = \left[\frac{\sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x)]^2}{n} \right], RECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x)]^2}{n}}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (z(x_i) - z(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (z(x_i) - z(x))^2}$$

Donde: $z(x_i)$ y $z(x)$ son los valores y las medias obtenidas con el método empírico, $Z(x_i)$ y $Z(x)$, los valores y las medias obtenidas con método de referencia, mientras que n es el número de observaciones.

El análisis estadístico de la ET_o mensual se realizó con el software R, versión 4,3,0.

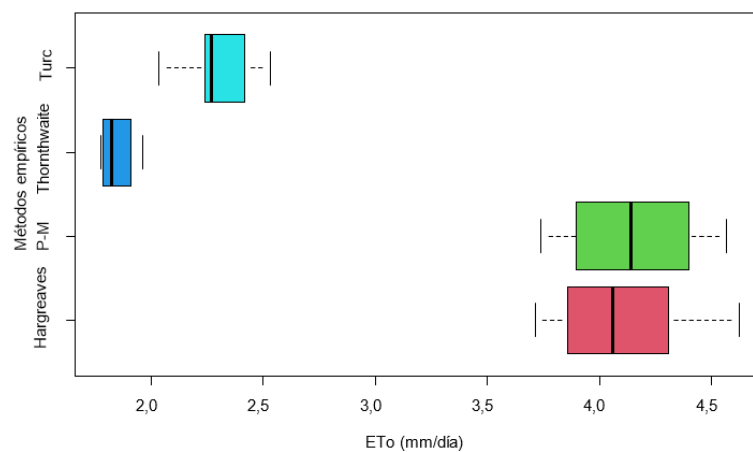
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza de la ETo

En el diagrama de cajas que se muestra en la Figura 2, se observa que los valores de la ETo calculados con los métodos de Penman-Monteith y Hargreaves-Samani son superiores que los valores de la ETo obtenidos con las ecuaciones de Thornthwaite y Turc. La ETo promedio diaria estimada con los métodos empíricos oscilan de 1,844 mm/día a 4,149 mm/día. Los métodos que presentaron mayor dispersión de la ETo fueron el Penman-Monteith (3,739 mm/día a 4,569 mm/día) y Hargreaves-Samani (3,711 mm/día a 4,622 mm/día). También, estos dos últimos métodos tienen mayor desviación estándar de 0,307 y 0,312 mm/día, respectivamente, mientras que Thornthwaite y Turc tienen valores mínimos de desviación estándar, de 0,072 y 0,157 mm/día.

Figura 2

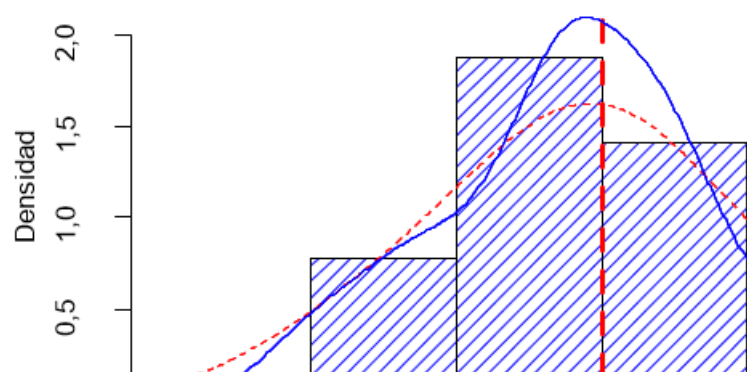
Diagrama de cajas de la ETo estimada con los métodos empíricos



El coeficiente de determinación **múltiple** (R^2), generado mediante el modelo lineal, indica que los métodos empíricos contribuyen hasta 95,7 % de la variación de la ETo. Por otro lado, los valores de la ETo se ajustan a la distribución normal, como se aprecia en la Figura 3, donde los valores de la ETo se reparten de forma simétrica con respecto a la media (línea vertical discontinua roja), verificado con la prueba de Shapiro-Wilk (p -valor = 0,602). Sin embargo, las varianzas son diferentes entre los métodos, según la prueba de Bartlett (p -valor = 0,003) y no se observó ningún valor atípico de la ETo corroborado con la prueba de Bonferroni (p -valor = 0,465). Por lo tanto, se realizó el análisis de varianza paramétrica.

Figura 3

Histograma de los residuos de la ETo estimada con los métodos empíricos



El análisis de varianza que se presenta en la Tabla 2 muestra el efecto significativo de los métodos empíricos en la evapotranspiración de referencia (p -valor $\leq 0,05$). Por ello, se realizó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey, cuyos resultados se observan en la Figura 4.

Tabla 2

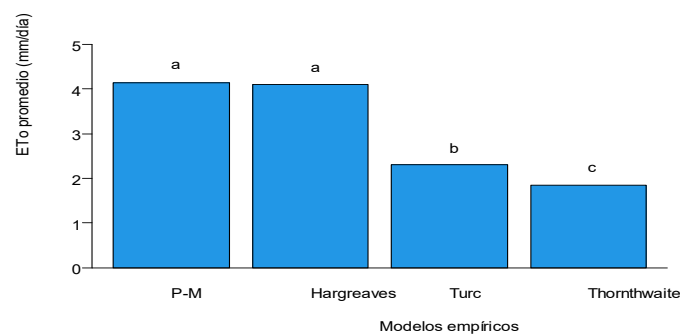
Análisis de varianza de la ETo calculada con los métodos empíricos

Fuente de variación	Grado de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F valor	Pr(>F)
Métodos	3	34,53	11,51	207,8	2e-16***
Residuos	28	1,55	0,05		
Total	31	36,08			

* Indica diferencia estadísticamente significativa, CV = 7,598 %

Figura 4

Evapotranspiración de referencia mensual en función a los modelos empíricos



En la Figura 4, se aprecia que las letras a y b representan grupos homogéneos, según la prueba de Tukey. La ETo determinada con el método estándar de Penman-Monteith alcanzó un valor promedio de 4,149 mm/día y desviación estándar de 0,307 mm/día. El método de Hargreaves-Samani presenta resultados estadísticamente homogéneos con Penman-Monteith, con una media de 4,098 mm/día y desviación estándar de 0,312 mm/día. Los valores estimados de la ETo con estos dos métodos son estadísticamente superiores que la ETo obtenida de 2,299 mm/día y 1,844 mm/día con las ecuaciones de Turc y Thornthwaite. En consecuencia, el método de Turc subestimó **en un 45 %** la ETo con respecto al método estándar. Este resultado es consistente con lo indicado por Song et al. (2018) which is recommended by the Food and Agriculture Organization (FAO en el estudio sobre la performance de la ETo al sur de China.

El método de Hargreaves-Samani subestimó la ETo en un mínimo de 1,2 % con respecto al método de referencia. Sin embargo, otro estudio realizado por Villa et al. (2021) sobre la ETo en condiciones de México, muestra que los métodos de Droogers y Hargreaves-Samani subestiman en 2 % y 15 % con respecto a Penman-Monteith. De forma similar, Santos et al. (2021) indicaron que el **método** de Hargreaves-Samani subestima la ETo (736 mm/año) en comparación con el método estándar (1300 mm/año) en las condiciones del sur de Brasil. Estos resultados indican que los valores de la ETo estimada con los métodos empíricos varían de un lugar a otro según las condiciones geográficas.

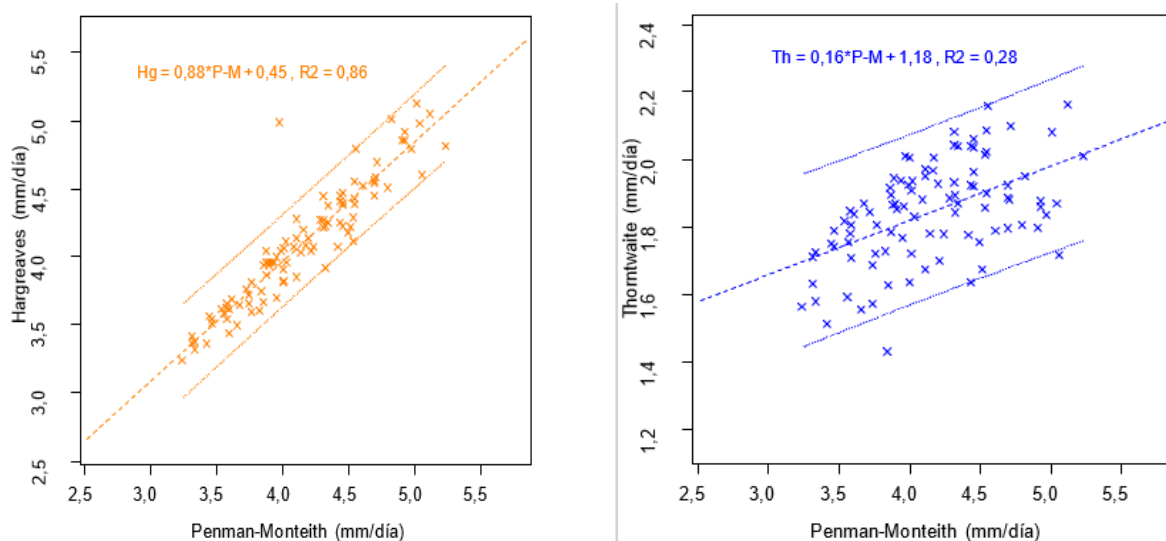
Análisis de regresión de la ETo

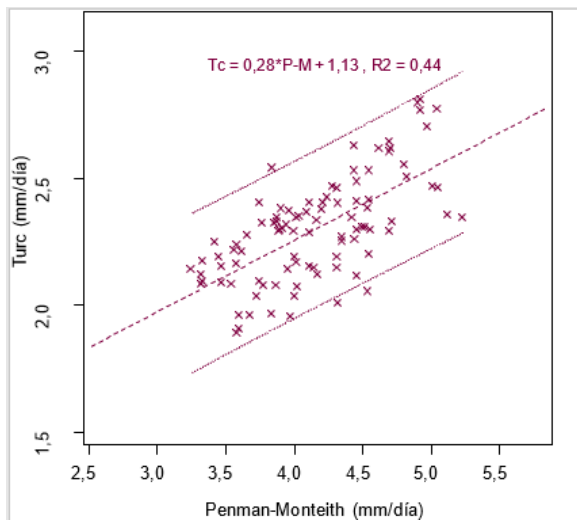
La regresión lineal mostró que los métodos de Hargreaves-Samani, Thornthwaite y Turc presentan una relación lineal significativa con el método de Penman-Monteith (p -valor $\leq 0,05$) en el intervalo de confianza de 3,24 a 5,23 mm/día. Sin embargo, el método de Hargreaves-Samani únicamente mostró un buen ajuste con respecto al método de referencia con el coeficiente R^2 de 0,86 que fue superior al valor mínimo de 0,70 como indican Moriasi et al. (2007). Los valores de EPCM variaron de 0,006 hasta 5,368 mm/día, mientras que los valores el RECM oscilaron entre 0,080 y 2,319 mm/día y el NSE varió desde -1173 hasta 0,945. Estos resultados indican que los tres métodos subestimaron la ETo, en comparación con el Penman-Monteith en el entorno de la cuenca del río Mosna. (Figura 5 y Tabla 3). Sin embargo, en otros estudios realizados por Donohue, McVicar y Roderick (2010) y Silva et al. (2018) sobre la ETo en Australia y Brasil, indican que los métodos que utilizan solamente la temperatura como el Hargreaves y Samani tienden a sobreestimar la ETo.

Los resultados de la regresión lineal concuerdan con lo indicado por Lozoya et al. (2014), quienes en el estudio sobre el modelo predictivo de la ETo para el riego en el sistema cerrado encontraron al método de Hargreaves-Samani como el más cercano al modelo de referencia, con $R^2 = 0,83$, RECM = 1,16 y NSE de 0,71. No obstante, este último método confiere mayor precisión y aplicabilidad de la evapotranspiración en las zonas áridas y semiáridas, como indican Raziqi y Pereira (2013) en un estudio realizado en Irán. En esta investigación se encontró un buen desempeño del método de Hargreaves-Samani ($R^2 = 0,86$), pero en los estudios realizados por Santos et al. (2021) y Venancio et al. (2019) its use requires a series of meteorological variables that is not normally available, restricting its application in many locations. A solution to the problem of unavailability of meteorological data was presented in FAO Bulletin 56, which contains methodologies for estimating wind speed, solar radiation and relative humidity. The objective of the present study was to evaluate the performance of the PM-FAO methodologies for missing data and Hargreaves-Samani as alternatives to the PM-FAO standard method at different time scales and seasons for the municipalities of Linhares and São Mateus, located in the northern region of the state of Espírito Santo. The comparison was performed using linear regression parameters (β_0 and β_1 revelaron bajos niveles en los coeficientes de $R^2 = 0,313$ y $R^2 = 0,53$ y $0,58$, respectivamente, en las condiciones climáticas de Brasil, lo que limita el uso generalizado en esta región.

Figura 5

Regresión lineal de la ETo entre los métodos empíricos y el método de referencia





Hargreaves: $H_g = 0,88 * P - M + 0,45$

Thorntwaite: $T_h = 0,16 * P - M + 1,18$

Turc: $T_c = 0,28 * P - M + 1,13$

Tabla 3

Estadísticos de prueba de los métodos empíricos con respecto al método de referencia

Métodos	Pendiente	Constante	p-valor	R ²	EPCM	RECM	NSE
Hargreaves-Samani	0,88*	0,45*	2,20E-16	0,86	0,006	0,080	0,975
Thorntwaite	0,16*	1,18*	4,30E-08	0,28	5,378	2,319	-1173
Turc	0,28*	1,13*	2,60E-13	0,44	3,492	1,869	-26,76

* Indica la regresión lineal estadísticamente significativa

Como se observa en la Tabla 3, los valores de RECM (< 1) y NSE (~ 1) fueron aceptables para el método de Hargreaves – Samani, por lo que este método empírico se puede utilizar en regiones donde se disponga solamente de datos de temperatura como es el caso de la cuenca del río Mosna.

CONCLUSIONES

El objetivo del presente trabajo fue realizar el análisis comparativo de la ET₀ estimada con tres métodos empíricos y el método estándar en la cuenta del río Mosna. Como resultado se encontró que los métodos empíricos de Hargreaves-Samani, Thornthwaite y Turc subestimaron la ET₀ en un 1,2 %, 56 % y 45 % con respecto al método de referencia de Penman-Monteith. Además, los valores de la ET₀, calculados con Hargreaves-Samani resultaron estadísticamente similares que los valores de la ET₀, estimados con el método de Penman-Monteith con estadísticos de prueba de R² de 0,86, EPCM de 0,006, RECM de 0,080, NSE de 0,975 y la regresión lineal estadísticamente significativa (p-valor ≤ 0,05). Por lo tanto, el método de Hargreaves-Samani, que requiere solamente como dato de entrada la temperatura, se puede utilizar en esta cuenca.

AGRADECIMIENTO

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) por proporcionar los datos meteorológicos para esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. y Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and drainage paper 56.). Food and Agricultural Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>
- ANA. (2015). Estudio de balance hídrico de la cuenca del río Mosna. *Autoridad Nacional del Agua*. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/2493>
- Boretti, A. y Rosa, L. (2019). Reassessing the projections of the World Water Development Report. *Npj Clean Water*, 2(1). <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>
- Donohue, R. J.; McVicar, T. R. y Roderick, M. L. (2010). Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate. *Journal of Hydrology*, 386(1), 186-197. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.020>
- Feng, Y.; Cui, N.; Zhao, L.; Gong, D. y Zhang, K. (2017). Spatiotemporal variation of reference evapotranspiration during 1954-2013 in Southwest China. *Quaternary International*, 441, 11. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.01.023>
- Hargreaves, G. H. y Samani, Z. A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Islam, A. T.; Shen, S.; Yang, S.; Hu, Z. y Chu, R. (2019). Assessing recent impacts of climate change on design water requirement of Boro rice season in Bangladesh. *Theoretical and Applied Climatology*, 138, 97-113. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02818-8>
- Li, M.; Chu, R.; Shen, S. y Islam, A. R. M. T. (2018). Quantifying Climatic Impact on Reference Evapotranspiration Trends in the Huai River Basin of Eastern China. *Water*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/w10020144>
- Lozoya, C.; Mendoza, C.; Mejía, L.; Quintana, J.; Mendoza, G.; Bustillos, M.; Arras, O. y Solís, L. (2014). Model Predictive Control for Closed-Loop Irrigation. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 4429-4434. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.02067>
- Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; Van Liew, M. W.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D. y Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Müller Schmied, H.; Adam, L.; Eisner, S.; Fink, G.; Flörke, M.; Kim, H.; Oki, T.; Portmann, F. T.; Reinecke, R.; Riedel, C.; Song, Q.; Zhang, J. y Döll, P. (2016). Variations of global and continental water balance components as impacted by climate forcing uncertainty and human water use. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(7), 2877-2898. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2877-2016>
- Pandey, P. K.; Dabral, P. P. y Pandey, V. (2016). Evaluation of reference evapotranspiration methods for the northeastern region of India. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(1), 52-63. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.02.003>
- Pour, S. H.; Wahab, A. K. A.; Shahid, S. y Ismail, Z. B. (2020). Changes in reference evapotranspiration and its driving factors in peninsular Malaysia. *Atmospheric Research*, 246, 105096. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105096>

- Raziei, T. y Pereira, L. S. (2013). Estimation of ETo with Hargreaves–Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. *Agricultural Water Management*, 121, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.12.019>
- Ruiz Alvarez, O.; Singh, V.; Enciso, J.; Ontiveros-Capurata, R. E. y Santos, C. (2020). Observed trends in daily temperature extreme indices in Aguascalientes, México. *Theoretical and Applied Climatology*, 142. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03391-1>
- Salam, R.; Islam, A. R. M. T.; Pham, Q. B.; Dehghani, M.; Al-Ansari, N. y Linh, N. T. T. (2020). The optimal alternative for quantifying reference evapotranspiration in climatic sub-regions of Bangladesh. *Scientific Reports*, 10(1), 20171. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77183-y>
- Santos, M. S. N. D.; Castro, I. A. D.; Oro, C. E. D.; Zabet, G. L. y Tres, M. V. (2021). Reference crop evapotranspiration in distinct agricultural regions of Southern Brazil: A comparison of improved empirical models. *Revista Engenharia na Agricultura - REVENG*, 29. <https://doi.org/10.13083/reveng.v29i1.12418>
- Da Silva, G. H.; Dias, S. H. B.; Ferreira, L. B.; Santos, J. É. O. y Da Cunha, F. F. (2018). Performance of different methods for reference evapotranspiration estimation in Jaíba, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22, 83-89. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n2p83-89>
- Song, X.; Lu, F.; Xiao, W.; Zhu, K.; Zhou, Y. y Xie, Z. (2018). Performance of twelve reference evapotranspiration estimation methods to Penman-Monteith method and the potential influences in northeast China. *Meteorological Applications*, 26. <https://doi.org/10.1002/met.1739>
- Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Turc, L. (1961). Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. Formule climatique simplifiée et mise à jour. *Annuaire Agronomie*, 12(1), 13-49.
- Venancio, L. P.; Cunha, F. F.; Mantovani, E. C.; Sedyama, G. C.; Eugenio, F. C. y Aleman, C. C. (2019). Penman-Monteith with missing data and Hargreaves-Samani for ETo estimation in Espírito Santo state, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23, 153-159. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n3p153-159>
- Villa, A. O.; Ontiveros, R. E.; Ruiz, O.; González, A.; Quevedo, A. y Ordóñez, L. M. (2021). Variación espacio-temporal de la evapotranspiración de referencia a partir de métodos empíricos en Chihuahua, México. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas (e2007-4026)*, vol. 13, no. 1. <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/2258>
- Zhao, L.; Zhao, X.; Zhou, H.; Wang, X. y Xing, X. (2021). Prediction model for daily reference crop evapotranspiration based on hybrid algorithm and principal components analysis in Southwest China. *Computers and Electronics in Agriculture*, 190, 106424. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106424>