

COEFICIENTE K_p PARA CALCULAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA EN ÁREAS AGROPECUARIAS DEL MUNICIPIO DE MAYARÍ EN LA PROVINCIA DE HOLGUÍN

Juan Alejandro Villazón Gómez¹, Pavel Noris Noris², Ranses J. Vázquez Montenegro³, George Martín Gutiérrez⁴ y Yakelín Cobo Vidal⁴

¹Universidad de Holguín. Sede José de la Luz y Caballero, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Centro de Estudios para Agroecosistemas Áridos (CEAAR), Ave. de los Libertadores, km 3½, No. 287. Holguín, Cuba, villazon@uho.edu.cu.

²Delegación Provincial del CITMA, Centro Provincial de Meteorología, Holguín, Cuba.

³Instituto de Meteorología.

⁴Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (EPICA), Subdirección de I+D, Guaro s/n, Mayarí, Holguín, Cuba.

RESUMEN

La determinación de la evapotranspiración de referencia resulta de suma importancia para un adecuado manejo del riego. Esta puede ser determinada por diferentes métodos, entre los cuales se encuentra el del tanque evaporímetro clase "A", que utiliza el coeficiente K_p para corregir las disimilitudes entre la evaporación desde una superficie libre de agua y dicha evapotranspiración de referencia. El trabajo se desarrolló con el objetivo de calibrar el coeficiente K_p del tanque evaporímetro clase "A" para el cálculo de la evapotranspiración de referencia decenal en áreas agropecuarias del municipio de Mayarí en la provincia de Holguín. Se utilizaron los datos observados en dos estaciones meteorológicas (Guaro y Pinares de Mayarí) entre 1975-2015. Con los años pares dentro de la serie temporal se calibró el coeficiente K_p , a partir de la ecuación del tanque evaporímetro; con los años impares se validó la ET_o obtenida por dicha ecuación comparándola, mediante un análisis de regresión simple y los índices de concordancia (d) y confianza (c) con la ET_o FAO Penman-Monteith. Los modelos de regresión con mejores coeficientes se obtuvieron con la ET_o estimada_1 con los coeficientes K_p calibrados a partir de la ecuación del tanque evaporímetro clase "A". Esta mostró índices de concordancia más cercanos a 1. Los índices de confianza de esta ET_o se clasificaron como *bueno* y *medio*, por lo que constituye un método óptimo, rápido y sencillo a utilizar como herramienta para el manejo del riego.

ABSTRACT

Determination of the reference evapotranspiration results from utmost importance for an adequate irrigation management. This can be determined by different methods, between the ones that one finds the one belonging to the Class "A" pan that utilizes the coefficient K_p to correct the dissimilitudes between the evaporation from a free water surface and the aforementioned reference evapotranspiration. The work developed with the objective of calibrating the coefficient K_p of the Class "A" pan for the calculation of the decennial reference evapotranspiration in agricultural areas of Mayarí's municipality at Holguín's province. They utilized the data observed at two weather stations (Guaro and Pinares de Mayarí) between 1975-2015. With the equal years within the time series calibrated him the coefficient K_p , as from the Class "A" pan equation; The ET_o obtained by the aforementioned equation became validated with the odd years comparing her, by means of a simple regression analysis and concordance (d) and confidence (c) index with the ET_o FAO Penman-Monteith. They obtained the models of regression with better coefficients with the ET_o stimated_1 with the coefficients K_p calibrated as from the Class "A" pan equation. This showed index of concordance closer to 1. Confidence index they classified of this ET_o are classified like *good* and *intermediate*, which is why you constitute an optimal method, quickly and small change to utilize like tool for the irrigation management.

INTRODUCCIÓN

La ecuación de FAO Penman-Monteith es considerada el método estándar para la estimación de la evapotranspiración de referencia (Allen *et al.*, 2006; Martins *et al.*, 2014). Aunque ha demostrado un comportamiento adecuado de las predicciones en las regiones y condiciones climáticas más variadas (Puppo y García, 2009) tiene el inconveniente de necesitar una gran cantidad de datos climáticos no siempre disponibles (Sánchez, 2001).

Desde la década de 1970, se generalizó el uso del tanque evaporímetro clase “A” para determinar el momento de riego de diferentes cultivos, al ser la base para el pronóstico de riego por el método bioclimático (Bonet *et al.*, 2012). El método del tanque evaporímetro clase “A” tiene como ventaja su simplicidad, al medir los efectos integrados del clima a partir de una única medida: la evaporación de una superficie libre de agua. De la misma forma, los bajos costos de instalación y mantenimiento han propiciado su amplia utilización en proyectos y programaciones de riego (Sentelhas y Folegatti, 2003).

La evapotranspiración en las áreas cultivadas ocurre bajo el efecto de los mismos factores climáticos que propician la evaporación desde la superficie del tanque, pero una serie de elementos provocan diferencias, las cuales quedan corregidas al utilizar el coeficiente K_p (Puppo y García, 2009). Aunque este coeficiente, puede obtenerse con una ecuación indirecta empírica, es recomendable calibrar K_p a partir de la evapotranspiración obtenida por lisímetros o por la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006).

Por lo antes expuesto, el objetivo de este trabajo es calibrar el coeficiente K_p del tanque evaporímetro clase “A” para el cálculo de la evapotranspiración de referencia decenal en áreas agropecuarias del municipio de Mayarí en la provincia de Holguín.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló con los datos tomados, en el período 1990-2015, en dos estaciones meteorológicas de la provincia de Holguín: Guaro (20° 40' 21" N y 75° 46' 57" W), con una precipitación de 1 099.3 mm al año 25.6°C de temperatura media, a 21 msnmm y Pinares de Mayarí (20° 29' 14" N y 75° 47' 26" W), 1 871.0 mm de lluvia anuales, una temperatura media de 21.6°C, a 647 msnmm.

Se revisaron las bases de datos de las estaciones meteorológicas para encontrar datos faltantes y se realizó un análisis de correlación entre ambas para completar los datos faltantes mediante regresión. Los años comprendidos en el período estudiado (26 años) se dividieron en dos grupos de 13 años cada uno. Con los años pares se calibró el coeficiente K_p .

La evaporación del tanque evaporímetro clase “A” está relacionada con la evapotranspiración de referencia por un coeficiente empírico derivado del mismo tanque:

$$ET_c = K_p * E_{pan} \quad (1)$$

Donde ET_c es la evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹); K_p es el coeficiente del tanque evaporímetro clase “A” (adimensional) y E_{pan} es la evaporación del tanque evaporímetro (mm día⁻¹).

A partir de (1) se calcula el coeficiente del tanque evaporímetro clase “A”:

$$K_p = \frac{ET_c}{E_{pan}} \quad (2)$$

Al mismo tiempo se determinó el coeficiente K_p calculado por la ecuación propuesta por Allen *et al.* (2006):

$$K_p = 0.108 - 0.0286u_2 + 0.0422\ln(f_{et}) + 0.1434\ln(HR_m) - 0.000631[\ln(f_{et})]^2\ln(HR_m) \quad (3)$$

Donde u_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻²); f_{et} es el borde o distancia al borde de la superficie identificada, fijada en 1 000 m, que es la distancia máxima permitida para la estimación del coeficiente K_p (Allen *et al.*, 2006) y HR_m es la humedad relativa media (%).

La velocidad del viento u_z se mide a una altura estándar elegida para todas las estaciones meteorológicas (1 m), pero para calcular la evapotranspiración se necesita dicha variable climática medida a 2 m de altura; por lo que para ajustar los datos medidos se utilizó la relación logarítmica:

$$u_z = u_2 \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (4)$$

Donde u_z es la velocidad del viento medida a z m sobre la superficie (m s^{-2}) y z es la altura de medición sobre la superficie (10 m en ambas estaciones).

Los valores del coeficiente K_p obtenidos por la metodología de Allen *et al.* (2006) fueron comparados con los obtenidos a partir de la ecuación del tanque evaporímetro clase “A” para verificar si se adapta a las condiciones ambientales locales.

La evapotranspiración de referencia se estimó a partir de la ecuación FAO Penman-Monteith, propuesta por Allen *et al.* (2006):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (5)$$

Donde ET_o es la evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}); Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$); G es el flujo de calor del suelo, γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); T es la temperatura media del aire a 2 m de altura ($^\circ\text{C}$) y u_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-2}).

Con los años impares del período se validó la ET_o estimada con los coeficientes K_p determinados a partir de la ecuación del tanque evaporímetro clase “A” (ET_o estimada_1) y de la ecuación propuesta por Allen *et al.* (2006) (ET_o estimada_2). Se realizó un análisis de regresión simple y se determinaron los índices de concordancia y de confianza o desempeño.

Índice de concordancia (Index of agreement, d) (Wilmott, 1985):

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (ETi_e - ETi_m)^2}{\sum_{i=1}^n (|ETi_e - ETmean_m| + |ETi_m - ETmean_m|)^2} \right] \quad (6)$$

Donde n es el número de pares de datos, ETi_e es la i -enésima observación de la evapotranspiración estimada por el modelo a comparar, ETi_m es la i -enésima observación de la evapotranspiración estimada por el método de FAO Penman-Monteith y $ETmean_m$ es la media de la evapotranspiración estimada por el método de FAO Penman-Monteith. Es una medida estandarizada del grado de error de la predicción del modelo, en un rango desde 0 hasta 1. Cuando $d=1$, existe una concordancia perfecta entre los valores determinados experimentalmente y los estimados por el modelo; en sentido contrario, cuando $d=0$, nos indica falta de concordancia entre las variables.

Coefficiente de confianza o desempeño (c) (Camargo y Sentelhas, 1997):

$$c = d * r \quad (7)$$

Donde d es el índice de concordancia y r es el coeficiente de correlación. Los valores de c fueron clasificados de acuerdo a las categorías propuestas por Camargo y Sentelhas (1997).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra el promedio del coeficiente K_p determinado decenalmente a partir de la ecuación del tanque evaporímetro clase “A” aplicada a los años pares de la serie temporal estudiada. Los resultados

obtenidos fueron superiores a los observados por Bonet *et al.* (2012), quienes en el cultivo de la piña en la provincia de Ciego de Ávila encontraron valores del coeficiente K_p de 0.58 y 0.65 para los periodos seco y lluvioso, respectivamente.

Tabla 1.- Coeficientes K_p determinados a partir de la ecuación del tanque evaporímetro clase “A”.

Decenas	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Guaro												
Primera	0.66	0.66	0.64	0.65	0.67	0.70	0.68	0.67	0.68	0.71	0.71	0.70
Segunda	0.65	0.66	0.68	0.68	0.66	0.71	0.68	0.67	0.69	0.70	0.67	0.67
Tercera	0.63	0.65	0.67	0.73	0.70	0.69	0.66	0.65	0.67	0.72	0.65	0.63
Pinares de Mayarí												
Primera	0.69	0.71	0.72	0.79	0.83	0.85	0.79	0.82	0.79	0.75	0.70	0.68
Segunda	0.65	0.75	0.72	0.75	0.77	0.82	0.82	0.82	0.84	0.79	0.72	0.71
Tercera	0.67	0.74	0.73	0.84	0.83	0.82	0.77	0.76	0.84	0.75	0.71	0.69

Los valores del coeficiente K_p son, generalmente, más cercanos a 1 en Pinares de Mayarí que en Guaro; lo cual indica que existen menos diferencias entre los tenores de la evapotranspiración de referencia y la evaporación del tanque evaporímetro en la primera estación meteorológica mencionada.

La Figura 1 muestra las regresiones de las ET_o estimadas 1 y 2 con respecto a la evapotranspiración de referencia obtenida a partir de la ecuación de FAO Penman-Monteith. En ambas estaciones meteorológicas los valores estimados a partir del coeficiente K_p calibrado (ET_o estimada_1) mostró con los coeficientes K_p obtenidos

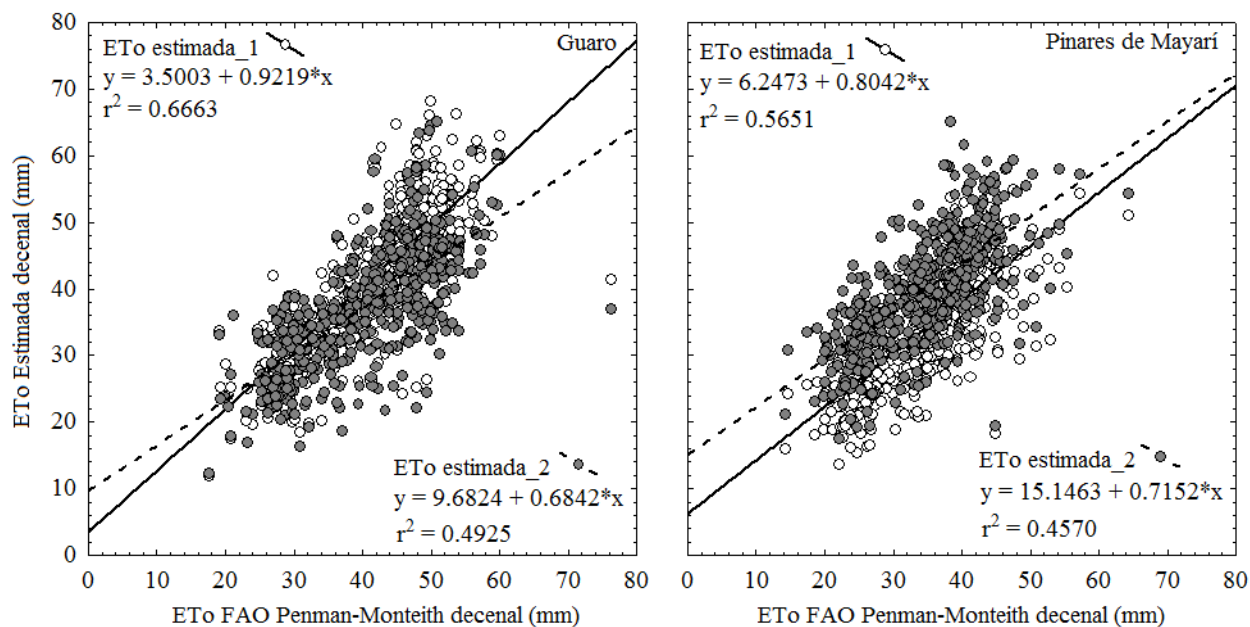


Figura 1.- Ecuaciones de regresión a partir de la evapotranspiración de referencia estimada por el método de FAO Penman-Monteith (regresora) y la ET_o estimada a partir de los coeficientes K_p (dependientes).

En el modelo de regresión lineal simple puede observarse que el parámetro que representa la pendiente de la recta (b) se encuentra en todos los casos por debajo de 1, lo que indica una tendencia a subestimar, por parte de las ET_o estimadas 1 y 2, los valores de evapotranspiración de referencia obtenidos por la ecuación patrón. No obstante, resulta válido señalar la mayor cercanía a la unidad, en el modelo de regresión de la ET_o estimada_1 para la estación meteorológica de Guaro, del parámetro b . Lo que revela una mayor

semejanza de los valores de la ETo estimada_1 con la evapotranspiración de referencia por el modelo FAO Penman-Monteith.

El comportamiento de la ETo estimada_2 durante el análisis de regresión difiere de lo observado por Andrade *et al.* (2016). Al estimar la evapotranspiración de referencia con la ecuación del tanque evaporímetro clase “A” mediante la utilización del coeficiente Kp a partir de la ecuación propuesta por Allen *et al.* (2006), con los datos medidos durante un periodo de 10 años en la estación meteorológica principal del municipio de Lavras (estado de Minas Gerais, Brasil), y compararla con la ETo por el método FAO Penman-Monteith encontraron un coeficiente de regresión de 0.9069.

De la misma forma, en la región medio-norte del estado de Mato Grosso (Brasil), Souza *et al.* (2015) al comparar la ETo obtenida a partir de la ecuación del tanque evaporímetro clase “A”, mediante la utilización de coeficiente Kp (Allen *et al.*, 2006), con la ETo de la ecuación FAO Penman-Monteith encontraron un coeficiente de regresión de 0.6226.

La Tabla 2 muestra el comportamiento de los índices utilizados para validar la evapotranspiración de referencia (ETo estimada_1 y ETo estimada_2) obtenida a partir del coeficiente Kp . Con respecto al índice de concordancia se aprecia que los valores más cercanos a 1 se encontraron en la ETo estimada_1 para las estaciones meteorológicas de Guaro y Pinares de Mayarí. En el caso de la ETo estimada_2 se determinó un menor índice de concordancia. Para las dos ETo estimadas, los mejores resultados se observaron en la estación meteorológica de Guaro.

Tabla 2.- Índices de concordancia y desempeño para las ETo estimadas en Guaro y Pinares de Mayarí.

Estaciones meteorológicas	ETo estimada 1		ETo estimada 2	
	Índice de concordancia	Índice de confianza	Índice de concordancia	Índice de confianza
Guaro	0.8949	0.7305	0.7984	0.5603
Pinares de Mayarí	0.8618	0.6478	0.7272	0.4916

En cuanto al índice de confianza, el mismo se clasificó para la ETo estimada_1 como *bueno* y *medio* en las estaciones meteorológicas de Guaro y Pinares de Mayarí, respectivamente. En el caso de la ETo estimada_2, el índice de confianza se ubicó en las categorías de *tolerable* y *pobre* para las estaciones meteorológicas mencionadas, en el mismo orden, anteriormente.

Souza *et al.* (2015) al evaluar diferentes metodologías de determinación del coeficiente Kp utilizados en la corrección de los valores del tanque evaporímetro clase “A” para la estimación de la evapotranspiración de referencia en la región de Sinop, estado de Mato Grosso (Brasil), encontraron mayores índices de concordancia (d) y de desempeño (c) para el coeficiente Kp directo que para el determinado a partir de la ecuación de Allen *et al.* (2006).

También, el comportamiento del coeficiente Kp determinado a partir de la ecuación propuesta por Allen *et al.* (2006) coincide con lo observado por Bonet *et al.* (2012), quienes encontraron diferencias significativas entre la ETo estimada con los coeficientes Kp mencionados anteriormente con respecto a la ETo estimada a partir de los coeficientes obtenidos por la ecuación del tanque evaporímetro clase “A”:

CONCLUSIONES

Los modelos de regresión con mejores coeficientes se obtuvieron en las dos estaciones meteorológicas con la ETo estimada_1 con los coeficientes Kp calibrados a partir de la ecuación del tanque evaporímetro clase “A”.

La ETo estimada_1 mostró, en ambas estaciones meteorológicas, los índices de concordancia más cercanos a 1. De la misma manera, los índices de confianza de esta ETo se clasificaron como *bueno* y *medio*.

La estimación de la evapotranspiración de referencia a partir de la ecuación del tanque evaporímetro clase “A”, mediante el uso de los coeficientes Kp calibrados por esta misma ecuación, constituye un método óptimo, rápido y sencillo. Por lo que puede constituir una herramienta adecuada para el manejo del riego.

REFERENCIAS

- Allen, R. G.; Doorenbos, J. y Monteith, L. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje, boletín 56. Roma, 298 pp.
- Andrade, A. D.; Miranda, W. L.; Carvalho, L. G. de; Figueiredo, P. H. F.; Silva, T. B. S. da. 2016. Desempenho de métodos de cálculo do coeficiente de tanque para estimativa da evapotranspiração de referencia. *Irriga*, 21 (1): 119-130.
- Bonet Pérez, C.; Brown Manrique, O. y Duarte Díaz, Carmen. 2012. Coeficiente de evaporímetro para la programación del riego. *Ingeniería Agrícola*, 2 (1): 26-30.
- Camargo, A. P. y Sentelhas, P. C. 1997. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 5: 89-97.
- Martins de Souza, J.; Rosa Pereira, L.; Matta Rafael, A. da; Dias da Silva, L.; Fialho dos Reis, E. y Bonomo, R. 2014. Comparison of methods for estimating reference evapotranspiration in two locations of Espirito Santo. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 8 (2): 114-126.
- Puppo, L. y García Petillo, M. 2009. Estimación de los coeficientes de tanque "A" para calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia en la zona sur del Uruguay. *Agrociencia*, 13 (2): 47-51.
- Sánchez Martínez, Marcela Inés. 2001. Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 28: 3-10.
- Sentelhas, P. y Folegatti, M. 2003. Class "A" pan coefficients (K_p) to estimate daily reference evapotranspiration (E_{To}). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7 (1): 111-115.
- Souza, A. P.; Almeida, F. T.; Arantes, K. R.; Martim, C. C. y Silva, J. O. 2015. Coeficientes de Tanque Classe A para estimativa da evapotranspiração de referência diária na região de transição Cerrado-Amazônica. *Scientia Plena*, 11 (5): 1-13.
- Willmott, C. J. 1985. On the validation of models. *Physical Geography*, 2: 84-194.