

Estudio comparativo de dos ecuaciones con respecto a Penman-Monteith FAO56 en Guanajuato

Daniel Hernández-Díaz^{1,*}
Ramón Arteaga-Ramírez²
Dora Ma. Sangerman-Jarquín³
Magdalena Francisco-Catarina¹

1 Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo-Hidrociencias. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. México. CP. 56230. (mag-0807@hotmail.com).

2 Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Texcoco, Estado de México. México. CP. 56230. (arteagar@correo.chapingo.mx).

3 Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Carretera Los Reyes-Texcoco km 13.5, Coatlinchan, Texcoco, Estado de México. México. CP. 56250. (sangerman.dora@inifap.gob.mx).

Autor para correspondencia: danner-diaz@hotmail.com.

Resumen

La estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_0) ha sido utilizada ampliamente en ingeniería de riego para calcular los requerimientos de agua de los cultivos. La correcta estimación de la ET_0 representa un paso clave en la planeación y manejo de los recursos hídricos. El método de Penman-Monteith FAO56 es recomendado por expertos como método estándar para estimar ET_0 , con la desventaja de que necesita de muchos datos de variables meteorológicas para su ejecución. El objetivo de este estudio fue estimar la evapotranspiración de referencia diaria por los métodos de Hargreaves-Samani (H-S) y Priestley-Taylor (P-T) durante el periodo 2001-2006 para cinco estaciones meteorológicas automáticas en el estado de Guanajuato, los resultados fueron comparados con los del método de Penman-Monteith FAO56 (P-M FAO56) para seleccionar el método alternativo más preciso y determinar la distancia a partir de cualquier estación, a la cual se pueden considerar válidos los datos de ET_0 estimados con cada uno de los métodos. La raíz del cuadrado medio del error (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2) se utilizaron para evaluar el desempeño de los métodos con respecto a P-M FAO56. Como resultado se encontró que Hargreaves-Samani es el mejor método alternativo para estimar ET_0 en las cinco estaciones, en el estado de Guanajuato. Las distancias que se determinaron a partir de una estación donde los datos de un método son válidos son: 93.02, 124.65 y 36.44 km para H-S, P-T y P-M FAO56, respectivamente.

Palabras clave:

evapotranspiración de referencia, Hargreaves-Samani, Priestley-Taylor.



Introducción

Actualmente la presión sobre el recurso agua aumenta día con día, y la demanda de agua para la agricultura es la principal causa en muchos países (Calera *et al.*, 2017); México no es la excepción, el mayor volumen concesionado para usos consuntivos es el agrícola con un 76%, donde el riego monopoliza la mayor parte (CONAGUA, 2018); de ahí que surja la necesidad de calcular los requerimientos de agua de los cultivos de una manera precisa para una buena planificación y gestión de los recursos hídricos, sobre todo en regiones áridas y semiáridas donde el consumo de agua por los cultivos es mayor y el ahorro de un pequeño porcentaje puede generar una mayor disponibilidad (Berengena y Gavilán, 2005).

En la producción agrícola, la medición de la evapotranspiración (ET) resulta esencial para determinar la demanda de agua de los cultivos (Bakhtiari *et al.*, 2011), la programación y diseño del riego (Lujano *et al.*, 2023). La ET es la combinación de dos procesos que transfieren grandes volúmenes de agua a la atmósfera: la evaporación del agua del suelo y la transpiración de las plantas (Niaghi *et al.*, 2021). La cuantificación de ET normalmente se basa en la determinación de la evapotranspiración de referencia (ET_0) (Bakhtiari *et al.*, 2011).

ET_0 se considera como la pérdida máxima de agua producto de la evapotranspiración en un campo cubierto por un cultivo de referencia; por ejemplo, pasto sin restricciones de agua (Babakos *et al.*, 2020). La ET_0 se puede estimar por una gran variedad de métodos, destacan aquellos que son prácticamente empíricos y se basan en correlaciones estadísticas entre ET_0 y una o más variables climáticas (Berengena y Gavilán, 2005).

De las diversas ecuaciones empíricas que existen para estimar ET_0 , la ecuación de Penman-Monteith FAO56 es la que se utiliza ampliamente en la actualidad y ha sido aceptada como método estándar (Lum *et al.*, 2017), diversos estudios han demostrado que la ecuación de Penman-Monteith proporciona estimaciones de ET_0 muy precisas en distintos ambientes (Berengena y Gavilán, 2005). La principal desventaja de la aplicación de Penman-Monteith FAO56 es la alta demanda de datos, ya que el método requiere datos de temperatura del aire, velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar.

Desafortunadamente, alrededor del mundo existen pocas estaciones meteorológicas donde se observen todos estos parámetros (Droogers y Allen, 2002), esa restrictiva se debe entre otras cosas, a que en las regiones o países subdesarrollados existe poca infraestructura y pocos recursos para monitorear de manera continua los datos, también debido a las diferencias en las políticas relacionadas con el tema entre diferentes países o regiones, por lo que resulta difícil encontrar una plataforma común de intercambio de datos, de modo que algunas observaciones existentes no están disponibles (Du y Sun, 2012).

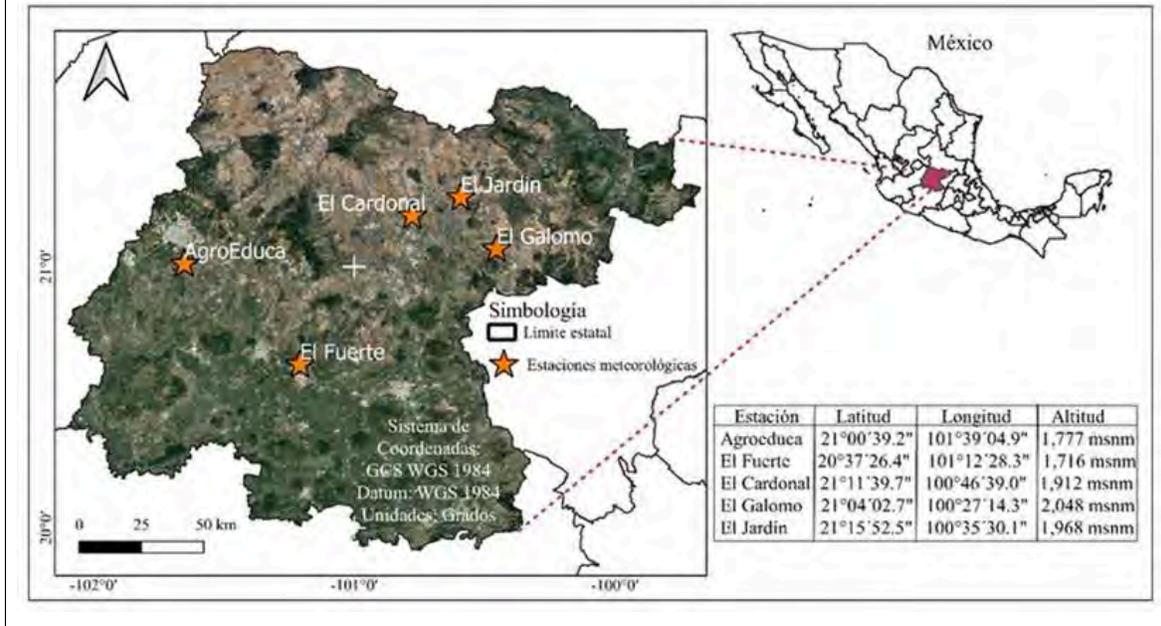
En el caso de México, la mayoría de las estaciones solo registran datos de temperatura del aire. Por lo anterior, existe una necesidad inminente de evaluar ecuaciones de ET_0 más simples y con una precisión similar con relación a la ecuación de Penman-Monteith FAO56. En atención a lo cual, el objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño para estimar ET_0 con Hargreaves-Samani (Hargreaves y Samani, 1985) y Priestley-Taylor (Priestley y Taylor, 1972) y compararlos con el método Penman-Monteith FAO56 (cuyos resultados se establecen como valores estimados estándar) para obtener un método alternativo para el estado de Guanajuato y determinar la distancia a partir de cierta estación meteorológica, donde los valores de un método son considerados como válidos.

Materiales y métodos

Localización de las estaciones automáticas de estudio

El presente estudio, se realizó con los datos de cinco estaciones meteorológicas automáticas ubicadas en el estado de Guanajuato, las estaciones se presentan en la Figura 1.

Figura 1. Localización de las estaciones automáticas en el estado de Guanajuato.



Información meteorológica

El periodo de estudio comprende del año 2001 al 2006, ya que es común para las cinco estaciones donde se cuenta con datos horarios de: temperatura del aire (°C), humedad relativa (%), velocidad del viento ($m s^{-1}$) y radiación solar ($MJ m^{-2}$). Todas las variables meteorológicas son medidas a una altura de 2 m.

La calidad de los datos de las series meteorológicas temporales de cada una de las estaciones se realizó de una manera visual, determinando que el comportamiento de cada una de las variables utilizadas fuera correcto, por ejemplo, que la temperatura presentara sus valor máximo o mínimo en los meses correspondientes. Una forma de determinar la calidad de datos sería compararlos con datos de estaciones convencionales que sería otro trabajo.

Método de Penman-Monteith FAO56 (P-M FAO56)

En mayo de 1990 un panel de expertos e investigadores en materia de riego fue organizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), en cooperación con la Comisión Internacional de Riego y Drenaje (ICID, por sus siglas en inglés) y con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), para revisar las metodologías para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos propuestas anteriormente por la FAO y con base a ello, realizar recomendaciones y actualizaciones de las mismas (Allen *et al.*, 2006).

El método Penman-Monteith FAO56 (P-M FAO56), se recomienda como el único método estándar para estimar la evapotranspiración de referencia con parámetros climáticos, y su ecuación es

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Donde ET_0 es la evapotranspiración de referencia en $mm día^{-1}$; Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor en $kPa °C^{-1}$; R_n es la radiación neta en la superficie de cultivo en $MJ m^{-2} día^{-1}$; G es el flujo de calor del suelo en $MJ m^{-2} día^{-1}$; γ simboliza la constante psicométrica ($kPa °C^{-1}$); T representa la temperatura media del aire a 2 m de altura en $°C$; u_2 es la velocidad del viento a 2

m de altura en $m s^{-1}$; e_a indica la presión real de vapor en kPa; e_s significa la presión de vapor de saturación en kPa y $e_s - e_a$ simboliza el déficit de presión de vapor en kPa.

Método de Hargreaves-Samani (H-S).

El modelo desarrollado por Hargreaves y Samani (1985) solo requiere datos de temperatura máxima y mínima del aire y radiación extraterrestre. La ecuación de Hargreaves-Samani 1985 (H-S) es la siguiente:

$$ET_0 = 0.0023 R_a (TC + 17.8) TD^{0.5}$$

Donde ET_0 es la evapotranspiración de referencia en $mm día^{-1}$; R_a representa la radiación solar extraterrestre en $mm día^{-1}$; TC indica la temperatura media diaria en $°C$ y TD es la diferencia entre la temperatura máxima diaria y la temperatura mínima diaria en $°C$.

Método de Priestley-Taylor (P-T)

El método Priestley-Taylor (1972) (P-T) es una fórmula que solo utiliza la radiación y la temperatura para el cálculo de ET_0 , calcula el componente ET_0 como una resultante directamente de la radiación, y lo aumenta con un coeficiente, que puede calibrarse de acuerdo con las condiciones locales (generalmente se utilizan valores 1.12 o 1.26) (Sheikh y Mohammadi, 2013):

$$ET_0 = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G)$$

Donde ET_0 es la evapotranspiración de referencia en $mm día^{-1}$; α es una constante derivada empíricamente (adimensional); Δ simboliza la pendiente de la curva de presión de vapor saturado a la temperatura promedio del aire en $kPa °C^{-1}$; γ representa la constante psicrométrica en $kPa °C^{-1}$; R_n es la radiación neta y G es el flujo de calor del suelo, ambas variables en $mm día^{-1}$.

Comparación entre métodos

Una primera comparación se realizó para evaluar los métodos de Hargreaves-Samani y Priestley-Taylor con respecto al método de Penman-Monteith FAO56 para seleccionar el mejor método en cada estación. Después, para cada estación se realizaron seis comparaciones, primero cada método contra sí mismo y después cada método contra los dos restantes, por lo que la combinación de las confrontaciones quedó de la siguiente manera: Penman-Monteith FAO56 vs Penman-Monteith FAO56, Penman-Monteith FAO56 vs Hargreaves-Samani, Penman-Monteith FAO vs Priestley-Taylor, Hargreaves-Samani vs Hargreaves-Samani, Hargreaves-Samani vs Priestley-Taylor y Priestley-Taylor vs Priestley-Taylor, lo anterior para determinar la distancia a partir de una estación donde los datos estimados de un método pueden considerarse como válidos.

Estadísticas y evaluación de los métodos

Se utilizó la raíz del cuadrado medio del error (RMSE) (Willmott, 1982), ya que este evalúa qué tan estrechamente coinciden las predicciones con las observaciones. Los valores pueden oscilar entre 0 (ajuste perfecto) y $+\infty$ (sin ajuste) según el rango relativo de los datos:

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

Donde n es el número de observaciones; O_i son valores observados o medidos; y P_i los valores predichos o estimados.

El coeficiente de determinación (R^2) (Tomas-Burguera *et al.*, 2017) denota la cantidad proporcional de variación en la variable de respuesta (y), explicada según la variable independiente (x) en el

modelo de regresión lineal, varía de 0 a 1, un valor de 0 indica que (x) no explica las variaciones de (y), mientras que un valor de 1 sugiere que (x) explica las variaciones totales de (y). Cuanto mayor sea el R^2 , mayor será la variabilidad explicada por el modelo de regresión lineal, por lo anterior se propuso el uso de este estadístico:

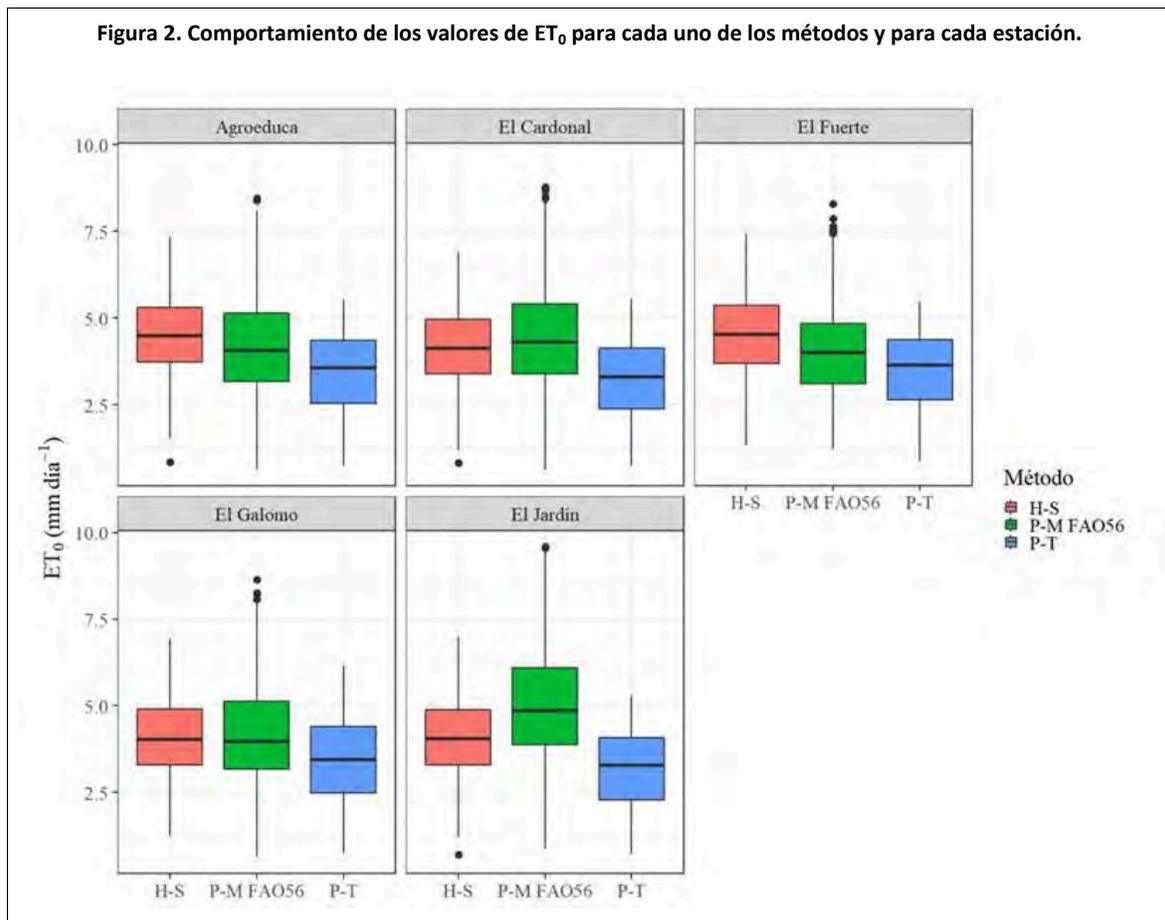
$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2$$

El significado de las variables usadas en el coeficiente de determinación (R^2) es el mismo que las del RMSE.

Resultados y discusión

Resumen estadístico

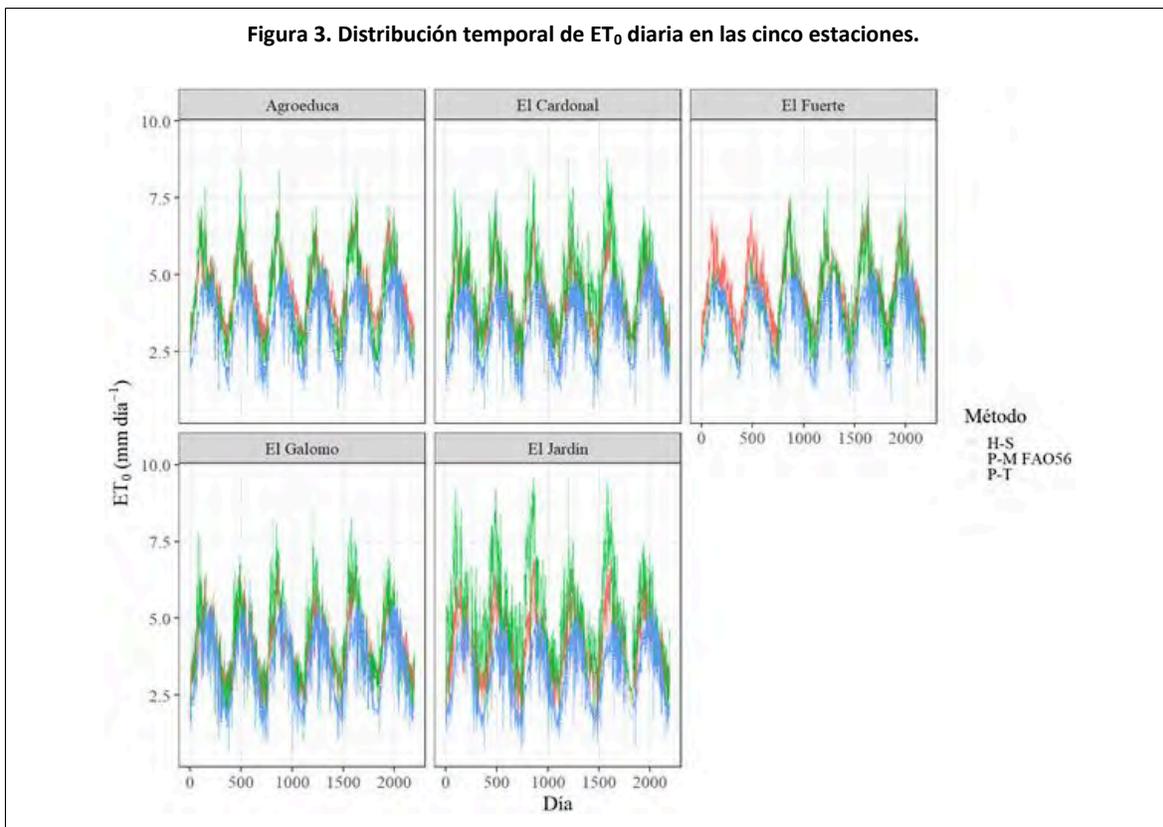
En la Figura 2, se aprecia la distribución y el comportamiento de los valores de ET_0 estimada para cada uno de los métodos en cada estación. Para las cinco estaciones, el método de P-M FAO56 presentó mayor variación en la distribución de los valores ya que el rango intercuartil o tamaño de la caja es mayor, también se observa que este método tiene mayor presencia de valores atípicos, sobre todo valores máximos, lo cual fue más notorio en la estación El Cardonal, El Fuerte y El Galomo; de manera contraria, el método de H-S fue el que expuso menor variación en la distribución de los valores de ET_0 para todas las estaciones.



De acuerdo con el valor de la media, la mediana y la posición del rango intercuartil, los valores más altos fueron arrojados por el método de H-S en las estaciones Agroeduca (4.57 y 4.5 mm día^{-1}) y El Fuerte (4.56 y 4.53 mm día^{-1}), mientras que en las estaciones El Cardonal (4.44 y 4.32 mm día^{-1}), El Galomo (4.16 y 3.99 mm día^{-1}) y El Jardín (5.03 y 4.87 mm día^{-1}) fue el método de P-M FAO56; en contraste, los valores más bajos fueron presentados por el método de P-T para las cinco estaciones (3.46 y 3.58 mm día^{-1} para Agroeduca, 3.28 y 3.31 mm día^{-1} para El Cardonal, 3.5 y 3.66 mm día^{-1} para El Fuerte, 3.45 y 3.45 mm día^{-1} para El Galomo, 3.22 y 3.29 mm día^{-1} para El Jardín) (Figura 2).

Distribución temporal de ET_0

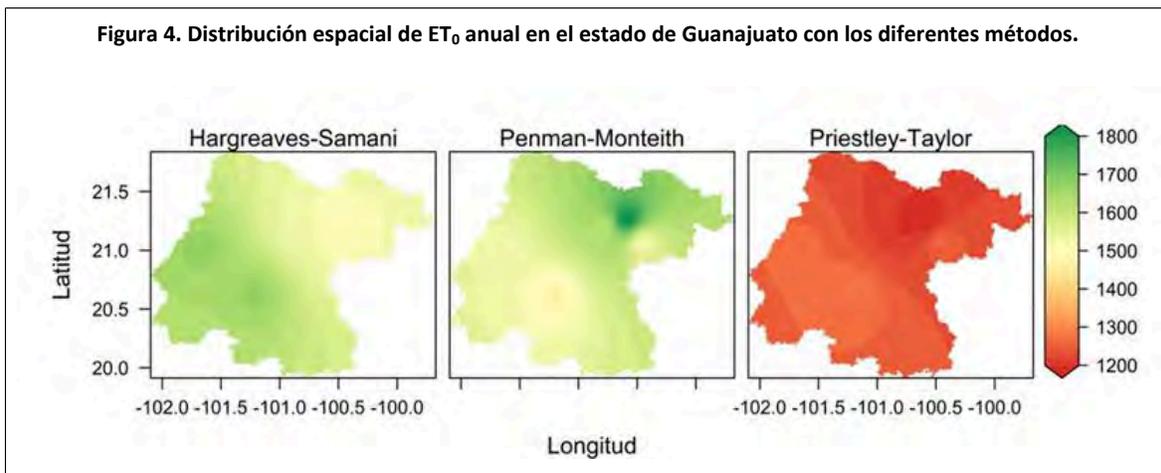
La distribución temporal de ET_0 diaria estimada con cada uno de los métodos se muestra en la Figura 3. En las estaciones Agroeduca y El Fuerte se visualiza que las curvas de los resultados de P-M FAO56 (línea verde) y H-S (línea roja) son similares, así como la distribución de las mismas; en las estaciones El Cardonal, El Galomo y El Jardín la curva de P-M FAO56 tiene los valores más altos, seguida de la curva de H-S, la diferencia es más marcada en la estación El Jardín, donde se observa la presencia de valores muy altos (≈ 9 mm día^{-1}) durante todo el periodo. Por otro lado, los valores más bajos para las cinco estaciones son presentados por P-T (línea azul).



En general, los tres métodos presentan la misma tendencia durante los 2 191 días que corresponden al periodo de estudio (2001-2006), también, se observa el comportamiento anual de los resultados de cada método; es decir, los valores al inicio de cada año son bajos y conforme pasan los días van en aumento hasta llegar al valor máximo ubicado aproximadamente a la mitad del año para empezar a disminuir y terminar con valores bajos al final del año muy parecidos a los del inicio de año.

Distribución espacial de ET_0

La Figura 4 expone la distribución espacial de ET_0 anual promedio en el estado de Guanajuato, la cual se obtuvo como un promedio de los valores anuales acumulados de los seis años de estudio. P-M FAO56 mostró los valores superiores con un rango que va de los 1 521 a los 1 841 $mm\ año^{-1}$, los valores más bajos se encontraron en la zona de influencia de la estación Agroeduca (zona de color claro), en tanto que los más altos se visualizan en la parte correspondiente a El Jardín (zona color verde).



Después de P-M FAO56 sigue H-S con un rango de valores entre 1 503 y 1 669 $mm\ año^{-1}$, los valores mayores de este método se concentran en la mitad del estado (color verde) pequeños (color claro) están influenciados por las estaciones El Cardonal, El Jardín y El Galomo. Por último, P-T mostró los valores más bajos (1 176-1 281 $mm\ año^{-1}$) respecto a los otros métodos, los valores altos de P-T se presentaron en la mayor parte del estado (color claro) y es que en esta parte tienen influencia tres estaciones (Agroeduca, El Fuerte y El Galomo), por otro lado, los valores bajos se observaron en la estación El Jardín, principalmente donde se ubican las estaciones Agroeduca y El Fuerte.

Penman-Monteith FAO56 vs H-S y P-T

La evaluación de los métodos de H-S y P-T se realizó con el valor de RMSE y el de R^2 (Cuadro 1). En la estación Agroeduca y El Fuerte, H-S destacó en su rendimiento, ya que obtuvo un valor de RMSE de 0.68 $mm\ día^{-1}$ y R^2 de 0.82 y RMSE de 0.8 $mm\ día^{-1}$ y R^2 de 0.75, respectivamente, aunque en esta última estación los valores del método de P-T fueron muy similares (RMSE= 0.81 $mm\ día^{-1}$ y $R^2= 0.74$).

En El Cardonal, H-S presentó el mejor desempeño con valores de 0.72 $mm\ día^{-1}$ y 0.78 para RMSE y R^2 , respectivamente. En las dos estaciones restantes, también el método de H-S sobresale con respecto a P-T, en la estación El Galomo H-S obtuvo un RMSE de 0.7 $mm\ día^{-1}$ y una R^2 de 0.72; en El Jardín, el RMSE fue de 1.25 $mm\ día^{-1}$ y R^2 de 0.75.

Cuadro 1. Análisis estadístico para la comparación de los métodos empíricos H-S y P-T para estimar ET_0 diaria con relación al método estándar P-M FAO56 para las cinco estaciones.

Estación	Método	RMSE ($mm\ día^{-1}$)	R^2
Agroeduca	Hargreaves-Samani	0.68	0.82
	Priestley-Taylor	1.02	0.7
El Fuerte	Hargreaves-Samani	0.8	0.75
	Priestley-Taylor	0.81	0.74

Estación	Método	RMSE (mm día ⁻¹)	R ²
El Cardonal	Hargreaves-Samani	0.72	0.78
	Priestley-Taylor	1.46	0.6
El Galomo	Hargreaves-Samani	0.7	0.72
	Priestley-Taylor	1.03	0.68
El Jardín	Hargreaves-Samani	1.25	0.75
	Priestley-Taylor	2.14	0.48

RMSE= raíz del cuadrado medio del error; R²= coeficiente de determinación (adimensional).

En las cinco estaciones el método de H-S mostró mejor desempeño con respecto al método estándar de P-M FAO56, resultados similares han sido registrados por diversos autores donde han evaluado métodos empíricos con el método de P-M FAO56: Tabari (2010) indica que H-S (R²= 0.93 y RMSE= 1.26 mm día⁻¹ promedio) es mejor estimador de ET₀ que P-T (R²= 0.92 y RMSE= 1.8 mm día⁻¹) en diferentes climas en Irán; Sabziparvar y Tabari (2010) señalan que H-S (R²= 0.96 y RMSE= 20.19 mm mes⁻¹ promedio) tiene mejor desempeño que P-T (R²= 0.94 y RMSE= 58.46 mm mes⁻¹) en la estimación de ET₀ en las regiones áridas y semiáridas del oriente de Irán; Sheikh y Mohammadi (2013) encontraron que H-S obtuvo menor diferencia que P-T al compararlos con P-M FAO56; Bourletsikas *et al.*, (2017) determinaron que H-S exhibió un mejor rendimiento que P-T en un bosque mediterráneo en Grecia; mientras que Lang *et al.*, (2017) puntualizaron que H-S fue mejor que P-T para estimar ET₀ en el suroeste de China.

Comparación entre métodos

Para determinar la distancia a partir de una estación, a la que un método puede considerarse como válido, se evaluaron los valores de RMSE y R², Ventura *et al.*, (1999) señala que un valor de RMSE menor a 50 W m⁻² (1.76 mm día⁻¹) es aceptable para fines prácticos, en el caso de R² se aceptaron aquellos casos donde R² ≥ 0.8 de acuerdo a Lang *et al.*, (2017).

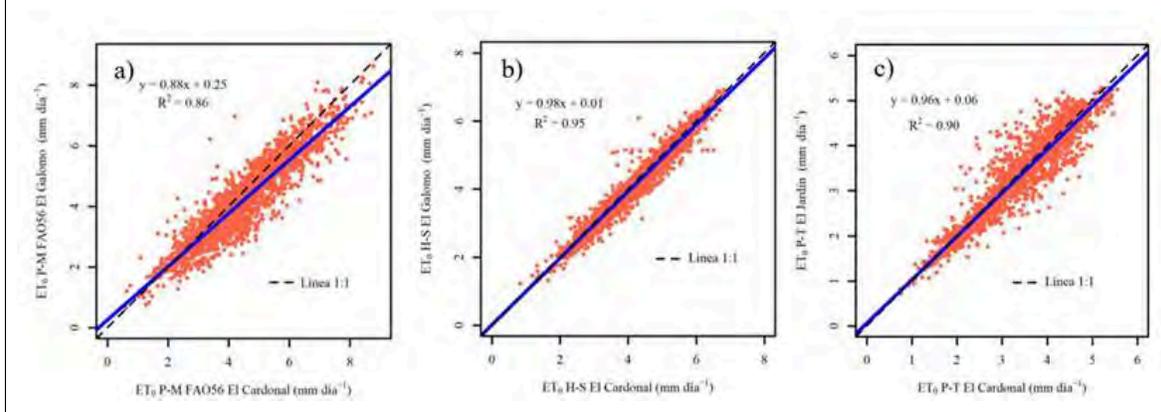
Se hizo una comparación entre los mismos métodos, con ello se obtuvieron diez combinaciones (Cuadro 2). Al comparar P-M FAO56 vs P-M FAO56 el mejor ajuste resultó de la confrontación de la estación El Cardonal y El Galomo con el valor más bajo de RMSE (0.6 mm día⁻¹) y con el valor más alto de R² (0.86), por lo que cumple con la condición de aceptación y se toma una distancia de 36.44 km, en la Figura 5a se observa que esta comparación se acerca a línea 1:1.

Cuadro 2. Análisis estadístico para la comparación entre los mismos métodos.

Estación 1	Estación 2	Distancia (km)	P-M vs P-M				H-S vs H-S		P-T vs P-T	
			RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²		
Agroeduca	El Fuerte	62.99	0.69	0.73	0.36	0.89	0.35	0.88		
Agroeduca	El Cardonal	93.06	0.76	0.74	0.52	0.89	0.45	0.85		
Agroeduca	El Galomo	124.65	0.72	0.72	0.61	0.86	0.47	0.81		
Agroeduca	El Jardín	113.63	1.23	0.68	0.65	0.83	0.49	0.84		
El Fuerte	El Cardonal	77.43	0.97	0.61	0.57	0.84	0.48	0.83		
El Fuerte	El Galomo	92.58	0.8	0.65	0.65	0.82	0.48	0.81		
El Fuerte	El Jardín	95.62	1.51	0.5	0.68	0.79	0.52	0.82		
El Cardonal	El Galomo	36.44	0.6	0.86	0.24	0.95	0.43	0.87		
El Cardonal	El Jardín	20.8	0.9	0.82	0.28	0.94	0.33	0.9		
El Galomo	El Jardín	26.11	1.14	0.79	0.30	0.92	0.43	0.89		

P-M= Penman-Monteith FAO56; H-S= Hargreaves-Samani; P-T= Priestley-Taylor; RMSE= raíz del cuadrado medio del error (mm día⁻¹); R²= coeficiente de determinación (adimensional).

Figura 5. Regresión lineal entre los valores de ET_0 : a) El Cardonal (P-M FAO56) vs El Galomo (P-M FAO56); b) El Cardonal (H-S) vs El Galomo (H-S); c) El Cardonal (P-T) vs El Jardín (P-T).



En la comparación H-S vs H-S, el mejor desempeño se obtuvo entre El Cardonal y El Galomo, el ajuste casi perfecto se puede visualizar en la Figura 5b, donde se aprecia que el modelo de ajuste casi coincide con la línea 1:1; todas las combinaciones satisfacen la condición antes mencionada, a excepción de El Fuerte y El Jardín, por lo que se toma la distancia menor a la distancia que hay entre ellas (95.62 km), así queda definida una distancia de 93.06 km.

En la tercera comparación (P-T vs P-T), al contrastar la estación El Cardonal y El Jardín se encontró el valor más bajo de RMSE (0.33 mm día^{-1}) con una R^2 de 0.9, dicho ajuste se aprecia en la Figura 5c, donde todas las combinaciones satisfacen la condición de aceptación, por lo que todas las distancias son válidas y se toma la más grande (124.65 km).

Referente a las comparaciones entre diferentes métodos, se obtuvieron 25 combinaciones para cada una (Cuadro 3). Solo una combinación cumplió con las condiciones de aceptación y fue Agroeduca (P-M FAO56) con Agroeduca (H-S), pero, como la distancia entre estaciones fue de 0 km no se consideró válida.

Cuadro 3. Análisis estadístico para la comparación entre diferentes métodos.

Estación 1	Estación 2	Distancia (km)	P-M vs H-S		P-M vs P-T		P-T vs P-T	
			RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2
Agroeduca	Agroeduca	0	0.68	0.82	1.02	0.7	1.26	0.7
Agroeduca	El Fuerte	62.99	0.74	0.76	1.03	0.65	1.22	0.69
Agroeduca	El Cardonal	93.06	0.73	0.68	1.21	0.62	1.42	0.7
Agroeduca	El Galomo	124.65	0.76	0.66	1.06	0.65	1.28	0.69
Agroeduca	El Jardín	113.63	0.78	0.64	1.26	0.61	1.49	0.67
El Fuerte	Agroeduca	62.99	0.83	0.72	0.91	0.66	1.26	0.69
El Fuerte	El Fuerte	0	0.8	0.75	0.81	0.74	1.18	0.77
El Fuerte	El Cardonal	77.43	0.79	0.59	1.04	0.65	1.42	0.68
El Fuerte	El Galomo	92.58	0.8	0.58	0.92	0.65	1.27	0.69
El Fuerte	El Jardín	95.62	0.83	0.55	1.09	0.63	1.49	0.66
El Cardonal	Agroeduca	93.06	0.71	0.76	1.4	0.49	0.98	0.64
El Cardonal	El Fuerte	77.43	0.77	0.7	1.37	0.49	0.93	0.65
El Cardonal	El Cardonal	0	0.72	0.78	1.46	0.6	1.09	0.7
El Cardonal	El Galomo	36.44	0.78	0.75	1.33	0.6	0.97	0.68
El Cardonal	El Jardín	20.8	0.79	0.74	1.54	0.54	1.17	0.65
El Galomo	Agroeduca	124.65	0.82	0.71	1.18	0.48	0.95	0.61

Estación 1	Estación 2	Distancia (km)	P-M vs H-S		P-M vs P-T		P-T vs P-T	
			RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²
El Galomo	El Fuerte	92.58	0.85	0.68	1.14	0.5	0.9	0.62
El Galomo	El Cardonal	36.44	0.73	0.7	1.24	0.57	1.05	0.66
El Galomo	El Galomo	0	0.7	0.72	1.03	0.68	0.92	0.67
El Galomo	El Jardín	26.11	0.75	0.68	1.28	0.56	1.12	0.63
El Jardín	Agroeduca	113.63	1.03	0.69	2	0.39	0.98	0.59
El Jardín	El Fuerte	95.62	1.08	0.64	1.94	0.42	0.93	0.61
El Jardín	El Cardonal	20.8	1.23	0.71	2.11	0.46	1.07	0.64
El Jardín	El Galomo	26.11	1.29	0.71	1.93	0.51	0.96	0.63
El Jardín	El Jardín	0	1.25	0.75	2.14	0.48	1.13	0.62

P-M= Penman-Monteith FAO56; H-S= Hargreaves-Samani; P-T= Priestley-Taylor; RMSE= raíz del cuadrado medio del error (mm día⁻¹); R²= coeficiente de determinación (adimensional).

Conclusiones

Se estimó la evapotranspiración de referencia (ET_0) con los métodos de Penman-Monteith FAO56 (P-M FAO56), Hargreaves-Samani (H-S) y Priestley-Taylor (P-T) para cinco estaciones automáticas en el estado de Guanajuato para periodos diarios; se encontró que el método de P-M FAO56 presentó una mayor variación en la distribución de los valores estimados de ET_0 en todas las estaciones, mientras que H-S es el que tuvo menos variación.

Después de comparar los datos estimados con H-S y P-T contra P-M FAO56, se precisa que el método de H-S es el mejor método alternativo para estimar ET_0 en las cinco estaciones, ya que sus valores son los que más se aproximan a los estimados con P-M FAO56; por lo anterior, el método de H-S se puede adoptar como un método alternativo para estimar la ET_0 en el estado de Guanajuato. En la comparación entre métodos, para P-T vs P-T se definió una distancia de 124.65 km a partir de cualquier estación donde los datos estimados con P-T pueden ser considerados como válidos, para H-S vs H-S se concretó una distancia de 93.02 km y P-M FAO56 vs P-M FAO56 la distancia fue de 36.44 km.

Bibliografía

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. y Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Estudio FAO Riego y Drenaje. Boletín 56. Roma, Italia. 298 p.
- Babakos, K.; Papamichail, D. M.; Tziachris, P.; Pisinaras, V.; Demertzi, K. and Aschonitis, V. G. 2020. Assessing the robustness of pan evaporation models for estimating reference crop evapotranspiration during recalibration at local conditions. *Hydrology*. 7(3):62-78.
- Bakhtiari, B.; Ghahreman, N.; Liaghat, A. M. and Hoogenboom, G. 2011. Evaluation of reference evapotranspiration models for a semiarid environment using lysimeter measurements. *J. Agr. Sci. Tech.* 13(2):223-237.
- Berengena, J. and Gavilán, Z. P. 2005. Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment. *J. Irrig. Drain Eng.* 131(2):147-163.
- Bourletsikas, A.; Argyrokastritis, I. G. and Proutsos, N. D. 2017. Comparative evaluation of 24 reference evapotranspiration equations applied on an evergreen broadleaved forest. *Hydrol. Res.* 49(4):1028-1041.
- Calera, B. A.; Campos, R. I.; Ossan, J. A.; D'Urso, G. and Menenti, M. 2017. Remote sensing for crop water management: from et modelling to services for the end users. *Sensors*. 17(5):1-25.

- 7 CONAGUA. 2018. Estadísticas del agua en México. Ciudad de México, México. 73-99 pp.
- 8 Droogers, P. and Allen, R. G. 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrig. Drain. Systems*. 16(1):33-45.
- 9 Du, J. P. and Sun, R. 2012. Estimation of evapotranspiration for ungauged areas using MODIS measurements and GLDAS data. *Procedia Environ. Sci.* 13(2011):1718-1727.
- 10 Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. 1985. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. *App. Eng. Agric.* 1(2):96-99.
- 11 Lang, D.; Zheng, J.; Shi, J.; Liao, F.; Ma, X.; Wang, W.; Chen, X. and Zhang, M. 2017. A comparative study of potential evapotranspiration estimation by eight methods with fao penman monteith method in southwestern China. *Water*. 9(10):1-18.
- 12 Lujano, L. A.; Sanchez-Delgado, M. and Lujano, L. E. 2023. Improvement of Hargreaves-Samani reference evapotranspiration estimates in the Peruvian Altiplano. *Water* . 15(7):1-16.
- 13 Lum, M.; Bateni, S. M.; Shiri, J. and Keshavarzi A. 2017. Estimation of reference evapotranspiration from climatic data. *Int. J. Hydro.* 1(1):25-30.
- 14 Niaghi, A. R.; Hassanijalilian, O. and Shiri, J. 2021. Estimation of reference evapotranspiration using spatial and temporal machine learning approaches. *Hydrology* . 8(1):25-39.
- 15 Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *MWR*. 100(2):81-92.
- 16 Sabziparvar, A. A. and Tabari, H. 2010. Regional Estimation of Reference Evapotranspiration in Arid and Semiarid Regions. *J. Irrig. Drain. Eng.* 136(10):724-731.
- 17 Sheikh, V. B. and Mohammadi, M. 2013. Evaluation of reference evapotranspiration equations in semi-arid regions of northeast of Iran. *Intl. J. Agri. Crop Sci.* 5(5):450-456.
- 18 Tabari, H. 2010. Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates. *Water Resour. Manage.* 24(10):2311-2337.
- 19 Tomas-Burguera, M.; Vicente-Serrano, S. M.; Grimalt, G. M. and Beguería, P. S. 2017. Accuracy of reference evapotranspiration (ET_0) estimates under data scarcity scenarios in the Iberian Peninsula. *Agric. Water Manag.* 182:103-116.
- 20 Ventura, F.; Spano, D.; Duce, P. and Snyder, R. L. 1999. An evaluation of common evapotranspiration equations. *Irrig. Sci.* 18(4):163-170.
- 21 Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 63(11):1309-1313.



Estudio comparativo de dos ecuaciones con respecto a Penman-Monteith FAO56 en Guanajuato

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 August 2024
Date accepted: 01 October 2024
Publication date: 06 November 2024
Publication date: Oct-Nov 2024
Volume: 15
Issue: 7
Electronic Location Identifier: e2838
DOI: 10.29312/remexca.v15i7.2838

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

evapotranspiración de referencia

Hargreaves-Samani

Priestley-Taylor

Counts

Figures: 5

Tables: 3

Equations: 5

References: 21

Pages: 0