

CALIBRACIÓN DEL EXPONENTE DE LA ECUACIÓN HARGREAVES-ET₀ EN LOS ESTADOS DE CHIAPAS, OAXACA, PUEBLA Y VERACRUZ, MÉXICO

EXPONENT CALIBRATION OF HARGREAVES-ET₀ EQUATION IN THE STATES OF CHIAPAS, OAXACA, PUEBLA AND VERACRUZ, MÉXICO

Henry A. Kelso-Bucio^{1*}, Khalidou M. Bâ¹, Saúl Sánchez-Morales², Delfino Reyes-López³

¹Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería, Centro Interamericano de Recursos del Agua, Cerro de Coatepec, Ciudad Universitaria, 50130, Toluca, Estado de México, México. (arturokb@yahoo.com.mx). ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campus Ixtacuaco, km 4.5 Carretera Martínez de la Torre-Tlapacoyan, Colonia Rojo Gómez, 93600, Tlapacoyan, Veracruz, México. ³Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Escuela de Ingeniería Agrohidráulica, San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México.

RESUMEN

En este estudio se realizó una recalibración del exponente empírico (HE) de la ecuación Hargreaves-ET₀ (HG) para obtener resultados apropiados en la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET₀). La ecuación HG fue seleccionada debido a su simpleza, ya que para estimar ET₀ solo requiere un mínimo de variables climatológicas, comúnmente disponibles en todas las estaciones meteorológicas. El objetivo de este estudio fue recalibrar el exponente HE de la ecuación Hargreaves-ET₀ para diferentes localidades de la república mexicana. También se compararon los métodos HG y HG corregido (HG_{HE}) para definir la mejora en la predicción de ET₀. Los datos meteorológicos usados provienen de la Red Nacional de Modelaje y Sensores Remotos (LNMySR) del INIFAP de cinco estaciones del estado de Chiapas, nueve del estado de Oaxaca, 16 del estado de Puebla y siete del estado de Veracruz. En la comparación de los métodos de HG y HG_{HE} se analizaron los indicadores del sesgo medio del error (MBE), error relativo (RE), error cuadrático medio (RMSE), desviación estándar del error (SEE), índice de correspondencia (D) y el cociente entre ambas estimaciones promedio de ET₀ ($\bar{r}$). Los resultados indican una mejora significativa en la estimación ET₀ a intervalos diarios mediante HG_{HE} y una reducción en la sobrestimación o subestimación producida por HG sin correcciones en su exponente. El SEE promedio fue inferior a 1.0 mm d⁻¹ con respecto al método de Penman Monteith (PM).

Palabras claves: evapotranspiración de referencia, Penman Monteith, Hargreaves.

ABSTRACT

A recalibration was made of the empirical exponent (HE) of the Hargreaves-ET₀ equation (HG) to obtain appropriate results in the estimation of reference evapotranspiration (ET₀). The HG equation was selected due to its simplicity, given that to estimate ET₀, only a minimum of climatological variables are required, commonly available in all of the meteorological stations. The objective of the present study was to recalibrate the HE exponent of the Hargreaves-ET₀ equation for different localities of the Mexican republic. In addition the HG and corrected HG (HG_{HE}) methods were compared to define the improvement in ET₀ prediction. The meteorological data used are from the National Network of Modeling and Remote Sensors (LNMySR) of the INIFAP from five stations of the state of Chiapas, nine from the state of Oaxaca, 16 from the state of Puebla and seven from the state of Veracruz. In the comparison of the methods of HG and HG_{HE}, an analysis was made the indicators of the mean bias of the error (MBE), relative error (RE), mean square error (RMSE), standard deviation of the error (SEE), correspondence index (D) and the quotient between both average estimations of ET₀ ($\bar{r}$). Results indicate a significant improvement in the ET₀ estimation at daily intervals by means of HG_{HE} and a reduction in the overestimation or underestimation produced by HG without corrections in its exponent. The average SEE was lower than 1.0 mm d⁻¹ with respect to the method of Penman Monteith (PM).

Key words: reference evapotranspiration, Penmen Monteith, Hargreaves.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: agosto, 2011. Aprobado: febrero, 2012.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 46: 221-229. 2012.

INTRODUCCIÓN

Uno de los componentes claves en los estudios hidrológicos es la evapotranspiración de referencia (ET_o), usada para la programación de riego, la planificación agrícola o los balances hídricos regionales; la ET_o se puede estimar mediante métodos directos e indirectos. Dentro de los métodos indirectos destacan los empíricos y semiempíricos los cuales usan datos meteorológicos, y estos métodos incluyen ecuaciones de balance de energía complejas que requieren un número mayor de variables climatológicas, o ecuaciones simples que usan un mínimo de variables meteorológicas (Hargreaves y Samani, 1985). Actualmente, el método de precisión mayor para estimar ET_o es la ecuación de Penman Monteith (PM), también conocida como FAO-56PM (Allen *et al.*, 1998).

La estimación de ET_o con la ecuación de PM requiere diferentes variables climatológicas y resolver ecuaciones con complejidad diversa. Cuando no hay la información climatológica que permita usar PM se recomienda el método de Hargreaves y Samani (HG) para predecir ET_o, el cual sólo requiere datos de temperatura máxima y mínima, usualmente disponibles en las estaciones meteorológicas (Allen *et al.*, 1998; Campos, 2005). La ecuación HG proporciona estimaciones confiables para intervalos de tiempo semanal o mensual y los resultados se pueden mejorar haciendo ajustes regionales a sus coeficientes (Jensen *et al.*, 1997; Droogers y Allen, 2002; Hargreaves y Allen, 2003).

La recalibración se puede realizar al exponente empírico (HE), al de temperatura (HT) o al de Hargreaves (HC). Allen (1993) recalibró los tres coeficientes originales y generó valores nuevos (HC=0.003, HT=20 y HE=0.4), mientras que Droogers y Allen (2002) reajustaron los coeficientes y también propusieron valores nuevos (HC=0.0025, HT=16.8 y HE=0.5).

Allen *et al.* (1994) usaron una regresión lineal simple para la calibración regional de la ecuación de Hargreaves, la cual sobrestimó en 13 % la ET_o calculada con el método FAO-56PM. Sin embargo, Trajkovic (2007) comparó los métodos de PM y HG corregido por su exponente HE con datos del sureste de Europa en la región de Western Balkan, proponiendo un HE=0.424, el cual sobrestimó ET_o en las zonas húmedas con respecto a PM. También Tabari

INTRODUCTION

One of the key components in hydrological studies is reference evapotranspiration (E_{to}), used for the programming of irrigation, agricultural planning or regional hydric balances, the E_{to} can be estimated through direct or indirect methods. Within the indirect methods, the empirical and semi-empirical methods are outstanding. They use meteorological data, and these methods include complex energy balance equations which require a larger number of climatological variables, or simple equations that use a minimum of meteorological variables (Hargreaves and Samani, 1985). Presently the method of highest precision for estimating E_{to} is the Penman Monteith equation (PM), also known as FAO-56PM (Allen *et al.*, 1998).

The estimation of E_{to} with the PM equation requires different climatological variables and resolving equations with diverse degrees of complexity. When the climatological information required for using the PM is not available, the Hargreaves and Samani (HG) method is recommended for predicting E_{to}, which only requires data of maximum and minimum temperature, usually available in the meteorological stations (Allen *et al.*, 1998; Campos, 2005). The HG equation provides reliable estimations for weekly or monthly time intervals and the results can be improved making regional fits to its coefficients (Jensen *et al.*, 1997; Droogers and Allen, 2002; Hargreaves and Allen, 2003).

Recalibration can be applied to the empirical exponent (HE), that of temperature (HT) or Hargreaves (HC). Allen (1993) recalibrated the three original coefficients and generated new values (HC=0.003, HT=20 and HE=0.4), while Droogers and Allen (2002) readjusted the coefficients and also proposed new values (HC=0.0025, HT=16.8 and HE=0.5).

Allen *et al.* (1994) used a simple linear regression for the regional calibration of the Hargreaves equation, which overestimated the E_{to} by 13 % calculated with the FAO-56PM method. However, Trajkovic (2007) compared the methods of PM and HG corrected by their HE exponent with data of southeastern Europe in the Western Balkan region, providing an HE=0.424, which overestimated E_{to} in the humid zones with respect to PM. Tabari and Talace (2011)

y Talae (2011) efectuaron una calibración de Hargreaves en regiones de clima árido y frío de Irán, y propusieron valores de HC (0.0031) para clima árido y (0.0028) para clima frío. Por tanto, una alternativa para mejorar la estimación de ET₀ mediante HG consiste en la calibración regional del método usando valores meteorológicos locales (Trajkovic, 2005).

El objetivo de la presente investigación fue recalibrar el exponente HE y estimar ET₀ mediante el método de Hargreaves corregido por su exponente HE (HG_{HE}), así como comparar los métodos de HG y HG_{HE} para mejorar la precisión de ET₀ con base en PM.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para este estudio se usaron datos de 37 estaciones meteorológicas ubicadas en los estados de Chiapas (5), Oaxaca (9), Puebla (16) y Veracruz (7) (Cuadro 1). Además, los coeficientes HT y HC se mantuvieron en sus valores originales (17.8 y 0.0023) sugeridos por Hargreaves y Samani (1985). La calibración del exponente HE se desarrolló por estación y de manera regional, a intervalos de 24 h para obtener una mayor precisión en la estimación de ET₀ y así evaluar HG en la escala temporal menor recomendada. Los datos meteorológicos requeridos, temperaturas máxima y mínima y evapotranspiración, fueron los de la Red Nacional de Modelaje y Sensores Remotos (LNMySR) del INIFAP.

Recalibración del exponente de Hargreaves

El método de referencia usado para comparar los resultados de HG y HG_{HE} fue FAO-56PM, el cual es confiable para estimar ET₀ y recomendado por la FAO para comparar los diferentes métodos empíricos.

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

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

El método de HG se obtuvo mediante regresión de parámetros climáticos a través de la cual se puede predecir correctamente

also carried out a Hargreaves calibration in regions of arid and cold climate of Iran, and proposed values of HC (0.0031) for arid climate and (0.0028) for cold climate. Therefore, an alternative for improving the estimation of ET₀ by means of HG consists of the regional calibration of the method using local meteorological values (Trajkovic, 2005).

The objective of the present investigation was to recalibrate the HE exponent and estimate ET₀ by means of the Hargreaves method corrected by its exponent HE (HG_{HE}), as well as to compare the methods of HG and HG_{HE} to improve the precision of ET₀ based on PM.

MATERIALS AND METHODS

The data used in this study was from 37 meteorological stations located in the states of Chiapas (5), Oaxaca (9), Puebla (16) and Veracruz (7) (Table 1). Furthermore, the HT and HC coefficients were maintained in their original values (17.8 and 0.0023) suggested by Hargreaves and Samani (1985). The calibration of the HE exponent was developed by station and region, at intervals of 24 h to obtain greater precision in the estimation of the ET₀ and thus be able to evaluate HG in the smallest recommended temporal scale. The meteorological data required, maximum and minimum temperatures and evapotranspiration, were those of the National Network of Modeling and Remote Sensing (LNMySR) of the INIFAP.

Recalibration of the Hargreaves exponent

The reference method used to compare the results of HG and HG_{HE} were FAO-56PM, which is reliable for estimating ET₀ and recommended by the FAO for comparing the different empirical methods.

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

where PM is the reference evapotranspiration (mm d^{-1}), R_n is the net radiation on the crop surface ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G is the heat flow from the soil ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), T is the mean air temperature ($^{\circ}\text{C}$), u_2 is the wind velocity at 2 m height (m s^{-1}), e_s is the vapor pressure at saturation (kPa), e_a is the real vapor pressure (kPa), Δ is the slope of the vapor pressure curve ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ is the psychrometric constant ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

The HG method was obtained by means of regression of climatic parameters through which 94 % of the evapotranspiration

Cuadro 1. Estaciones climáticas utilizadas en el estudio.**Table 1. Climatic stations used in the study.**

Estado	Estación	Municipio	Altitud (m)	Latitud (°N)	Periodo
Chiapas	Buena Vista	Mazatlán	44	14.89	2007-2010
Chiapas	Carolina	Mazatlán	19	14.93	2007-2010
Chiapas	Umoa 2ª Sección	Metepa	84	14.82	2007-2010
Chiapas	CECECH	Ocozocoautla	800	16.77	2006-2010
Chiapas	Yunnuen	Suchiate	13	14.66	2007-2010
Oaxaca	Loma Bonita	Loma Bonita	95	17.98	2007-2010
Oaxaca	Cuauhtémoc	Matías Romero	3	17.11	2007-2010
Oaxaca	Tolosita	Matías Romero	72	17.18	2007-2010
Oaxaca	Ojitlán	Sn Lucas Ojitlán	96	18.06	2007-2010
Oaxaca	El Porvenir	Sn Juan Cotzocón	138	17.45	2007-2010
Oaxaca	El Refugio	Sn José Chiltepec	30	17.97	2007-2010
Oaxaca	El Progreso	Santiago Yaveo	102	17.52	2007-2010
Oaxaca	Bethania	Tuxtepec	93	17.93	2007-2010
Oaxaca	Tres Marías	Valle Nacional	57	17.79	2007-2010
Puebla	San Sebastián	Acatzingo	2329	19.06	2005-2010
Puebla	Hacienda León	Atlixco	1929	18.93	2006-2010
Puebla	Tejupa	Atzitzihuacan	1800	18.82	2006-2010
Puebla	Coatzingo	Coatzingo	1173	18.62	2006-2010
Puebla	La Concepción	Cuyuaco	2394	19.54	2006-2010
Puebla	Payuca	Cuyuaco	2380	19.52	2006-2010
Puebla	San Javier	Huaquechula	1711	18.82	2006-2010
Puebla	San Juan Tlale	Huejotzingo	2224	19.12	2006-2010
Puebla	Las Delias	Izúcar de Matamoros	1350	18.64	2006-2010
Puebla	Santa Rosalía	Ixcaquixtla	1865	18.47	2007-2010
Puebla	Tehuilooyoca	Sn Andrés Cholula	2160	19.04	2006-2010
Puebla	Miguel Contla	Sn Salvador el Verde	2675	19.26	2006-2010
Puebla	El Sahuaro	Tecamachalco	2023	18.86	2006-2010
Puebla	Tepeaca	Tepeaca	2251	18.99	2005-2010
Puebla	Los Monjes	Tlapanalá	1471	18.70	2007-2010
Puebla	La Mesa	Tochimiltzingo	1848	18.86	2006-2010
Veracruz	Cotaxtla	Medellín	10	18.92	2006-2010
Veracruz	Raudal	Nautla	35	20.12	2007-2010
Veracruz	Papantla	Papantla de Olarte	163	20.43	2006-2010
Veracruz	Perote	Perote	2370	19.59	2006-2010
Veracruz	Ixtacuaco	Tlapacoyan	112	20.04	2006-2010
Veracruz	Ursulo Galván	Ursulo Galván	24	19.41	2006-2010
Veracruz	Inv. Doña Falla	Xalapa	1314	19.52	2006-2010

94 % de las mediciones de evapotranspiración para período de 5 d con datos de temperatura (°F) y radiación global (Rg) (Hargreaves y Samani, 1985). Un análisis posterior mostró que la Rg se puede calcular a partir de la radiación extraterrestre (R_a) y el porcentaje de luz solar (S), el cual corresponde a un promedio de cinco veces la amplitud térmica diaria en °C (Hargreaves *et al.*, 2003). La ecuación original es la siguiente (2):

$$HG = HC R_a \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + HT \right) (T_{\max} - T_{\min})^{HE} \quad (2)$$

donde HG es la evapotranspiración de referencia (mm d^{-1}), R_a es la radiación extraterrestre (mm d^{-1}), $T_{\max}$ es la temperatura

measurements can be correctly predicted for a 5 d period with data of temperature (°F) and global radiation (Rg) (Hargreaves and Samani, 1985). A later analysis showed that the Rg can be calculated from extraterrestrial radiation (R_a) and the percentage of solar light (S), which corresponds to an average of five times the daily thermal amplitude in °C (Hargreaves *et al.*, 2003). The original equation is as follows (2):

$$HG = HC R_a \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + HT \right) (T_{\max} - T_{\min})^{HE} \quad (2)$$

where HG is the reference evapotranspiration (mm d^{-1}), R_a is the extraterrestrial radiation (mm d^{-1}), $T_{\max}$ is the maximum daily

máxima diaria (°C); $T_{\min}$ es la temperatura mínima diaria (°C); HC es el coeficiente empírico de Hargreaves (0.0023); HT es el coeficiente empírico de temperatura (17.8); HE es el exponente empírico de Hargreaves (0.5).

La recalibración de HE se obtuvo mediante la igualdad de términos entre PM y HG propuesta por Trajkovic (2007) para predecir los valores de PM :

$$PM = 0.0023 R_a \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + 17.8 \right) (T_{\max} - T_{\min})^{HE} \quad (3)$$

En este estudio, la recalibración de HE se efectuó mediante la siguiente ecuación que proviene de la ecuación 3.

$$HE = \frac{\log \left[\frac{PM}{0.0023 R_a \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + 17.8 \right)} \right]}{\log [T_{\max} - T_{\min}]} \quad (4)$$

Evaluación de parámetros

Una vez obtenido el exponente HE recalibrado por estación, con la ecuación (2) se estimó HG_{HE} a intervalos diarios. HG se estimó con sus coeficientes originales para evaluar el porcentaje de cambio entre ambos métodos y estimar la mejoría en las estimaciones con respecto a PM . El rendimiento en la predicción de ET_0 con los nuevos coeficientes se evaluó con los criterios de comparación sesgo medio del error (MBE), error relativo (RE), error cuadrático medio (RMSE), desviación estándar del error (SEE), índice de correspondencia (D) y el cociente entre ambas estimaciones promedio de ET_0 ($\bar{r}$) (Willmott, 1982). Estos criterios se definen como:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (5)$$

$$RE = \frac{MBE}{O} \cdot 100 \quad (6)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (7)$$

temperature (°C); $T_{\min}$ is the minimum daily temperature (°C); HC is the empirical Hargreaves coefficient (0.0023); HT is the empirical temperature coefficient (17.8); HE is the empirical Hargreaves exponent (0.5).

The recalibration of HE was obtained through the equality of terms between PM and HG proposed by Trajkovic (2007) for predicting the values of PM :

$$PM = 0.0023 R_a \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + 17.8 \right) (T_{\max} - T_{\min})^{HE} \quad (3)$$

In this study, the recalibration of HE was made through the following equation which comes from equation 3.

$$HE = \frac{\log \left[\frac{PM}{0.0023 R_a \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + 17.8 \right)} \right]}{\log [T_{\max} - T_{\min}]} \quad (4)$$

Evaluation of parameters

Once the HE exponent recalibrated by station was obtained, using equation (2), HG_{HE} was estimated at daily intervals. HG was estimated with its original coefficients to evaluate the percentage of change between both methods and to estimate the improvements in the estimations with respect to PM . Yield in the prediction of ET_0 with the new coefficients was evaluated with the comparison criteria mean bias of the error (MBE), relative error (RE), mean square error (RMSE), standard deviation of the error (SEE), correspondence index (D) and the quotient between both average estimations of ET_0 ($\bar{r}$) (Willmott, 1982). These criteria are defined as:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (5)$$

$$RE = \frac{MBE}{O} \cdot 100 \quad (6)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (7)$$

$$SEE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (PM^i - HG_{HE}^i)^2}{n-1} \right]^{0.5} \quad (8)$$

$$SEE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (PM^i - HG_{HE}^i)^2}{n-1} \right]^{0.5} \quad (8)$$

$$D = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (9)$$

$$D = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (9)$$

$$\bar{r} = \frac{\bar{P}}{\bar{O}} \quad (10)$$

$$\bar{r} = \frac{\bar{P}}{\bar{O}} \quad (10)$$

donde P_i es el valor estimado con cada modelo de prueba, O_i es el valor estimado con PM, $\bar{P}$ es el promedio de los valores estimados para cada modelo de prueba, $\bar{O}$ es el promedio de los valores estimados con PM, y n es el tamaño de la muestra.

where P_i is the estimated value with each test model, O_i is the estimated value with PM, $\bar{P}$ is the average of the values estimated for each test model, $\bar{O}$ is the average of the values estimated with PM, and n is the size of the sample.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RESULTS AND DISCUSSION

Recalibración del exponente HE

Recalibration of the HE exponent

El 97 % de los valores de HE recalculados de las 37 estaciones presentaron un valor diferente al HE original (0.5). Los valores nuevos estuvieron entre 0.30 y 0.53. Los valores recalibrados de HE para cada estación así como los criterios estadísticos de evaluación se muestran en el Cuadro 2.

The 97 % of the recalculated HE values of the 37 stations presented a value that was different from the original HE (0.5). The new values were between 0.30 and 0.53. The recalibrated values of HE for each station as well as the statistical evaluation criteria are shown in Table 2.

Comparación de HG y HG_{HE}

Comparison of HG and HG_{HE}

Los criterios de MBE, RE y $\bar{r}$ para HG en Chiapas (1.28, 37.44 y 1.38), Oaxaca (1.25, 35.57 y 1.35), Puebla (0.06, 1.43 y 1.02) y Veracruz (0.56, 16.33 y 1.16) mostraron una sobreestimación de este método. En los estados de Chiapas, Oaxaca y Veracruz, que presentan un clima cálido húmedo y cálido sub-húmedo, los HE recalibrados fueron cercanos al valor original. Los estadísticos MBE, RE y $\bar{r}$ se redujeron 98 % con HG_{HE} para Chiapas, Oaxaca 93 %, Puebla 70 % y Veracruz 90 %. Los estadísticos RMSE y D para HG en Chiapas (1.45 y 0.44), Oaxaca (1.55 y 0.68), Puebla (0.92 y 0.78) y Veracruz (1.01 y 0.78) proporcionaron los principales criterios para efectuar la comparación frente a HG_{HE} , ya que para Chiapas el RMSE se redujo en 53 % y el índice D se aumento

The criteria of MBE, RE and $\bar{r}$ for HG in Chiapas (1.28, 37.44 and 1.38), Oaxaca (1.25, 35.57 and 1.35), Puebla (0.06, 1.43 and 1.02) and Veracruz (0.56, 16.33 and 1.16) showed an overestimation of this method. In the states of Chiapas, Oaxaca and Veracruz, which present a warm humid and warm sub-humid climate, the recalibrated HE were close to the original value. The MBE, RE and $\bar{r}$ statistics were reduced 98 % with HG_{HE} for Chiapas, Oaxaca 93 %, Puebla 70 % and Veracruz 90 %. The RMSE and D statistics for HG in Chiapas (1.45 and 0.44), Oaxaca (1.55 and 0.68), Puebla (0.92 and 0.78) and Veracruz (1.01 and 0.78) provided the principal criteria for making the comparison against HG_{HE} , given that for Chiapas the RMSE was reduced by 53 % and the D

Cuadro 2. Valores recalibrados de HE y estadísticos de evaluación de los modelos predictivos de ET₀.
Table 2. Recalibrated values of HE and evaluation statistics of the predictive models of ET₀.

Estación	HG _{HE}						HG							
	HE	MBE	RE	RMSE	SEE	D	r	HE	MBE	RE	RMSE	SEE	D	r
Buena Vista	0.39	0.02	0.53	0.66	0.66	0.71	1.01	0.5	1.20	31.78	1.36	1.36	0.44	1.32
Carolina	0.37	-0.02	-0.59	0.62	0.62	0.73	0.99	0.5	1.40	37.68	1.52	1.52	0.39	1.38
Umoa 2ª Sección	0.4	0.08	2.08	0.76	0.76	0.67	1.02	0.5	1.23	31.23	1.42	1.42	0.44	1.31
CEDECH	0.3	0.06	2.15	0.65	0.65	0.75	1.02	0.5	1.74	65.51	1.90	1.90	0.40	1.66
Yunnuen	0.42	-0.01	-0.18	0.68	0.68	0.70	1.00	0.5	0.84	21.01	1.06	1.07	0.53	1.21
Loma Bonita	0.38	0.08	2.32	0.73	0.73	0.88	1.02	0.5	1.34	37.53	1.57	1.57	0.69	1.38
Cuauhémoc	0.36	0.05	1.51	0.99	0.99	0.73	1.02	0.5	1.36	40.26	1.67	1.67	0.59	1.40
Tolostita	0.39	0.07	1.83	1.32	1.32	0.65	1.02	0.5	1.15	31.29	1.73	1.73	0.58	1.31
El Refugio	0.41	0.05	1.26	0.81	0.81	0.86	1.01	0.5	1.02	26.31	1.27	1.27	0.77	1.26
Bethania	0.45	0.03	0.67	0.73	0.73	0.92	1.01	0.5	0.54	13.32	0.90	0.90	0.89	1.13
Tres Marías	0.33	0.10	3.16	0.78	0.78	0.83	1.03	0.5	1.88	58.39	1.99	2.00	0.56	1.58
El Porvenir	0.4	0.09	2.51	0.94	0.94	0.81	1.03	0.5	1.16	31.01	1.46	1.46	0.70	1.31
Ojitlán	0.41	0.11	2.98	0.80	0.80	0.86	1.03	0.5	1.04	27.81	1.29	1.29	0.77	1.28
El Progreso	0.34	0.14	4.14	1.09	1.09	0.73	1.04	0.5	1.77	54.23	2.04	2.05	0.56	1.54
San Sebastián	0.51	0.05	1.27	0.86	0.86	0.80	1.01	0.5	-0.06	-1.37	0.86	0.86	0.78	0.99
Hacienda León	0.52	0.01	0.21	0.84	0.84	0.81	1.00	0.5	-0.21	-4.79	0.86	0.86	0.77	0.95
Tejupa	0.48	0.08	2.03	1.24	1.24	0.67	1.02	0.5	0.31	7.52	1.26	1.26	0.63	1.08
Coatzingo	0.43	-0.09	-1.90	1.51	1.51	0.52	0.98	0.5	0.91	19.87	1.82	1.82	0.34	1.20
La Concepción	0.49	0.06	1.51	0.93	0.93	0.80	1.02	0.5	0.18	4.49	0.94	0.94	0.79	1.05
Payuca	0.48	0.00	0.07	0.86	0.86	0.83	1.00	0.5	0.25	6.14	0.88	0.88	0.82	1.06
San Javier	0.49	0.01	0.11	0.82	0.82	0.81	1.00	0.5	0.13	2.83	0.83	0.83	0.80	1.03
San Juan Tlale	0.51	0.06	1.43	0.76	0.76	0.85	1.01	0.5	-0.06	-1.34	0.77	0.77	0.84	0.99
Las Delias	0.51	0.04	0.87	0.72	0.72	0.88	1.01	0.5	-0.09	-1.80	0.73	0.73	0.87	0.98
Santa Rosalia	0.48	-0.03	-0.64	0.83	0.83	0.83	0.99	0.5	0.21	4.88	0.85	0.85	0.83	1.05
Tehuilooyoca	0.51	-0.01	-0.26	0.72	0.72	0.86	1.00	0.5	-0.12	-2.92	0.73	0.73	0.85	0.97
Miguel Contla	0.51	0.02	0.61	0.81	0.81	0.83	1.01	0.5	-0.08	-2.04	0.82	0.82	0.82	0.98
El Sahuaro	0.49	0.04	0.92	0.79	0.79	0.85	1.01	0.5	0.17	3.81	0.81	0.81	0.84	1.04
Tepeaca	0.53	0.03	0.63	0.87	0.87	0.81	1.01	0.5	-0.33	-7.32	0.93	0.93	0.76	0.93
Los Monjes	0.5	0.00	-0.07	0.80	0.80	0.84	1.00	0.5	0.00	-0.07	0.80	0.80	0.83	1.00
La Mesa	0.52	0.00	0.09	0.78	0.78	0.87	1.00	0.5	-0.24	-5.08	0.83	0.83	0.84	0.95
Cotaxtla	0.45	0.10	2.58	0.88	0.88	0.85	1.03	0.5	0.60	15.38	1.04	1.04	0.82	1.15
Raudal	0.49	0.04	1.02	0.78	0.78	0.86	1.01	0.5	0.12	3.17	0.78	0.78	0.86	1.03
Papantla	0.43	0.03	0.90	0.76	0.76	0.89	1.01	0.5	0.69	18.88	1.00	1.00	0.85	1.19
Perote	0.48	0.05	1.42	0.74	0.74	0.87	1.01	0.5	0.26	7.25	0.78	0.78	0.86	1.07
Ixtacuaco	0.41	0.09	2.49	0.80	0.80	0.84	1.03	0.5	0.96	26.87	1.23	1.23	0.74	1.27
Ursulo Galván	0.49	0.05	1.24	0.81	0.81	0.84	1.01	0.5	0.14	3.51	0.82	0.82	0.83	1.04
Inv. Doña Falla	0.37	0.04	1.21	0.89	0.89	0.67	1.01	0.5	1.14	39.28	1.45	1.45	0.51	1.39

27 % en Oaxaca fue 41 y 13 %, en Puebla 4 y 3 %, y en Veracruz 20 y 5 % para RMSE y D. También el SEE presentó cambios una vez aplicado el coeficiente recalibrado pasando en Chiapas de 1.45 a 0.67, en Oaxaca de 1.55 a 0.91, en Puebla de 0.92 a 0.88, y en Veracruz de 1.01 a 0.81. Como se observa, las desviaciones estándar del error fueron disminuidas al corregir el coeficiente.

En la Figura 1 se presentan los valores de ETo obtenidos con HG_{HE} y PM y la comparación entre ETo obtenida con HG original y HG_{HE} frente a PM. Para ilustrar los resultados se han seleccionado dos estaciones con problemas de sobreestimación (La Mesa) y subestimaciones (Ixtacuaco) al utilizar HG original.

index increased by 27 %, in Oaxaca it was 41 and 13 %, in Puebla 4 and 3 %, and in Veracruz 20 and 5 % for RMSE and D. The SEE also presented changes once the recalibrated coefficient was applied, passing in Chiapas from 1.45 to 0.67, in Oaxaca from 1.55 to 0.91, in Puebla from 0.92 to 0.88, and in Veracruz from 1.01 to 0.81. As can be observed, the standard deviations of the error were decreased by correcting the coefficient.

Figure 1 presents the values of ETo obtained with HG_{HE} and PM and the comparison between ETo obtained with original HG and HG_{HE} against PM. To illustrate the results two stations have been selected with problems of overestimation (La Mesa) and underestimation (Ixtacuaco) by using original HG.

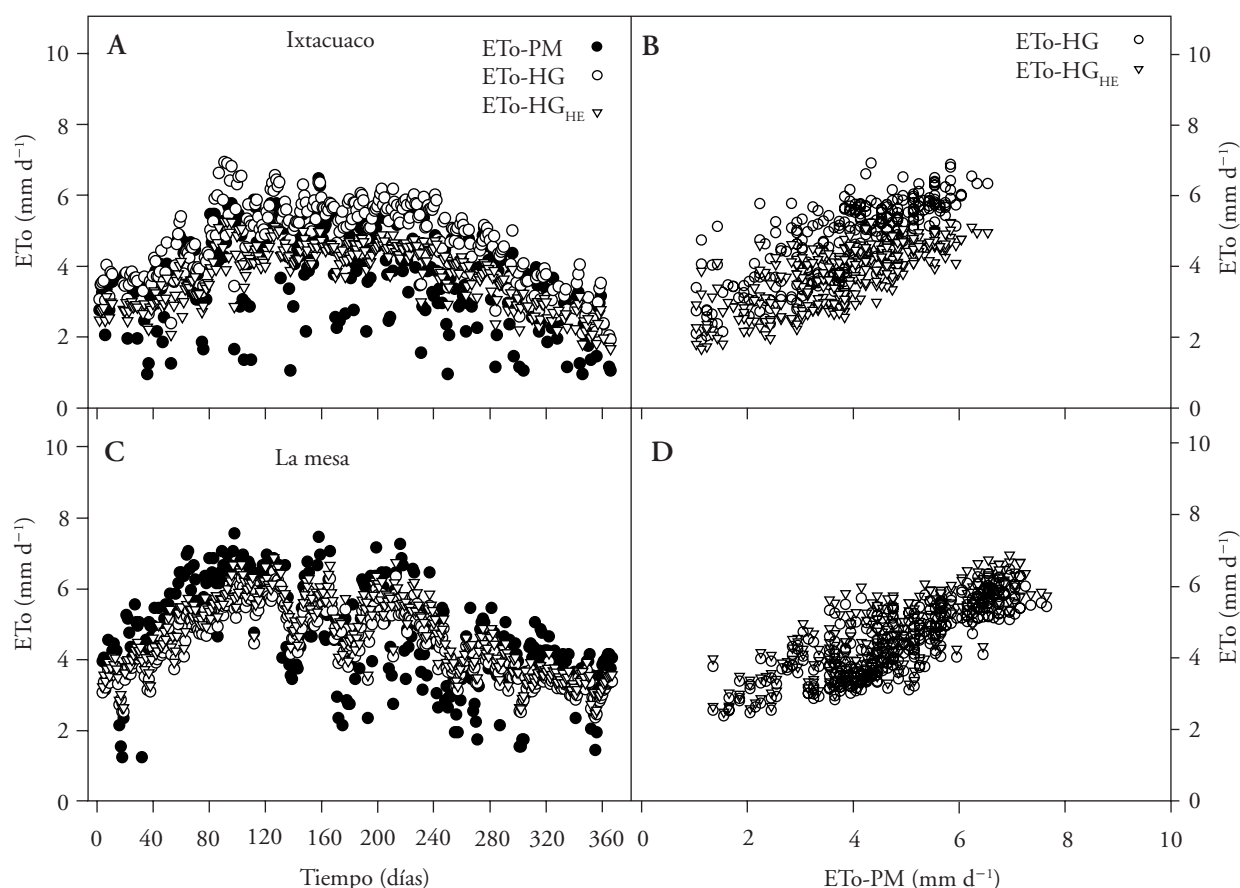


Figura 1. Fluctuación anual de los valores de ETo estimados con PM, HG y HG_{HE} y ajuste de HG y HG_{HE} respecto a ETo obtenido con PM.

Figure 1. Annual fluctuation of the values of ETo estimated with PM, HG and HG_{HE} and adjustment of HG and HG_{HE} with respect to ETo obtained with PM.

CONCLUSIONES

La ecuación de Hargreaves corregida en su coeficiente HE aumenta la precisión en la predicción de ET₀ comparado con la ecuación original sin correcciones. Los valores menores del error en las estimaciones de ET₀ al compararla con la ecuación tradicional de PM demuestran este efecto. Los mejores resultados dados por esta metodología se observan en las estaciones ubicadas en clima cálido húmedo y cálido subhúmedo donde la ecuación HG original sobrestima los valores de la ET₀.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campus Ixtacuaco, al proyecto UAEM 2752/2009 financiado por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y al proyecto CONACYT # 90637, por las facilidades y apoyos otorgados en la realización de este estudio.

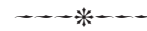
LITERATURA CITADA

- Allen, R., G. 1993. Evaluation of a temperature difference method for computing grass reference evapotranspiration. Rep. submitted to FAO, Rome. 50 p.
- Allen, R., G., L. Pereira S., D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy. 298 p.
- Allen, R., G., M. Smith, A. Perrier, and L. Pereira S. 1994. An update for the definition of reference evapotranspiration. ICID Bull 43 (2): 1-34.
- Campos D., F. 2005. Estimación empírica de la ETP en la república mexicana. Ingeniería Hidráulica en México 20 (3): 99-110.
- Droogers, P., and R. Allen G. 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. Irrig. Drain Syst. 16 (1): 33-45.

CONCLUSIONS

The Hargreaves equation corrected in its HE coefficient increases precision in the prediction of ET₀ compared with the original equation without corrections. The lower values of the error in the estimations of ET₀ when comparing it with the traditional equation of PM demonstrate this effect. The better results given by this methodology are observed in the stations located in warm humid and warm sub-humid climate where the original HG equation overestimates the values of ET₀.

—End of the English version—



- Hargreaves, G., H., and R. Allen G. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. J. Irrig. Drain Eng. 129 (1): 53-63.
- Hargreaves, G., H., and Z. Samani A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Appl. Eng. Agric. 1 (2): 96-99.
- Jensen, D., T., G. Hargreaves H., B. Temesgen, and R. Allen G. 1997. Computation of ET₀ under nonideal conditions. J. Irrig. Drain Eng. 123 (5): 349-400.
- Tabari, H., and P. Talaei H. 2011. Local of the Hargreaves and Priestley-Taylor equations for estimating reference evapotranspiration in arid and cold climates of Iran based on the Penman-Monteith model. J. Hydrol. Eng. 16 (10): 837-845.
- Trajkovic, S. 2005. Temperature-based approaches for estimating reference evapotranspiration. J. Irrig. Drain Eng. 131 (4): 316-323.
- Trajkovic, S. 2007. Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions. J. Irrig. Drain Eng. 133(1): 38-42.
- Willmott, C., J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bull. Am. Meteorol. Soc. AMS. 63: 1309-1313.