

Rev. FCA UNCUYO. 2012. 44(1): 101-109. ISSN impreso 0370-4661. ISSN (en línea) 1853-8665.

Calibración del modelo de Hargreaves para la estimación de la evapotranspiración de referencia en Coronel Dorrego, Argentina

Calibration of Hargreaves model to estimate reference evapotranspiration in Coronel Dorrego, Argentina

Javier Almorox ¹

Victor Elisei ²

María Elina Aguirre ²

Marta Commegna ²

Originales: Recepción: 22/02/2010 - Aceptación: 23/04/2012

RESUMEN

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO propone el uso de la ecuación de Penman-Monteith (PM) como el estándar para la estimación de la evapotranspiración de referencia y para la calibración de otras ecuaciones. El principal inconveniente del uso de esta ecuación es que requiere datos que no se tienen en la mayoría de las estaciones. El uso de métodos de cálculos alternativos es usual en la bibliografía. El método de Hargreaves (HG), recomendado por la FAO, es el más usado en la bibliografía cuando sólo se dispone de los datos de temperaturas. El principal objetivo de este trabajo es analizar la posibilidad de calibración y ajuste del método HG en la estación de Coronel Dorrego. Se han comparado los métodos PM y HG, encontrándose una buena correlación entre ambos. Se concluye que el modelo HG es una metodología adecuada, para la zona de Coronel Dorrego y se sugiere la fórmula siguiente:

$$ET_oHG = 0,00206 \cdot Ra \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{0,49} \cdot (tm + 17,8) \text{ mm/día}$$

ABSTRACT

The Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO has proposed using the Penman-Monteith model as the standard for estimating reference evapotranspiration (ET_o), and for evaluating other methods. The main obstacle to using the PM-FAO 56 (PM) method widely is the required data which are not available in most of the stations. The use of an alternative calculation procedure is recommended. The Hargreaves equation (HG) is recommended by FAO and is most often used in literature with limited weather data. The main objective of this study is to investigate the possibility for calibrating the equation in Coronel Dorrego through the adjustment of Hargreaves coefficient. PM and HG methods have been compared, showing very good accuracy. It is concluded that the HG is a recommended methodology, and suggest the following formula:

$$ET_oHG = 0,00206 \cdot Ra \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{0,49} \cdot (tm + 17,8) \text{ mm/day}$$

Palabras clave

evapotranspiración de referencia
• FAO-56 • Hargreaves • Penman-Monteith.

Keywords

reference crop evapotranspiration
• FAO-56 • Hargreaves • Penman-Monteith.

1 Dpto. de Edafología. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Avd. Complutense s/n 28040. Madrid. España. javier.almorox@upm.es

2 Dpto. de Agronomía. Universidad Nacional del Sur. Altos de Palihue. (8000) Bahía Blanca. Argentina.

INTRODUCCIÓN

La agricultura de regadío es una de las actividades humanas base de la civilización y es la responsable del consumo del 70% del agua mundial. En Argentina el 70% del total anual de agua consumida se emplea en la agricultura; y en las provincias con predominio de climas áridos y semiáridos la proporción supera el 95%. La importancia del regadío queda evidenciada al contribuir con un tercio al valor bruto de la producción agraria.

La necesidad de aplicar criterios de sostenibilidad en el uso del agua obliga al sector agrícola a ajustar sus consumos de agua. Una adecuada programación en el manejo del riego permite un mejor uso del recurso agua.

Mantener el suelo con humedad suficiente para el correcto desarrollo del cultivo, como así también evitar las pérdidas de agua tanto por escorrentía superficial como por percolación profunda, además de reducir el uso inadecuado del recurso, paliando los efectos de la sequía, reduce los problemas de contaminación y sobreexplotación.

El manejo del agua en la Agricultura puede mejorarse con una adecuada estimación de la evapotranspiración de los cultivos. Entre los muchos organismos internacionales que han intentado alcanzar el consenso con respecto al mejor método para su uso en la estimación de la evapotranspiración, se pueden mencionar la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) y el IWNI (International Water Management Institute).

El método de estimación de la evapotranspiración de referencia de la FAO-56 Penman-Monteith (PM) (3) define la evapotranspiración de referencia (ETo) como la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua.

La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto que tiene una altura de 12 cm, una resistencia de cubierta de 70 s/m, una resistencia aerodinámica de $208/U_2$ s/m, donde U_2 es la velocidad del viento a dos metros de altura; y un albedo de 0,23.

El método PM tiene bases físicas sólidas e incorpora en el modelo parámetros fisiológicos y aerodinámicos; es considerado como el modelo estándar de referencia para la estimación y comparación de métodos y es la metodología más empleada y validada en diferentes condiciones climáticas (9, 21).

El método de Hargreaves (12) (HG) es el recomendado por la FAO-56 cuando no hay datos suficientes para aplicar PM y se dispone de datos de temperaturas.

A nivel mundial existen muchos trabajos en los que se han comparado los métodos PM y HG (6, 7, 10, 14, 16, 19). En España, en el valle del Guadalquivir, el valor de ETo, se estima con bastante aproximación, aplicando HG (17).

En Uruguay, Almorox *et al.* (5) han demostrado que el método de Hargreaves es el más adecuado tanto por su simplicidad y amplia aceptación, como por la menor necesidad de datos. Droogers y Allen (9) en un estudio desarrollado a escala mundial para 56000 estaciones encontraron una buena correlación entre los dos métodos.

En la localidad de Coronel Dorrego, Provincia de Buenos Aires, Argentina, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Barrow, ha instalado una estación agrometeorológica para uso de los productores de olivos que se localizan dentro de un radio de 25 km alrededor de la ciudad.

En general, la mayoría de los productores de zonas limítrofes no cuentan con datos meteorológicos suficientes para aplicar el método PM y sólo poseen sensores de temperatura que les permite disponer diariamente de los datos de temperaturas máxima, mínima y media.

Objetivo

- Calibrar la ecuación HG y comparar las estimaciones de las evapotranspiraciones de referencia usando PM y HG para su aplicación en las zonas que sólo disponen de datos de temperaturas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se ha trabajado con datos registrados en la estación meteorológica de la localidad de Coronel Dorrego del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) en convenio con la Municipalidad de Coronel Dorrego. Dicha estación se ubica en latitud: 38° 44' 21" S, longitud: 61° 15' 35" W, y una altitud de 103 m, presenta un clima templado subhúmedo húmedo según la clasificación de Burgos y Vidal (8) con una temperatura media de 14,5 °C y una precipitación media anual de 669 mm.

Se ha trabajado con los datos diarios registrados durante el período comprendido entre el 1 de Enero del 2007 y el 1 de febrero del 2010. El INTA obtiene de la estación meteorológica de la localidad de Coronel Dorrego los siguientes parámetros meteorológicos: temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, velocidad del viento, presión atmosférica, radiación solar; los cuales son empleados para el cálculo de PM y HG.

Método de Hargreaves

El modelo HG se desarrolló combinando la ecuación original de Hargreaves para la estimación de la radiación solar (11) con la ecuación desarrollada por Hargreaves y Samani (12).

$$ET_{HG} = k_g \cdot R_s \cdot (t_m + 17,8)$$

$$R_s = k_{RS} \cdot R_a \cdot (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{0,5}$$

donde:

$ET_{o_{HG}}$ = evapotranspiración de referencia estimada según el método HG

R_s = radiación solar (mm/día)

t_m = temperatura media diaria en grados Celsius °C

R_a = radiación solar extraterrestre (mm/día)

$T_{máx}$ = temperatura máxima diaria (°C)

$T_{mín}$ = temperatura mínima diaria (°C)

k_{RS} y k_g = constantes estimadas en el modelo

La radiación se expresa a efectos prácticos en evaporación equivalente en mm/día, usando un valor calor latente de vaporización de $2,45 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

El método HG utiliza parámetros térmicos y radiación solar extraterrestre, que se estima a partir de la latitud. El método presenta la ventaja de que se puede aplicar para cualquier observatorio con sólo datos de temperatura. Si para el coeficiente k_g se toma el valor 0,0135, y para k_{RS} 0,17 la combinación de ambos coeficientes empíricos da como resultado un coeficiente de 0,0023 (12), quedando:

$$ET_{o_{HG}} = 0,0023 \cdot R_a \cdot (T_{máx} - T_{mín})^{0,5} (t_m + 17,8) \text{ mm/día}$$

Inicialmente, el coeficiente de radiación k_{RS} fue fijado en 0,17 para regiones semiáridas (Salt Lake City, Utah). Posteriormente, Hargreaves (13) recomienda el uso de 0,16 para regiones interiores y 0,17 para las zonas costeras.

Son varios los autores que han estimado y calibrado los valores de las constantes de la ecuación (2, 15). Samani (18) relaciona el valor de k_{RS} frente al valor del rango de temperatura, y recomienda la calibración.

Otros autores han calibrado el factor k_g , modificando el valor 0,0135 de la ecuación originaria e incluso el exponente 0,5 que afecta al rango de temperaturas (1). Según Hargreaves y Allen (14) el modelo HG ha sido empleado con muy buenos resultados en zonas climáticas diferentes a la zona donde se desarrolló y aconsejan abordar la ecuación de manera integrada y analizar cómo predice la ET_o .

Es necesario resaltar que la ecuación supone que la diferencia de temperaturas máxima y mínima se relaciona con la radiación solar, por este motivo el modelo está sujeto a errores ocasionados por factores meteorológicos como son el viento o la nubosidad al influir estos en el rango térmico diario, y en consecuencia Hargreaves y Allen (14) recomiendan su uso con pasos de tiempo de al menos cinco días.

En este artículo se ha calibrado el coeficiente agregado 0,0023 y el exponente 0,5 de la ecuación desarrollada por Hargreaves y Samani (5, 20). Así a partir de la serie de datos de la estación meteorológica de Coronel Dorrego se calibran estos coeficientes, para su aplicación en las zonas limítrofes con únicamente datos de temperatura. Para la calibración del método HG se ha empleado un paso de tiempo de cinco días.

Radiación solar extraterrestre

El único dato necesario para la estimación de la radiación solar extraterrestre diaria para un determinado día del año es la latitud de la localidad.

$$H_0 = (1/\pi) \cdot I_{sc} \cdot E_0 \cdot (\cos \lambda \cdot \cos \delta \cdot \sin w_s + (\pi/180) \cdot \sin \lambda \cdot \sin \delta \cdot w_s) \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$$

donde:

I_{sc} = constante solar (118,08 MJ·m⁻²·día⁻¹)

E_0 = factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre

λ = latitud de la localidad en grados

δ = declinación solar en grados

w_s = ángulo horario del Sol en grados

Estos valores se pueden estimar a partir de las siguientes expresiones:

$$E_0 = 1,00011 + 0,034221 \cdot \cos \Gamma + 0,00128 \cdot \sin \Gamma + 0,000719 \cdot \cos 2\Gamma + 0,000077 \cdot \sin 2\Gamma$$

$$\delta = (180/\pi) \cdot (0,006918 - 0,399912 \cdot \cos \Gamma + 0,070257 \cdot \sin \Gamma - 0,006758 \cdot \cos 2\Gamma + 0,000907 \cdot \sin 2\Gamma - 0,002697 \cdot \cos 3\Gamma + 0,00148 \cdot \sin 3\Gamma)$$

$$\Gamma = 2\pi \cdot (n_{\text{día}} - 1) / 365$$

donde:

Γ = ángulo del día en radianes

$n_{\text{día}}$ = número del día calculado del 1 de enero (día 1) al 31 de Diciembre (día 365)

$$w_s = \cos^{-1} [(- \sin \lambda \cdot \sin \delta) / (\cos \lambda \cdot \cos \delta)]$$

Método de Penman-Monteith FAO 56 (PM)

Simplificando la expresión (3) la ecuación PM tiene la forma:

$$ET_{oPM} = \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 \cdot U_2)} \times (R_n - G) \times \frac{1}{\lambda_v} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 \cdot U_2)} \times \frac{900}{tm + 273} \times U_2 \times (e^0 - e_a) \right]$$

ET_{oPM} = evapotranspiración según PM en mm/día

Δ = pendiente de la curva de saturación de vapor kPa/°C

γ = constante psicrométrica kPa/°C

λ_v = calor de vaporización del vapor de agua en MJ·kg⁻¹

U_2 = velocidad del viento a 2 metros en m/s.

tm = temperatura media del aire en °C

G = flujo de energía provocado por el almacenamiento de calor en el suelo

MJ·m⁻²·día⁻¹ = Para un día o diez días se anula el valor, y para períodos mensuales se aplica la expresión: $G = 0,07 \cdot (tm_{i+1} - tm_{i-1})$ (diferencia de las temperaturas medias de los meses anterior y posterior)

R_n = radiación neta MJ·m⁻²·día⁻¹

e_a = valor de la tensión de vapor real kPa

e^0 = tensión de saturación de vapor kPa

Los valores de Δ , γ , R_n , G , e_a , e° se calculan siguiendo los procedimientos de la FAO (3). El modelo PM requiere gran cantidad de datos meteorológicos, motivo por lo cual se proponen alternativas (3) para la estimación de los diferentes parámetros, y en el caso de haber sólo datos de temperaturas aconseja el uso del método HG.

Métodos de análisis

Se compararon los resultados obtenidos con el método HG con los datos resultado de aplicar PM, que se considera como el de referencia. Para una mejor comparación y siguiendo los criterios de Hargreaves y Allen (14) se han agrupado los datos en periodos de cinco días.

Para el análisis de la bondad de las estimaciones se han empleado los siguientes estadísticos: error cuadrático medio RMSE, los errores de sesgo MBE y MABE; y el coeficiente de determinación. Estos estadísticos son de los más ampliamente aplicados en radiación solar y evapotranspiración (4, 22):

$$d_i = (ET_{iPM-FAO 56} - ET_{iHargreaves}) \quad \text{mm/día}$$

$$RMSE = [\sum (d_i)^2 / N_{obs}]^{0.5} \quad \text{mm/día}$$

$$MBE = \sum (d_i) / N_{obs} \quad \text{mm/día}$$

$$MABE = \sum (|d_i|) / N_{obs} \quad \text{mm/día}$$

$$R^2 = [1 - [RMSE^2 / \sigma^2]]$$

donde:

d_i = diferencia entre los valores de evapotranspiración obtenidos según el método PM y los valores de evapotranspiración de referencia obtenidos día a día aplicando HG calibrado

N_{obs} = número de observaciones

σ = desviación estándar

Antes de analizar la calidad de la regresión se comprueba que se cumplen las consideraciones de la independencia, normalidad y varianza constante de los errores. El coeficiente de determinación nos da una medida del ajuste entre la variabilidad explicada y la total.

El valor de RMSE aporta información acerca de la bondad de la estimación, comparando dato a dato la desviación real entre los valores estimados y los calculados. Cuanto menor es el valor de RMSE mejor es la bondad del modelo. Un valor positivo de MBE indica una sobreestimación mientras que un valor negativo representa una subestimación del modelo.

La desventaja de los estadísticos MBE es que los errores de signos diferentes pueden compensar errores en la suma, y unos pocos valores en la suma pueden producir un aumento significativo en el valor.

El MABE da un valor absoluto de error y es una medida de la bondad del modelo. Al igual que para el resto, cuanto menores son los estadísticos mejores son las estimaciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El coeficiente empírico k_g que aporta una mejor solución estadística es el de valor 0,01214. Tomando como valor de k_{RS} 0,17. La combinación de ambos coeficientes empíricos da como resultado un coeficiente de 0,00206. Por otro lado la mejor solución estadística se ha obtenido para un exponente de 0,49.

$$ET_o \text{ HG} = 0,00206 \cdot Ra \cdot (T_{\text{máx.}} - T_{\text{mín.}})^{0,49} \cdot (tm + 17,8) \text{ mm/día}$$

$ET_o \text{ HG}$ = evapotranspiración calculada según Hargreaves en mm/día

Ra = radiación solar extraterrestre (mm/día)

$T_{\text{máx.}} - T_{\text{mín.}}$ = diferencia entre la media de temperaturas máximas y la de mínimas (°C)

tm = temperatura media del aire (°C)

La ecuación de regresión entre las dos variables nos da la ecuación de regresión

$$ET_o \text{ HG} = -0,184083 + 0,973047 \cdot ET_o \text{ PM}$$

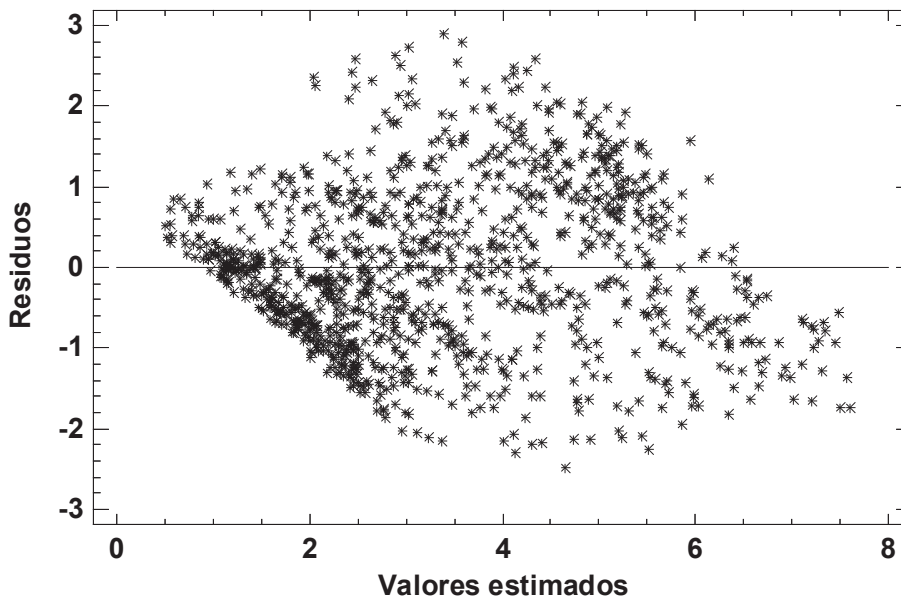


Figura 1. Residuos versus valores estimados.

Figure 1. Residuals vs predicted values.

En la figura 2 (pág. 108) se muestra el gráfico de los residuos frente a los valores predichos. El p-valor de la tabla ANOVA del análisis de varianza es menor de 0,01; en consecuencia, hay una relación significativa entre las variables con un nivel de

confianza del 99%. Además, el valor de R^2 indica que el modelo explica el 74,14 de la variabilidad de HG, expresando una relación moderadamente fuerte entre las variables. El valor de RMSE indica que la desviación estándar de los residuos es 0,89 mm/día que supone un 28,8% de la media de EToHG, también se obtiene un MBE de 0,27 mm/día y un MABE de 0,77 mm/día.

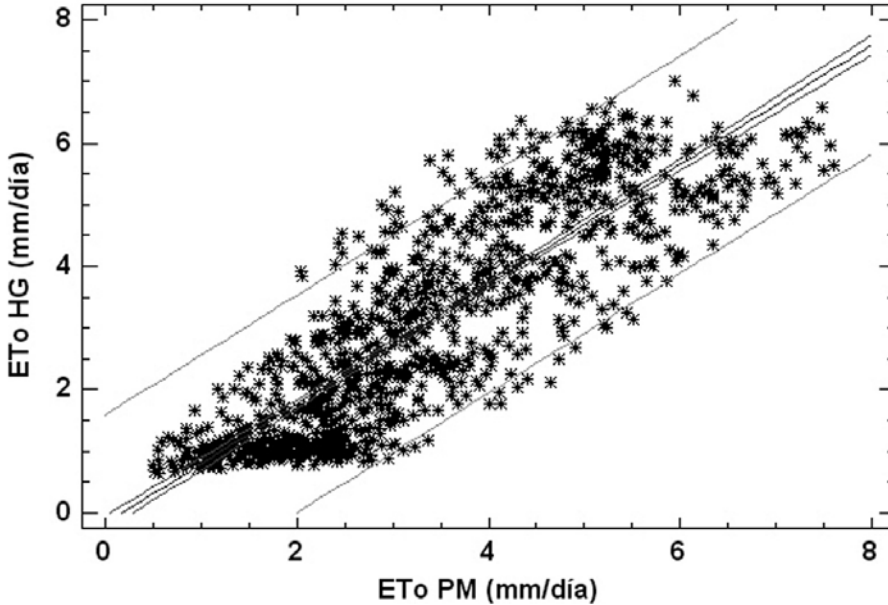


Figura 2. ETo HG (modelo Hargreaves) con un paso de cinco días frente a ETo PM (modelo FAO-PM) en mm/día.

Figure 2. Five-day ETo by the Hargreaves method versus five day ETo PM by the FAO- PM method (mm/day).

En resumen, en virtud de los estadísticos obtenidos y que existe una correlación significativa al 99%, el método HG calibrado para los datos de la estación de Dorrego es de aplicación para estimar la evapotranspiración de referencia en aquellas estaciones próximas cuando no hay datos para la aplicación del método PM, en su uso con un paso de tiempo de cinco días. Este resultado es coincidente con los resultados de Droogers y Allen (9) y Hargreaves y Allen (14).

CONCLUSIONES

La estimación de la evapotranspiración de referencia es esencial para la programación del riego y para una adecuada planificación y manejo de los recursos hídricos. Cuando no se disponen de los datos meteorológicos necesarios para el cálculo de la evapotranspiración de referencia por el método PM, y sólo se dispone de datos de temperaturas, el método HG es el recomendado tanto por su sencillez como por su buena aproximación al valor de la evapotranspiración de referencia.

El método HG mejora con la calibración de sus coeficientes. Los resultados muestran que la ecuación HG calibrada se aproxima adecuadamente al método PM. Para la zona de Coronel Dorrego se sugiere para la estimación de la evapotranspiración de referencia en aquellos observatorios con sólo datos de temperaturas la fórmula siguiente:

$$ET_o \text{ HG} = 0,00206 \cdot Ra \cdot (T_{\text{máx.}} - T_{\text{mín.}})^{0,49} \cdot (tm + 17,8) \text{ mm/día}$$

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R.G. 1993. Evaluation of a temperature difference method for computing grass reference evapotranspiration. Report submitted to the Water Resources Development and Man Service, Land and Water Development Division, FAO, Rome. 49.
- Allen, R.G. 1997. Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature, *J. Hydrol. Eng.* 2: 56-66.
- Allen, R.G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56 FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. Italy. 300 p.
- Almorox, J.; Benito, M.; Hontoria, C. 2005. Estimation of monthly Angström-Prescott equation coefficients from measured daily data in Toledo, Spain. *Renewable Energy*, 30, 6: 931-936.
- Almorox, J.; Hontoria, C.; Benito, M. 2008. Comparación de algunos métodos de estimación de la evapotranspiración en Uruguay. *Revista Ingeniería Química*. 33: 5-9.
- ASCE. 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE. Manuals and Reports on Engineering Practice. N° 70. (Ed) Jensen, Burman y Allen. New York. 322 p.
- Beyazgül, M.; Kayam, Y.; Engelsman, F. 2000. Estimation methods for crop water requirements in the Gediz Basin of western Turkey. *Journal of Hydrology*, 229(1-2): 19-26.
- Burgos, J. J.; Vidal, A. 1951. Los climas de la República Argentina según la nueva clasificación de Thornthwaite. *Revista Meteoros*. 1(1): 3-32.
- Droogers, P.; Allen, R. G. 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems* 16: 33-45.
- Gocic, M.; Trajkovic, S. 2010. Software for estimating reference evapotranspiration using limited weather data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 71(2):158-162
- Hargreaves, G. H. 1975. Moisture availability and crop production. *Trans ASAE* 18(5), 980-984.
- Hargreaves, G. H.; Samani, Z. A. 1982. Estimating potential evapotranspiration. *J. Irrig. and Drain Engr*, 108 (IR3): 223-230.
- Hargreaves, G. H. 1994. Simplified coefficients for estimating monthly solar radiation in North America and Europe. Departmental Paper, Dept. of Biol. And Irrig. Engrg, Utah State University, Logan. 9 p.
- Hargreaves, G. H.; Allen, R. A. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation, *J. Irrig. Drain. Eng.* ASCE 129(1): 53-63.
- Jabloun, M. A.; Sahli, A. 2008. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data: Application to Tunisia, *Agricultural Water Management*, 95(6): 707-715.
- Martínez, R.; Boueri, M. A.; Escalona, P. 2005. Correlación entre la evaporación en tina y la evaporación calculada en cinco estaciones. *Bioagro*, 17(2): 79-83.
- Orgaz, F.; Fereres, E. 2001. Riego. En: *El cultivo del olivo*, 4° ed. Eds. Barranco, Fernández-Escobar, Rallo. Madrid, España, Mundi-Prensa. p. 285-306.
- Samani, Z. 2004. Discussion on History of Hargreaves Evapotranspiration equation. *ASCE Journal of Irrig. & Drainage*. 130 (5): 447.
- Sentelhas, P. C.; Gillespie, T. J.; Santos, E. A. 2010. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada, *Agricultural Water Management*, 97(5): 635-644.
- Trajkovic, S. 2007. Hargreaves versus Penman-Monteith under Humid Conditions. *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 133(1): 38-42.
- Yin, Y.; Wu, S.; Zhenh, D.; Yang, Q. 2008. Radiation calibration of FAO56 Penman-Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China, *Agricultural Water Management*, 95(1): 77-84.
- Yorukoglu, M.; Celik, A. N. 2006. A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration. *Energy Conversion and Management*, 47(15-16): 2441-2450.