

Desempeño de la ecuación de Hargreaves en la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_0) en una zona de páramo en Trujillo, Venezuela

Performance of Hargreaves equation in the estimating of reference evapotranspiration (ET_0) in a zone of Andean paramo in Trujillo state, Venezuela

M. Maffei

Universidad de Los Andes, Núcleo Universitario Rafael Rangel, Laboratorio de Fisiología Poscosecha. Av. Isaías Medina Angarita, Núcleo Carmona, Trujillo, Venezuela. CP 3150.

Resumen

El método Penman–Monteith de la FAO conocido también como FAO56-PM, es mundialmente aceptado como patrón para la determinación de la evapotranspiración de referencia (ET_0), desafortunadamente la mayoría de nuestras estaciones meteorológicas no cuentan con registros de algunas variables necesarias como radiación solar u horas de sol, velocidad del viento y humedad relativa que condicionan su cálculo por este método. La ecuación propuesta por Hargreaves-Samani (HG) constituye una alternativa a esta situación, al requerir sólo el registro de temperaturas máximas, mínimas y la radiación extraterrrestre (R_a) obtenida de tablas para la estimación de la ET_0 . Se propuso evaluar el comportamiento de la ecuación de HG bajo las condiciones del páramo andino al compararla con las estimaciones hechas por FAO56-PM. Fueron empleados criterios estadísticos para la comparación entre modelos. Se encontró que la ecuación de HG no ofreció buenas estimaciones de la ET_0 para períodos de tiempo diario (RSME=0,77 mm.d⁻¹; RE= 25,72%; $d= 0,65$; E= 0,13), cada 5 días (RSME= 0,63 mm.d⁻¹; RE=21,23%; $d= 0,63$; E= -0,12), 10 días (RSME=0,56 mm.d⁻¹; RE= 18,74%; $d= 0,65$; E= -0,12) y mensuales (RSME= 0,49 mm.d⁻¹; RE=16,42%; $d= 0,64$; E= -0,12). La ecuación de HG subestimó los valores de ET_0 debido a la alta dependencia de este modelo de la oscilación térmica la cual fue baja en condiciones de páramo, aún con alta insolación. Un modelo de regresión lineal propuesto involucrando la radiación solar medida (R_s) predijo mejor la ET_0 diaria (RSME= 0,36 mm.d⁻¹; RE= 12,22%; $d= 0,94$; E= 0,80) lo que afirma, para las condiciones de este estudio, la alta dependencia de la ET_0 en los datos de R_s .

Palabras clave: evapotranspiración, Hargreaves-Samani, FAO56-PM, zonas altas.

Abstract

The standardized Penman–Monteith method, also known as FAO56-PM, has been recognized as the standard method for the computation of reference crop evapotranspiration (ET_0). Unfortunately, some weather variables especially solar radiation or sunshine hours, relative humidity, and wind speed are often missing which could impede the estimation of ET_0 with the FAO56-PM. The Hargreaves-Samani (HG) equation provides an alternative ET_0 estimation for weather stations with only maximum and minimum temperature records. The objective of this study was to evaluate the behavior of the HG equation under the conditions of an Andean paramo (wastelands) site by comparing it against ET_0 estimates from FAO56-PM. A statistical analysis for the comparison between models was performed. The results indicated that the HG equation does not offer good estimations of the ET_0 for daily (RSME= 0.77 mm.d⁻¹; RE= 25.72%; d = 0.65; E= 0.13), 5 days (RSME=0.63 mm.d⁻¹; RE= 21.23%; d =0.63; E= -0.12), 10 days (RSME= 0.56 mm.d⁻¹; RE=18.74%; d =0.65; E= -0.12) and monthly time steps (RSME= 0.49 mm.d⁻¹; RE=16.42%; d = 0.64; E= -0.12) for the study area. The Hargreaves-Samani method significantly underestimated the values of ET_0 due to the high dependency of this model of the thermal oscillation in conditions of the andean paramo even with high solar radiation. A linear regression model was proposed that includes measured solar radiation (R_s), which resulted on better estimation of daily ET_0 (RSME= 0.36 mm.d⁻¹; RE=12.22%; d =0.94; E=0.80), for the conditions of the study area, demonstrating the high dependency on R_s data.

Key words: evapotranspiration, Hargreaves-Samani, FAO56-PM, highlands.

Introducción

La evapotranspiración (ET) suele definirse en forma general, como el flujo de vapor de agua desde una cubierta, la cual puede ser una superficie cultivada, suelo desnudo, vegetación natural o agua, y es el resultado de la ocurrencia simultánea de los procesos de evaporación y transpiración.

Existen factores que afectan a la ET, los cuales pueden ser agrupados en a) parámetros climáticos, que expresan la demanda evaporativa de la atmósfera, b) los asociados al cultivo, que expresan el comportamiento de éste y c) parámetros de manejo y ambientales, que tienen que ver con la dispo-

Introduction

Evapotranspiration (ET) is normally defined as the water vapor flow from a cover, which can be a cropped surface, bare soil, natural vegetation or water, as is the result of the simultaneous occurrence of the evaporation and transpiration process.

There are factors that affect the ET, which can be grouped in a) weather parameters that express the evaporative demand of the atmosphere, b) the related to the crop that express the behavior of it, and c) handle and environmental parameters, that involve the availability of the water in the soil, nutritional level, limitations

nibilidad de agua en el suelo, topografía, nivel nutricional, limitaciones por salinidad y el manejo particular del productor (Martín de Santa Olalla *et al.*, 2005); lo anterior determina la variación temporal y espacial de la ET.

El correcto cálculo de la ET representa un paso clave en el manejo de los recursos hídricos en zonas con potencialidades de explotación agrícola, especialmente en regiones con clima árido o semiárido en donde el recurso agua es altamente escaso. En la agricultura de los páramos andinos, la información cuantitativa de la ET es de importancia relevante en la elaboración de proyectos y diseño de sistemas de riego, en el manejo del recurso agua durante la temporada de cultivo y en la planificación de épocas de siembra y cosecha. Así mismo la ET es de interés común tanto en estudios climatológicos, hidrológicos y forestales.

Para el cálculo de la ET se precisa de la estimación de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), su definición está suficientemente clara en Allen *et al.* (1998) y ASCE-EWRI (2005), el reportado en FAO56-PM es el método indirecto mundialmente aceptado para su estimación. La ET_0 expresa la demanda o poder evaporativo de la atmósfera en un lugar específico, en un momento determinado y depende únicamente de factores climáticos, además puede ser calculada utilizando sólo parámetros climatológicos sin tomar en cuenta factores asociados al suelo, tipo y manejo del cultivo, piso bioclimático, entre otros.

La cuantificación de la ET_0 en forma directa, es altamente costosa e impráctica en nuestro medio, y su cálculo mediante métodos indirectos aún

by salinity and particular handle of the farmer (Martín de Santa Olalla *et al.*, 2005); the latter determines the temporal and spatial variation of ET.

The correct calculation of ET represents a key step in the handle of water resources in potential agriculture areas, especially in regions with arid or semi-arid weathers where the water resources if really scarce. In the Andean agriculture, the quantitative information of ET has relevant information in the elaboration of projects and designs of irrigation systems, shedule the water resource during the crop season and planning the planting and harvest seasons. Likewise, ET has a common interest in weather, water and forest researches.

For calculating the ET is necessary the stimation of the reference crop evapotranspiration (ET_0), its definition is very clear in Allen *et al.*, (1998) and ASCE-EWRI (2005), the reported in FAO56-PM is the indirect method worldwide accepted for its estimation. ET_0 expresses the demand or evaporative power of the atmosphere in a more specific place, in a determined moment and only depend of weather factors, also, it can be measured only using weather parameters, without considering factors associated to the soil, type and crop handle, bioclimatic level, among others.

The direct quantification of ET_0 , is very expensive and unpractical in our environment, and its calculus using indirect methods is even harder due to the lack of weather registers (Trezza, 2008). Even though there are in the market measurement

es difícil debido a la escases de registros meteorológicos (Trezza, 2008). Si bien es cierto que actualmente existen en el mercado equipos de medición de parámetros climatológicos como lo son las estaciones micrometeorológicas automáticas, éstas no pueden ser adquiridas por todos los productores o asociaciones de ellos, sería una situación ideal poder contar con toda información climatológica necesaria para la estimación temporal de la ET_o , y de esta forma garantizar un manejo eficiente del riego en el área de influencia de la estación.

Una alternativa a esto, es la utilización del método de Hargreaves-Samani (Hargreaves y Samani, 1985), recomendado para las condiciones de Venezuela por Trezza (2008), el cual es de uso general y sólo precisa el valor de la radiación extraterrestre y registros de temperatura máxima y mínima, datos de fácil obtención para nuestras zonas de producción.

El propósito del presente estudio fue estimar la ET_o mediante el uso del método FAO56-PM, utilizando registros diarios de parámetros climatológicos obtenidos con estación meteorológica automática y calibrar la ecuación de Hargreaves-Samani, para las condiciones de una zona de páramo.

Materiales y métodos

Sitio experimental y recolección de datos

Esta investigación se realizó en el poblado de Cabimbú ubicado en las coordenadas 9°9'31" LN, 70°29'26" LO, con altitud de 2880 msnm, perteneciente al municipio Urdaneta, estado Trujillo. Fue instalada una estación

equipments for weather parameters, as the automatic micrometeorological, these cannot be bought by all the farmers or their associations, it would be an ideal situation to have all the necessary weather information for the temporal estimation ET_o , thus, guarantee an efficient irrigation shedule in the influence area of the station.

An alternative for this is using the Hargreaves-Samani method (Hargreaves and Samani, 1985), recommended for the conditions of Venezuela by Trezza (2008), which is of general use and only needs the value of the extraterrestrial radiation and registers of maximum, and minimum temperatures, data easy to obtain for our production areas.

The objective of this research was to estimate the ET_o using the FAO56-PM method, the daily weather parameters registers obtained with the automatic weather station was used to calibrate the Hargreaves-Samani equation for Andean conditions.

Materials and methods

Experimental place and collection of the data

This research was carried out in Cabimbú, located at 9°9'31" NL, 70°29'26" WL, with altitude of 2880 masl, belonging to Urdaneta municipality in, Trujillo state. An automatic meteorological station was installed, brand Davis model Vantage Pro2® with temperature sensors, relative humidity, precipitation, solar radiation and wind speed at 2 m of height on the soil. After registers of 365 days (April 2009-April 2010), were obtained weather

meteorológica automática marca Davis modelo Vantage Pro2® provista de sensores para temperatura, humedad relativa, precipitación, radiación solar y velocidad del viento a 2 m de altura sobre el suelo. A partir de registros de 365 días (abril 2009-abril 2010), fueron obtenidos valores de parámetros climáticos, almacenados en data logger incorporado con un intervalo de 30 min durante las 24 h del día. En el área no existe estación para el registro de parámetros climáticos de ningún tipo, y se encuentra lejos del área de influencia de las instaladas en la región. Se realizó la comprobación de la integridad de los datos utilizados para el presente estudio, de acuerdo a la metodología propuesta por Allen *et al.* (1998).

Ecuaciones empíricas evaluadas

Para evaluar el desempeño de la ecuación de Hargreaves-Samani (HG), se calculó una ET_o utilizando la ecuación de Penman-Monteith propuesta en el documento 56 de la FAO (Allen *et al.*, 1998) identificada en este estudio como FAO56-PM, que fue considerada como patrón, y cuya ecuación es:

$$ET_{oFAO56} = \frac{0,408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)} \quad (1)$$

donde:

ET_{oFAO56} : evapotranspiración de referencia calculada por el método propuesto en FAO-56 [mm.día⁻¹],

Rn : radiación neta en la superficie del cultivo [MJ.m⁻².día⁻¹],

G : densidad del flujo de calor en el suelo [MJ.m⁻².día⁻¹],

T : temperatura del aire [°C],

u_2 : velocidad del viento registrada a 2 m de altura del suelo [m.s⁻¹],

e_s : presión de vapor de saturación [kPa],

parameters stored in data logger incorporated with an interval of 30 min for 24 hours. In the area does not exist any station for the register of weather parameters of any type, and it is far from the influenced area of those installed in the region. The integrity testability of the data used for this research was done according to the methodology proposed by Allen *et al.*, (1998).

Evaluated empirical equations

To evaluate the performance of the Hargreaves-Samani (HG) equation, an ET_o was measured using the Penman-Monteith equation proposed in the document 56 of FAO (Allen *et al.*, 1998) identified in this research was FAO56-PM, this method is considered as the standard, and which equation is:

$$ET_{oFAO56} = \frac{0,408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)} \quad (1)$$

Where:

ET_{oFAO56} : reference evapotranspiration measured by the proposed method in FAO-56 [mm.day⁻¹],

Rn : net radiation in the crop's surface [MJ.m⁻².day⁻¹],

G : flow density of the soil's heating [MJ.m⁻².day⁻¹],

T : air temperature [°C],

u_2 : wind speed registered at 2 m of soil height [m.s⁻¹],

e_s : saturation vapour pressure [kPa],

e_a : vapour pressure [kPa],

$e_s - e_a$: deficit of saturation vapour pressure [kPa],

Δ : slope vapour pressure curve, measured at T temperature of the air [kPa.°C⁻¹],

γ : psychrometric constant [kPa.°C⁻¹].

e_a : presión de vapor [kPa],

$e_s - e_a$: déficit de presión de vapor de saturación [kPa],

Δ : pendiente de la curva de saturación del vapor de agua, calculada a la temperatura del aire [kPa.°C⁻¹],

γ : constante psicrométrica [kPa °C⁻¹].

Se estimó el valor de una ET_{oHG} para ser ajustada a las condiciones locales, cuya expresión está definida en Hargreaves y Samani (1985) y es la siguiente:

$$ET_{oHG} = Ci Ra(T+17,8)(T_{max} - T_{min})0,5 \quad (2)$$

donde:

ET_{oHG} : es la evapotranspiración del cultivo de referencia [mm.d⁻¹];

Ci : es la constante empírica original de 0,0023 propuesta por Hargreaves y Samani (1985),

Ra : es la radiación extraterrestre [mm.d⁻¹] que depende de la latitud y día del año;

T, T_{max}, T_{min} : representan el valor medio, máximo y mínimo de la temperatura del aire [°C], respectivamente.

Se propone un modelo de regresión lineal con el fin de explicar el efecto de la T_{max}, T_{min} y la Rs medida, sobre la ET_o diaria, para posteriormente compararlo con el valor estimado mediante la ecuación FAO56-PM, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$ET_{oreg} = a(T_{max}) + b(T_{min}) + c(Rs) + d \quad (3)$$

donde:

ET_{oreg} : evapotranspiración diaria (mm.d⁻¹),

T_{max}, T_{min} : valor máximo y mínimo de la temperatura del aire [°C], respectivamente,

The value of an ET_{oHG} was estimated to be adjusted to local conditions, which expression is defined in Hargreaves and Samani (1985) and is the following:

$$ET_{oHG} = Ci Ra(T+17.8)(T_{max} - T_{min})0.5 \quad (2)$$

where:

ET_{oHG} : is the reference crop evapotranspiration calculated for the HG method [mm.d⁻¹];

Ci : is the original empirical constant 0.0023 proposed by Hargreaves and Samani (1985)

Ra : is the extraterrestrial radiation [mm.d⁻¹] that depends on the latitude and day of the year

T, T_{max}, T_{min} : represent the medium, maximum and minimum value of the air temperature, respectively [°C],

A lineal regression model is proposed with the aim of applying the effect of T_{max}, T_{min} and the Rs measured, on the daily ET_o , to then compare it to the estimate value using the equation FAO56-PM, according to the following equation:

$$ET_{oreg} = a(T_{max}) + b(T_{min}) + c(Rs) + d \quad (3)$$

Where:

ET_{oreg} : daily evapotranspiration (mm.d⁻¹)

T_{max}, T_{min} : maximum and minimum value of the air temperature [°C], respectively

Rs : solar radiation (mm.d⁻¹)

a, b and c : are regression coefficients,

d : is the intercept (mm.d⁻¹)

The calculation of ET_o values by

Rs: radiación solar (mm.d⁻¹),
a, b y c: son coeficientes de regresión,

d: es el intercepto (mm.d⁻¹).

El cálculo de los valores de ET_o por FAO56-PM y HG se realizó con el uso del programa REF-ET[®] ver. 3.01.02 (Allen, 2004).

Tratamiento estadístico de los datos

Fue utilizada regresión lineal simple ($y = b_0 + b_1 x$), entre los valores diarios de ET_o estimados (ET_{oHG}) y medidos (ET_{oFAO-56}), donde la variable dependiente y , correspondió a los valores medidos y los valores estimados fueron considerados como la variable independiente x . El estudio comparativo entre los métodos de estimación de ET_o y la comprobación del ajuste de los modelos, se realizó con los criterios estadísticos propuestos en Alexandris y Kerkides (2003), Pereira (2004) y Cai *et al.* (2007). El análisis de los datos se realizó apoyados en el uso de los paquetes BioStat[®] ver. 5.2.5.0 (AnalystSoft, 2008) e Irene[®] ver. 1.0 (Irene, 2001).

a) raíz cuadrada del error cuadrático medio, RMSE,

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad 0,0 \leq RMSE \quad (4)$$

El RMSE (mm.d⁻¹) representa la variación entre dos modelos y cuanto menor sea su valor mejor es la concordancia, el óptimo es 0,0.

b) error medio absoluto, MAE

$$MAE = \sum_{i=1}^N \frac{|P_i - O_i|}{N} \quad 0,0 \leq MAE \quad (5)$$

el MAE (mm d⁻¹) expresa la desviación media o sesgo entre dos modelos, y su valor óptimo es 0,0.

FAO56-PM and HG was done using the REF-ET[®] software ver. 3.01.02 (Allen, 2004).

Statistical treatment of the data

A simple lineal regression was used ($y = b_0 + b_1 x$), among the daily values of estimated ET_o (ET_{oHG}) and measured (ET_{oFAO-56}), where the dependent variable y corresponded to the measured values and the estimated values were considered as the independent variable x . The comparative result between the estimation methods of ET_o and the adjustment testability of the models were carried out with the statistical criteria proposed by Alexandris and Kerkides (2003), Pereira (2004) and Cai *et al.* (2007). The analysis of the data was done supported in the use of BioStat[®] ver. 5.2.5.0 (AnalystSoft, 2008) and Irene[®] ver. 1.0 (Irene, 2001).

a) Root mean square error, RMSE,

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad 0,0 \leq RMSE \quad (4)$$

The RMSE (mm.d⁻¹) represents the variation between both models and the lower its value the better is the concordance, the optimum is 0.0

b) Mean absolute error, MAE

$$MAE = \sum_{i=1}^N \frac{|P_i - O_i|}{N} \quad 0,0 \leq MAE \quad (5)$$

The MAE expresses the mean deviation between both models, and its optimum value is 0.0,

c) relative error, RE = $\frac{RMSE}{\bar{O}}$ 100 (6),

c) error relativo, $RE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \cdot 100$ (6)

d) coeficiente de determinación, R^2

$$R^2 = \frac{[\sum(P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum(P_i - \bar{P})^2 \sum(O_i - \bar{O})^2}, \quad 0,0 \leq R^2 \leq 1,0 \quad (7)$$

e) Índice de concordancia de Willmott (1982), d

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right], \quad 0,0 \leq d \leq 1,0 \quad (8)$$

Un valor d de 1 indica una concordancia perfecta, mientras que un valor de 0 refleja una concordancia pobre.

f) Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe modificado (Krause *et al.*, 2005), E .

$$E = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad -\infty \leq E \leq 1,0 \quad (9)$$

Conocido también como eficiencia de modelado, revela una concordancia perfecta si el valor es 1, de ser 0 indica una concordancia pobre; si resulta negativo, señala que un valor promedio obtenido debe ser predicho por $ET_{oFAO-56}$ y no por ET_{oHG} .

g) Coeficientes de regresión b_0 y b_1 , para la regresión con el origen que relaciona los conjuntos de datos P_i y O_i .

$$b_1 = \frac{\sum(P_i - \bar{P}_i)(O_i - \bar{O})}{\sum(P_i - \bar{P}_i)^2} \quad (10)$$

$$b_0 = \bar{O} - b_1 \bar{P}_i \quad (11)$$

donde:

P_i : son los valores estimados por los modelos HG y HGc (mm.d⁻¹); i: 1, 2, . . . ,N.

d) determination coefficient, R^2 ,

$$R^2 = \frac{[\sum(P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum(P_i - \bar{P})^2 \sum(O_i - \bar{O})^2}, \quad 0,0 \leq R^2 \leq 1,0 \quad (7)$$

e) Concordance index of Willmott (1982), d

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right], \quad 0,0 \leq d \leq 1,0 \quad (8)$$

A d value of 1 indicates perfect concordance, while a value of 0 shows poor concordance

f) Efficient index of Nash-Sutcliffe modified (Krause *et al.*, 2005), E .

$$E = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad -\infty \leq E \leq 1,0 \quad (9)$$

Also known as modeled efficient, reveals a perfect concordance if the value is 1, if the value indicates 0, it means a poor concordance; if it is negative, it mentions that an averaged value obtained must be indicated by $ET_{oFAO-56}$ and not by ET_{oHG} .

g) Regression coefficients b_0 y b_1 , for the regression with the origin that relates the data P_i and O_i .

$$b_1 = \frac{\sum(P_i - \bar{P}_i)(O_i - \bar{O})}{\sum(P_i - \bar{P}_i)^2} \quad (10)$$

$$b_0 = \bar{O} - b_1 \bar{P}_i \quad (11)$$

where:

P_i : are the estimated values by the models of HG and HGc (mm.d⁻¹); i: 1, 2, . . . ,N.

\bar{P}_i : averaged value of the calculated ET_o using the models HG and HGc (mm.d⁻¹)

O_i : are the values calculated with $FAO56-PM$ (mm.d⁻¹)

\bar{O} : average value of the calculated ET_o using $FAO56-PM$ (mm.d⁻¹)

\bar{P}_i : valor promedio de ET_o calculada utilizando los modelos HG y HGe (mm.d⁻¹).

O_i : son los valores calculados mediante FAO56-PM (mm.d⁻¹).

\bar{O} : valor promedio de ET_o calculada utilizando FAO56-PM (mm.d⁻¹).

N: es el número de observaciones.

El desempeño del modelo a ajustar respecto del patrón, es bueno cuando $d \geq 0,95$ y $RE \leq 20\%$ (Stockle *et al.*, 2004), si además b_1 está cerca de 1,0 (1,0 \pm 0,10) y R^2 es mayor a 0,80.

Resultados y discusión

En el cuadro 1 se presentan las condiciones meteorológicas registradas durante el desarrollo de este estudio, así como los valores medios diarios de ET_o estimados por FAO56-PM y HG.

La comparación entre promedios de evapotranspiración estimados por $ET_{oFAO-56}$ versus ET_{oHG} para periodos diario, cada 5 días, 10 días y mensual son presentados en el cuadro 2; de igual manera se presentan los resultados de un modelo de regresión propuesto que explica el efecto de la T_{max} , T_{min} y la radiación solar (R_s) medida, sobre la ET_o .

Para el caso de la estimación diaria (ET_{oHGd}) se encontró un mal desempeño de la ecuación de HG para el cálculo de la ET_o , esto se evidenció en el valor de RMSE (0,77 mm.d⁻¹) un elevado error relativo (25,7%), el índice de concordancia d fue de 0,65, un índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0,13 y el R^2 fue bajo (0,38). Existe literatura extensa que reporta que la ecuación de HG arrojó estimaciones confiables de ET_o para periodos de tiempo mayores a 5 días (Hargreaves,

N: is the number of observations

The performance of the model to be adjusted regarding the pattern is good when $d \geq 0.95$ and $RE \leq 20\%$ (Stockle *et al.*, 2004), if b_1 is near to 1.0 (1.0 \pm 0.10) and R^2 is higher to 0.80.

Results and discussion

In table 1, the meteorological conditions registered during the development of this research, as well as the mean daily values of ET_o estimated by FAO56-PM and HG are presented.

The comparison among the estimated evapotranspiration averages of $ET_{oFAO-56}$ versus ET_{oHG} for daily periods every 5, 10 days and monthly is, presented in table 2; likewise, the results of a regression model proposed are presented, which explain the T_{max} , T_{min} and the solar radiation on ET_o .

For the case of the daily estimation (ET_{oHGd}) was found a bad performance of the HG equation for the calculus of ET_o , this was evidenced in the RMSE value (0.77 mm.d⁻¹) an elevate relative error (25.7%), the concordance index of d was of 0.65, an efficient index of Nash-Sutcliffe of 0.13 the R^2 was low (0.38). There is a lot of bibliography that report that the HG equation gives trustable estimations of ET_o for time periods higher to 5 days (Hargreaves, 1994; Jensen *et al.*, 1997; Droogers y Allen, 2002), though some exact daily measures have been done by lysimeter and estimations of ET_o by HG (Hargreaves and Allen, 2003), these authors conclude that daily estimations using the equation HG might be subject to mistakes, due to the rank's influence of the temperature

Cuadro 1. Registros mensuales de las condiciones meteorológicas durante el período de estudio y valores de ET_o estimados por FAO56-PM y HG.

Table 1. Monthly registers of the meteorological conditions during the research's period and ET_o values estimated by FAO56-PM and HG.

	2009												2010		
	A	M	Ju	J	Ag	S	O	N	D	E	F	Ma			
Tmax (°C)	14,4	15,6	14,4	15,5	16,1	16,7	16,0	15,3	15,0	15,6	15,7	17,5			
Tmin (°C)	8,7	8,9	8,5	9,1	9,2	9,2	9,2	9,0	8,1	7,7	7,7	9,5			
Tmed (°C)	11,6	12,3	11,5	12,3	12,7	13,0	12,6	12,2	11,6	11,7	11,7	13,5			
Tdif (°C)	5,7	6,7	5,9	6,4	6,9	7,5	6,8	6,3	6,9	7,9	8,0	8,0			
HR (%)	86,1	81,2	82,4	79,7	80,4	78,4	79,5	83,6	75,6	62,9	60,9	77,6			
u ² (m.s ⁻¹)	3,4	3,3	3,2	3,3	2,7	4,7	2,7	2,8	3,3	3,6	3,5	3,6			
Ppt (mm)	43,6	94,0	74,8	75,0	44,4	39,6	38,8	32,4	9,6	0,0	0,0	4,2			
Ra (mm.d ⁻¹)	15,5	15,3	15,1	15,1	15,3	15,1	14,3	13,2	12,7	13,1	14,1	15,0			
Rs (mm.d ⁻¹)	6,4	7,3	7,5	7,3	7,3	8,8	6,9	5,5	6,5	8,2	8,1	7,4			
FAO56-PM (mm.d ⁻¹)	2,5	2,9	2,8	3,0	3,0	3,4	2,8	2,2	2,7	3,6	3,7	3,2			
HG (mm.d ⁻¹)	2,5	2,7	2,4	2,6	2,8	2,8	2,5	2,2	2,2	2,6	2,8	3,1			

A=Abril; M=Mayo; Ju=Junio; J=Julio; Ag=Agosto; S=Septiembre; O=Octubre; N=Noviembre; D=Diciembre; E=Enero; F=Febrero; Ma=Marzo

Cuadro 2. Comparación entre promedios de evapotranspiración estimados por HG versus estimados mediante el modelo FAO56-PM para periodos diario, 5 días, 10 días y mensual.

Table 2. Comparison between evapotranspiration averages estimated by HG versus estimated by the FAO56-PM model for daily periods, 5 days, 10 days and monthly.

	N	O	Pi (mm.d ⁻¹)	RMSE	MAE	RE (%)	R ²	d	E	b ₁	b ₀	p(t) P<0,05
ET _{oHGd}	365	2,98	2,60	0,7669	0,5529	25,72	0,3775	0,6460	0,1348	1,3374	-0,4903	0,0000
ET _{oHG5d}	73	2,98	2,64	0,6328	0,4655	21,23	0,2196	0,6309	-0,1170	0,7688	0,9474	0,0000
ET _{oHG10d}	36	2,98	2,60	0,5584	0,4272	18,74	0,4261	0,6527	-0,1290	1,2615	-0,2948	0,0000
ET _{oHGmes}	12	2,98	2,60	0,4901	0,3800	16,45	0,4467	0,6413	-0,3686	1,1436	0,0028	0,0021
ET _{oHG}	365	2,98	2,98	0,3643	0,2427	12,22	0,7912	0,9430	0,8047	0,9765	0,0562	0,8208

N: Número de datos

O: valor promedio de ET_o calculada utilizando FAO56-PM

Pi: valor promedio de ET_o calculada utilizando los modelos HG y HGC

RMSE: raíz cuadrada del error cuadrático medio

MAE: error medio absoluto

RE: error relativo

R²: coeficiente de determinación

d: índice de concordancia de Willmott

E: índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe modificado

b₀: b₁: coeficientes de regresión

p(t): probabilidad

1994; Jensen *et al.*, 1997; Droogers y Allen, 2002), aunque se han hecho algunas mediciones diarias exactas por lisimetría y estimaciones de ET_0 por HG (Hargreaves y Allen, 2003), estos autores concluyeron que estimaciones diarias por medio de la ecuación de HG podrían estar sujetas a errores, debido a la influencia del rango de temperatura producto de los frentes de condiciones de lluvia, velocidad del viento y cobertura de nubes, además recomendaron que sea utilizada en estimaciones promediadas de 5 días o períodos más largos. De acuerdo a los resultados obtenidos, la ecuación de ET_{0HGd} subestimó los valores de ET_0 para el área en estudio, el valor medio diario arrojado por este modelo fue de 2,60 $mm.d^{-1}$ mientras que por intermedio de FAO56-PM fue de 2,98 $mm.d^{-1}$.

Al evaluar el comportamiento de la ecuación de HG en la estimación de la ET_0 para períodos de tiempo de 5 días, 10 días y mensuales (figura 1) se encontró que no se ajustó a la encontrada por FAO56-PM, aunque se observó una mejora a medida que aumentó el período de tiempo empleado para la estimación evidenciado en los valores RMSE de 0,63, 0,56 y 0,49 $mm.d^{-1}$; RE de 21,23%, 18,74% y 16,45%; además valores de 0,63, 0,65 y 0,64 para el indicador d para 5, 10 días y mensual respectivamente (cuadro 2).

Los resultados negativos del estadístico comparativo E para los períodos de 5, 10 días y mensual (-0,11, -0,13, -0,37 respectivamente), indicaron que no fue correcta la estimación hecha por HG y debe ser obtenida utilizando FAO56-PM para los mismos períodos de tiempo. Los datos obtenidos para 5 días, 10 días y mensual median-

product to the product fronts rainy conditions, wind speed and cloud cover; they also recommend it be used in averaged estimations of 5 days or longer periods. According to the results obtained, the equation of ET_{0HGd} underestimate the ET_0 values for the area under research, the daily mean value showed by this model was of 2.60 $mm.d^{-1}$ while by the intermediate of FAO56-PM was of 2.98 $mm.d^{-1}$.

Evaluating the equation behavior of HG in the estimation of ET_0 for time periods of 5 days, 10 days or monthly (figure 1) was found that it did not adjust to the one found on FAO56-PM, though was observed an improvement at the time that increased the time's periods employed for the estimation showed in the RMSE values of 0.63, 0.56 and 0.49 $mm.d^{-1}$; RE of 21.23%, 18.74% and 16.45%; and values of 0.63, 0.65 and 0.64 for the indicator of d for 5, 10 days and monthly respectively (table 2).

The negative results of the comparative statistical of E for periods of 5, 10 days and monthly (-0.11, -0.13, -0.37 respectively), indicated that the estimation by HG was not correct and must be obtained using FAO56-PM for the same periods of time. The data obtained for 5 days, 10 days and monthly using HG underestimated the values of ET_0 (2.64, 2.60 and 2.60 $mm.d^{-1}$ respectively) when compared to FAO56-PM (2.98 $mm.d^{-1}$), this could have also been influenced by the wind speed of the research area (table 1), because it is known that HG equation had a tendency to underestimate the ET_0 values under wind's conditions (Allen *et al.*, 1998), as well as by the high evaporative demands conditions

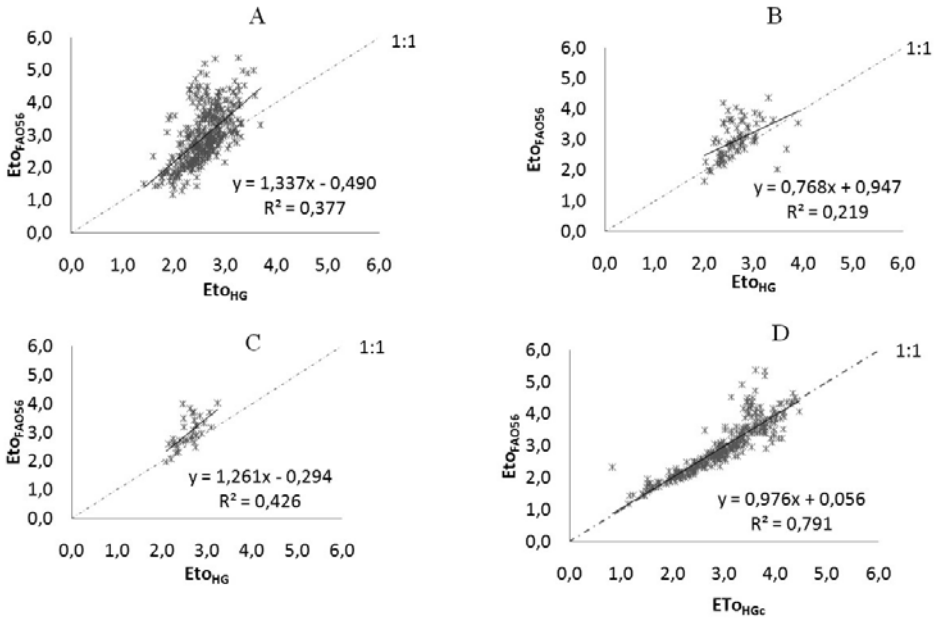


Figura 1. Comparación gráfica entre los valores de ET_0 (mm) diario (A), cada 5 días (B), 10 días (C) y HG_{reg} diario (D) estimados mediante FAO56-PM y ajustados por HG.

Figure 1. Graphic comparison among the ET_0 values (mm) (A) every 5 days (B), 10 days (C) and HG_{reg} daily (D) estimated using FAO56-PM and adjusted by HG.

te HG subestimaron los valores de ET_0 (2,64, 2,60 y 2,60 mm.d^{-1} respectivamente) al compararlo con FAO56-PM (2,98 mm.d^{-1}), esto posiblemente también fue influenciado por la velocidad del viento del área de estudio (cuadro 1), pues es conocido que la ecuación de HG tuvo una tendencia a subestimar los valores de ET_0 bajo condiciones de viento fuerte (Allen *et al.*, 1998) así como por las condiciones de alta demanda evaporativa de la atmósfera (Gavilán y Castillo-Llanque, 2009) propias de la zona considerada (cuadro 1).

Se comprobó que valores diarios bajos en la diferencia entre tempera-

of the atmosphere (Gavilán and Castillo-Llanque, 2009) characteristics of the considered area (table 1).

It was proved that daily low values in the difference among maximum and minimum temperatures of the air, were related with cloudy days, therefore, low values of R_s as well as cloudy night with minimum elevated temperature, the difference between the maximum and minimum temperature of the air, were related to the cloudy grade in an area (Allen *et al.*, 1998), on the other hand, the squared root of the temperatures difference was related to the daily R_s .

turas máximas y mínimas del aire, estuvieron asociados con días nublados y por lo tanto bajos valores de Rs, así como también noches nubladas con valores de temperatura mínimas elevadas; la diferencia entre la temperatura máxima y mínima del aire se relacionó con el grado de nubosidad en una localidad (Allen *et al.*, 1998), por otro lado la raíz cuadrada de la diferencia de temperaturas estuvo muy relacionada con la Rs diaria. Los páramos presentan accidentada topografía y la fisiografía predominante es de montañas divididas por profundos cañones y pocas zonas planas, son comunes los periodos de ascenso y descenso de neblina de acuerdo con el movimiento de las masas de aire, lo que condicionó la oscilación térmica, las temperaturas medias fueron relativamente bajas a pesar de los altos niveles de radiación y velocidad del viento (Trezza, 2008). Un factor que contribuyó a la falta de ajuste encontrado mediante la ecuación de HG, fue la poca variación que durante el año presentó la Ra en zonas cercanas a los 10° de latitud norte y sur (Allen *et al.*, 1998), lo que la colocó en desventaja para la estimación de la ET_o ; caso contrario ocurrió con la ecuación FAO56-PM, que consideró además de otros parámetros microclimáticos a la Rs (ecuación 1) para el cálculo de la ET_o , parámetro éste con mayor variación interdiaria.

En un intento por encontrar un modelo de regresión lineal que explicara el efecto de la T_{max} , T_{min} y la Rs medida, sobre la ET_o diaria y su comparación con valor estimado por FAO56-PM, se obtuvo la siguiente ecuación:

Andean paramo have a rugged topography and the predominant physiography are mountains divided by deep canyons and little flat areas, the ascend and descend periods of fog according to the movement of air masses, which conditioned the thermal oscillation, the medium temperatures were relatively low in spite of the high radiation levels and the wind speed (Trezza, 2008). A factor that contributed to the lack of adjustment found using the HG equation, was the little variation that during the year presents the Ra in areas close to 10° of north and south latitude (Allen *et al.*, 1998), which put it in disadvantage for the estimation of ET_o ; contrary case occurred with the FAO56-PM equation which considered the Rs, besides other micro-climatic parameters (equation 1), for the calculus of ET_o , parameter with a higher inter-daily variation.

In a try to find a lineal regression model that could explain the effect of the T_{max} , T_{min} and the Rs measured, on the daily ET_o and its comparison to an estimated value by FAO56-PM, was obtained the following equation:

$$ET_{oreg} = -1.1163 + 0.1307(T_{max}) - 0.0134(T_{min}) + 0.2988(Rs) \quad (12)$$

where:

ET_{oreg} : daily evapotranspiration (mm.d⁻¹),

T_{max} , T_{min} : maximum and minimum value of the air temperature [°C], respectively

Rs: solar radiation (mm.d⁻¹),

This model explained the 79.1% of found variability ($R^2 = 0.7912$) the calibration indicators obtained

$$ET_{\text{oreg}} = -1,1163 + 0,1307(T_{\text{max}}) - 0,0134(T_{\text{min}}) + 0,2988(Rs) \quad (12)$$

donde:

ET_{oreg} : evapotranspiración diaria (mm d⁻¹)

T_{max} , T_{min} : valor máximo y mínimo de la temperatura del aire [°C], respectivamente

Rs: radiación solar en mm.d⁻¹.

Este modelo logró explicar hasta el 79,1% de la variabilidad encontrada ($R^2 = 0,7912$) los indicadores de calibración obtenidos con respecto al patrón (FAO56-PM) fueron los mejores, el RMSE fue de 0,24 mm.d⁻¹, 12% de error relativo, se obtuvo un índice de concordancia d de 0,94 y el e resultó con valor de 0,97 indicando una alta eficiencia del modelo. La anterior ecuación presenta la dificultad de poder medir o estimar la Rs en forma apropiada para las condiciones de los páramos.

Conclusiones

La estimación de la ET_0 en un lugar determinado es una labor que requiere un estudio de consideración, ya que es un fenómeno no lineal y complejo que depende de varias condiciones que actúan recíprocamente, entre ellos destacan los factores climatológicos tales como temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, radiación y la nubosidad.

Dado que la ecuación de HG fue directamente dependiente de la oscilación térmica, ésta no ofreció estimaciones aceptables de ET_0 bajo las condiciones del páramo andino para ninguno de los períodos de tiempo considerados (diario, cada 5 y 10 días, y mensual). Esta oscilación térmica no res-

regarding the pattern (FAO56-PM) were the best, the RMSE was of 0.24 mm.d⁻¹, 12% of relative error, a concordance index of d was obtained of 0.94 and e resulted with a value of 0.97 indicating a high efficiency of the model. The above equation presents the difficulty of measuring or estimating the Rs appropriately for the paramo conditions.

Conclusions

The ET_0 estimation in a determined place is a job that required a consideration study, since it is a non linear and complex phenomenon, which depends on different conditions that act reciprocally, among these are the climatologic factors, such as the air temperature, relative humidity, wind speed, radiation and cloudiness.

Since the HG equation was depended directly to the thermal oscillation, this did not offer acceptable estimations of ET_0 under the Andean paramo conditions for none of the considered time's periods (daily, every 5 and 10 days and monthly). This thermal oscillation did not respond linearly to the Rs variation in high areas; that is, low oscillations can be registered due to days with abundant cloudiness where are registered low values of maximum temperatures product of the altitude; likewise, during those days relatively clear, Rs can be high, except the maximum temperature because of the same condition of high mountains.

Recommendations

Further efforts for the adequacy of estimation models of ET_0 based on

pondió linealmente a la variación de la R_s en las zonas altas; es decir, se pueden registrar oscilaciones bajas debido a días con abundante nubosidad donde se registran valores bajos de temperaturas máximas producto de la altitud; de igual manera durante aquellos días relativamente despejados puede ser alta la R_s , no así la temperatura máxima debido a la misma condición de montañas altas.

Recomendaciones

Los esfuerzos futuros para la adecuación de modelos de estimación de ET_0 basados en temperatura y radiación que puedan ser utilizados en las zonas altas del país, deben estar orientados a la búsqueda de la correcta estimación de la R_s , lo que demanda más estudios con modelos de estimación de R_s orientados a solventar este problema.

Agradecimiento

Trabajo cofinanciado por el Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico de la Universidad de Los Andes (CDCHT-ULA) y el Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACIT) códigos NURR-C-507-09-01-B y S12002000372, respectivamente. De igual modo merecen nuestro agradecimiento los Srs. Justo y Orlando Moreno en la Finca Vista Alegre en el Páramo de Cabimbu por la colaboración prestada para el desarrollo del presente estudio.

Literatura citada

Alexandris, S. y P. Kerkides. 2003. New empirical formula for hourly

the temperature and radiation that might be used in the high areas of the country, must be oriented to the correct estimation search of R_s , which demands more thorough studies with estimation R_s models oriented to solve this problem.

Acknowledgment

Research co-financed by the Scientific, Humanistic and Technological Development of the Board of Universidad de los Andes (CDCHT-ULA) and the National Science and Technology Found (FONACIT) codes NURR-C-507-09-01-B and S12002000372, respectively. Likewise, we thank Mr. Justo and Mr. Orlando Moreno, in the Vista Alegre farm in Cabimbu paramo, by their collaboration for developing this research.

End of english version

estimations of reference evapotranspiration. Agric. Water Manage 60(3):157-180.

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. United Nations Food and Agriculture Organization, Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy. 300 pp.

Allen, R.G. 2004. REF-ET: reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE standardized equations. Version 3.0. University of Idaho. Disponible en: <http://www.kimberly.uidaho.edu/ref-et/index.html>.

AnalystSoft. 2008. BioStat. Programa de análisis estadístico. Versión 5.2.5.0. Disponible en: <http://www.analystsoft.com/es/>.

- ASCE-EWRI, 2005. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Technical Committee report to the Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers from the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. ASCE-EWRI, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, VA 20191-4400, 173 pp.
- Cai, J., Y. Liu, T. Lei y L.S. Pereira. 2007. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. *Agricultural and Forest Meteorology* 145(1-2):22-35.
- Droogers, P. y R.G. Allen. 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrig. Drain. Syst.* 16(1):33-45.
- Gavilán, P. y F. Castillo-Llanque. 2009. Estimating reference evapotranspiration with atmometers in a semiarid environment. *Agricultural Water Management* 96(3):465-472.
- Hargreaves, G.H. 1994. Defining and using reference evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Eng.* 120(6):1132-1139.
- Hargreaves, G.H. y Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric.* 1(2):96-99.
- Hargreaves, G.L., G.H. Hargreaves y J.P. Riley. 1985. Irrigation water requirements for Senegal River Basin. *J. Irrig. Drain. Eng.* 111(3):265-275.
- Hargreaves, G.H. y R.G. Allen. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 129(1):53-63.
- Irene. 2001. Integrated Resources for Evaluating Numerical Estimates. ISCI Software. Italy. Disponible en: <http://www.isci.it/tools>.
- Jensen, D.T., G.H. Hargreaves, B. Temesgen y R.G. Allen. 1997. Computation of ETo under nonideal conditions. *J. Irrig. Drain. Eng.* 123(5):394-400.
- Krause, P., D.P. Boyle y F. Bäse. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Adv. Geosci.* 5:89-97.
- Martín de Santa Olalla, F., J.F.O. Álvarez y R.L. Urrea. 2005. *Agua y agronomía*. España. Editorial Mundi Prensa. 606 p.
- Pereira, A.R. 2004. The Priestly-Taylor parameter and the decoupling factor for estimating reference evapotranspiration. *Agric. For. Meteorol.* 125(3-4):305-313.
- Stöckle, C.O., J. Kjelgaard y G. Bellocchi. 2004. Evaluation of estimated weather data for calculating Penman-Monteith reference evapotranspiration. *Irrig. Sci.* 23(1):39-46.
- Trezza, R. 2008. Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en Venezuela. ¿Cuál método utilizar?. *Bioagro* 20(2):89-95.
- Willmott, C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 63(11):1309-1313.