



Ingeniería. Investigación y Tecnología

ISSN: 1405-7743

iit.revista@gmail.com

Universidad Nacional Autónoma de México
México

Mundo-Molina, M.D.

Estandarización de las ecuaciones para estimar la evapotranspiración del cultivo de referencia
Ingeniería. Investigación y Tecnología, vol. X, núm. 2, abril-junio, 2009, pp. 125-135

Universidad Nacional Autónoma de México
Distrito Federal, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40411431004>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Estandarización de las ecuaciones para estimar la evapotranspiración del cultivo de referencia

Standardized Referente Evapotranspiration Equation

M.D. Mundo-Molina

Centro de Investigación de la Facultad de Ingeniería.

Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

E-mail: ic_ingenieros@yahoo.com.mx

(Recibido: marzo de 2007; aceptado: junio de 2008)

Resumen

En este trabajo se presenta una discusión sobre la necesidad de estandarizar las ecuaciones para estimar la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET₀), con el objeto de disponer de una fórmula que permita estimar dicha variable de manera precisa, con una ecuación estandarizada tipo Penman-Monteith. Por tal razón, se realiza un análisis comparativo de los métodos más precisos para estimar la ET₀ en algunas zonas agrícolas de México, con el afán de impulsar y promover que asociaciones, instituciones, técnicos, profesionales, investigadores del tema y compañías proveedoras de equipos utilicen ecuaciones de Penman-Monteith estandarizadas para estimar ET₀ con fines de aplicación o investigación en aquellas zonas en donde sea factible hacerlo. Se seleccionó la estación climatológica automatizada CIANO (27° 22' 14 latitud Norte y 109° 55' 4 longitud Oeste), emplazada en la manzana 910, lote 3, del valle del Yaqui, situada a 37 metros sobre el nivel del mar, con la cual se realizaron comparaciones en la estimación de ET₀ con las siguientes ecuaciones: Penman-Monteith ASCE (PMA), Penman-Monteith FAO 56 (PM FAO 56), Penman-Monteith estandarizado ASCE (PM Std. ASCE) y la estación automatizada CIANO, que utiliza una versión denominada Penman-Monteith Campbell-Scientific (Est. Aut). De acuerdo a los resultados obtenidos, se observaron diferencias importantes en la estimación de ET₀ entre los métodos patrón (PMA) y la estación automatizada CIANO, atribuidas en este caso a la no estandarización de la ecuación que emplea ésta última. El coeficiente de correlación entre ambos métodos fue de 0.92, con una desviación estándar de 1.63 mm, un error cuadrático medio de 0.60 mm y una eficiencia en la estimación de ET₀ respecto al método patrón del 87%. Al igual que la estación CIANO se realizaron tres comparaciones más, en tres estaciones distintas localizadas en el Valle del Yaqui con idénticos resultados.

Descriptores: Evapotranspiración del cultivo de referencia, ecuación de Penman-Monteith, estación climatológica automatizada, riego, ciclo hidrológico.

Abstract

In this paper is presented a discussion on the necessity to standardize the Penman-Monteith equations in order to estimate ET₀. The proposal is to define an accuracy and standardize equation based in Penman-Monteith. The automated weather station named CIANO (27° 22' 14 North latitude and 109° 55' west longitude) it was selected to make comparisons. The compared equations were: a) CIANO weather station, b) Penman-Monteith ASCE (PMA), Penman-Monteith FAO 56 (PM FAO 56), Penman-Monteith estandarizado ASCE (PM Std. ASCE). The results were: a) There are important differences between

PMA and CIANO weather station. The differences are attributed to the nonstandardization of the equation CIANO weather station, b) The coefficient of correlation between both methods was of 0,92, with a standard deviation of 1,63 mm, an average quadratic error of 0,60 mm and one efficiency in the estimation of ET₀ with respect to the method pattern of 87%.

Keywords: *Evapotranspiration, Penman-Monteith equation, weather station, irrigation, hydrological cycle.*

Introducción

Uno de los componentes más importantes del ciclo hidrológico es la evapotranspiración (ET). Esta variable es imprescindible en los proyectos de ingeniería de regadíos; de la precisión en su estimación depende, entre otros factores, la correcta satisfacción de la demanda de agua de los cultivos, la adecuada determinación de la fecha y frecuencia de riego. Por otra parte, para implementar un buen programa de riegos se requiere de una adecuada estimación de la cantidad de agua que será usada por los cultivos (Jensen *et al.*, 1997; Hatfield *et al.*, 1996), donde la estimación de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET₀) no sólo es necesaria para los fines antes enunciados, sino también para determinar el rendimiento del agua en todo el sistema (Raghuvanshi *et al.*, 1997). Así, la gestión eficiente del agua en los sistemas de riego depende, entre otros factores, de una estimación adecuada de los requerimientos de agua de las plantas (Michalopoulos *et al.*, 1991; Hashmi *et al.*, 1998; Al-Ghobari, 2000 b). Algunas actividades importantes en la relación “evapotranspiración-demanda de agua de los cultivos” en dichos sistemas son los siguientes:

Planeación del recurso agua

La ET₀ además de ser usada para estimar los requerimientos de agua de los cultivos, permite realizar balances de dicho recurso con fines de planeación, para calcular, por ejemplo, la disponibilidad del agua para un ciclo agrícola determinado.

Uso eficiente del agua

En muchos sistemas de riego, especialmente los que operan por gravedad (que en casi todos los países subdesarrollados y en algunos desarrollados ocupan la mayor superficie de riego), el agricultor es el que decide con base a su criterio el momento y la cantidad de riego para sus cultivos. Esta decisión en ocasiones no es del todo inadecuada, sin embargo y en general, cuando no es correcta el dispendio es grande (Mundo *et al.*, 2002). Por

ejemplo, Mizyed (1990) cuantificó el error en la estimación de las demandas de agua en el sistema de riego Mahaweli en Sri Lanka, detectándose errores con una desviación estándar del 40%. Por otra parte, se ha comprobado en experimentos de campo que las estimaciones de las necesidades hídricas de los cultivos se puede reducir entre un 15 y 30 %, lo que significa un ahorro de agua importante en los sistemas de riego, cuando se toma en cuenta la climatología de la zona y se aplican métodos adecuados para estimar ET₀. Es verdad que existen agricultores con experiencia y que son capaces de determinar las fechas de riego y las cantidades de agua que necesitan sus cultivos para obtener adecuados rendimientos sin dispendios, pero éstos constituyen la minoría. Lo recomendable es estimar ET₀ de manera precisa, no sólo a nivel parcelario, de todo el sistema u a escala regional. Sin duda, políticas de riego en los que se consideren estos aspectos, ayudarán a evitar dispendios en el sector agrícola, que es el mayor demandante y consumidor de agua en México.

Rendimiento de los cultivos

La subestimación de la evapotranspiración puede reducir el rendimiento de los cultivos, debido a que retrasa la aplicación del riego y se somete a las plantas a estrés hídrico (Stockle *et al.*, 1991). Braunworth *et al.* (1987) realizaron un estudio para el maíz bajo cuatro tratamientos de riego, en dos tipos de suelo y dos escenarios de clima distintos, sus principales conclusiones fueron:

1. Existe una reducción de rendimiento entre 1 y 7% si ET₀ se subestima un 15% en todo el periodo de crecimiento del cultivo.
2. Existe una reducción de rendimiento entre 8 y 27% si ET₀ se subestima un 30% en todo el periodo de crecimiento del cultivo.
3. Estas reducciones del rendimiento resultan de un retraso del riego y/o riego insuficiente.

Así, la correcta estimación de ET₀ tiene un impacto en el rendimiento del agua y de los cultivos. Ante esta

perspectiva la estrategia deberá ser maximizar la producción por unidad de agua usada (Mundo *et al.*, 2002); Pereira *et al.* (1996) sostienen que las investigaciones en el tema deben centrarse en el incremento de la producción por unidad de tierra usada y por unidad de agua consumida por evapotranspiración.

Como se ha afirmado en los párrafos anteriores la ET₀ es fundamental para la gestión eficiente del agua de riego. Así, a lo largo de los últimos 100 años, investigadores de diversas latitudes del mundo han desarrollado diversas ecuaciones empíricas y semiempíricas para estimar dicha variable.

Varias de éstas se han vuelto clásicas en ciertas regiones por su aplicación a proyectos de riego para el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos y la programación del riego; sin embargo, a pesar de que actualmente existe consenso sobre los mejores métodos para estimarla, hay una preocupación en la comunidad científica (como lo demuestran las investigaciones más recientes sobre el tema), no sólo por su aplicación adecuada, sino también por la *estandarización de las mismas*, especialmente la ecuación combinada de Penman-Monteith ASCE (PMA), catalogada como una de las más precisas para estimar ET₀. En este trabajo se presenta una discusión centrada en analizar la necesidad de utilizar ecuaciones estandarizadas no sólo en las estaciones automatizadas, sino cuando se usen dichas ecuaciones con fines de aplicación o investigación.

Materiales y métodos

Para demostrar la diferencia de resultados en la estimación de ET₀ con las ecuaciones semi-empíricas de Penman-Monteith (PM) no estandarizadas y estandarizadas, se seleccionó la estación climatológica automatizada CIANO ($27^{\circ} 22' 14$ latitud norte y $109^{\circ} 55' 4$ longitud oeste), emplazada en la manzana 910, lote 3, del valle del Yaqui, a 37 metros sobre el nivel del mar, que mide diariamente desde 1997 a la fecha, las siguientes variables climatológicas: temperatura, humedad relativa, precipitación pluvial, radiación solar, dirección y velocidad del viento.

El clima de la zona de estudio es semiárido, con alta insolación, principalmente en el lapso de estiaje que va de marzo a julio. La precipitación media anual es de 272 mm aproximadamente, los vientos dominantes son del Norte y Noroeste en otoño e invierno y el resto del año son del suroeste y Oeste (de poca intensidad) y fuertes únicamente en época de lluvias. Para estimar ET₀ con cada una de las versiones seleccionadas del método PM, en este trabajo se siguió la siguiente metodología:

1. Verificación de la homogeneidad de los datos de clima de la estación automatizada CIANO, mediante la técnica de rachas (Thom, 1969).
2. Cálculo del promedio diario de cada una de las variables de la estación automatizada CIANO para el periodo 1997-2001.
3. Estimación de ET₀ diaria con el método patrón: PMA, para el periodo antes enunciado.
4. Estimación y comparación de ET₀ diaria con los métodos no estandarizados y estandarizados con datos de la estación CIANO para el periodo 1997-2001.
5. Análisis de resultados.
6. Discusión.
7. Conclusiones.

Estandarización de las ecuaciones para estimar ET₀

Al revisar la literatura especializada, se puede comprobar que se han realizado muchas comparaciones de las diversas ecuaciones para estimar ET₀ alrededor del mundo, tanto empíricas como semiempíricas, en diferentes latitudes, condiciones climáticas y de entorno. De éstas se puede deducir que existen más diferencias que coincidencias en sus conclusiones, respecto a la precisión de cada uno de los métodos comparados. Entre las causas de estas diferencias se puede mencionar de manera general:

1. Falta de calibración insitu de los métodos.
2. Falta de estandarización de los sitios (ambiente de referencia) en donde se estima ET₀, por ejemplo, cultivo de referencia usado, condiciones del sitio y su entorno, tipo y tamaño de lisímetro, probables errores en los datos de clima usados y calibración de los métodos.
3. Falta de estandarización de la ecuación empleada como método patrón (normalmente la ecuación de Penman-Monteith).

Así, las diferencias entre los diversos métodos se deben, entre otras razones, a que muchos de éstos han sido desarrollados y calibrados midiendo la ET₀ en lisímetros que:

- a) Usaron como cultivos de referencia pasto o alfalfa de manera indistinta,
- b) Usaron pasto o alfalfa, con distintas alturas de corte,
- c) Se emplearon lisímetros con diferentes diseños,
- d) Se tuvieron condiciones distintas de entorno,

- e) Se utilizaron ecuaciones desarrolladas en ambientes climáticos distintos,
- f) No se consideraron las variaciones que la ET₀ del pasto y la alfalfa tienen con la fertilización, corte y frecuencia del riego.

Por otro lado, es evidente que los sitios y condiciones de entorno que involucran la estimación de ET₀, necesitan ser claramente definidas y estandarizadas; sin embargo, este es un tema que por su importancia merece ser tratado en una investigación distinta. Por ahora, este trabajo tiene como objetivo discutir y resaltar la importancia de utilizar la ecuación de Penman-Monteith estandarizada, para evitar discrepancias cuando se emplean las distintas versiones de la misma en trabajos de investigación o cuando ésta es aplicada para efectos de gestión del agua de riego de manera indistinta. Así, para la estandarización de las ecuaciones que permiten estimar ET₀, la Asociación de Irrigación (IA, por sus siglas en inglés), solicitó al Comité “Evapotranspiration in Irrigation and Hydrology” de la American Society of Civil Engineers (ASCE) en mayo de 1999, definir una ecuación estandarizada para estimar ET₀ (Walter *et al.*, 2000), con el objeto de tener una ecuación estandarizada que pudiera ser aceptada no sólo por la comunidad científica, sino por la comunidad de ingenieros, agencias de gobierno y usuarios del sector agrícola. Las siguientes razones motivaron este esfuerzo (Walter *et al.*, 2000):

1. Disponer de una ecuación estándar para la estimación de la evapotranspiración del cultivo de referencia, debido a que se han desarrollado muchos métodos, que a la postre han causado confusiones y diferencias sustanciales en la estimación de ET₀.
2. Tanto el sector público como el privado tienen instaladas en sus parcelas, estaciones meteorológicas automatizadas, con las cuales se estima directamente ET₀ y la inmensa mayoría de éstas utiliza una versión de la ecuación de Penman-Monteith no estandarizada. Por tal razón, es necesario promover que las compañías proveedoras de las mismas estandaricen las ecuaciones que usan dichas estaciones.
3. Disponer de una ecuación estándar que permita estimar ET₀ a escala horaria, cuya sumatoria para períodos de 24 horas proporcione una estimación diaria más precisa.

Así, el comité de la ASCE recomendó dos cultivos de referencia estándar para estimar ET₀:

1. Cultivo bajo (similar al pasto).

2. Cultivo alto (similar a la alfalfa).

Junto con estos cultivos de referencia se propuso una ecuación basada en la combinada de Penman-Monteith ASCE (ver ec. 1), con varios términos simplificados.

$$ET_0 = \frac{k_1(0.622)}{P_a} \frac{1}{r_a} (e_z^* - e_z) \quad (1)$$

donde:

- Rn = Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² d⁻¹).
 G = Flujo de calor sensible del suelo (MJ m⁻² d⁻¹).
 e_z^* = Presión de vapor de saturación del aire a la altura z (kPa)
 e_z = Presión de vapor del aire a la altura z (kPa)
 Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa).
 = Constante psicométrica (kPa °C⁻¹).
 r_a = Constante psicométrica modificada (kPa °C⁻¹).
 Calor latente de vaporización (MJ⁻¹ °C⁻¹).
 P_a = Presión atmosférica (kPa).
 e_z^* = Presión de vapor a saturación del aire a la altura z (kPa).
 e_z = Presión de vapor del aire a la altura z (kPa).
 r_a = Resistencia aerodinámica al calor sensible (s m⁻¹).

Walter *et al.* (2000) afirman que ambas características, tanto la estandarización de la ecuación como de los cultivos de referencia, proporcionan una mejor estimación horaria y diaria de ET₀. La ecuación estandarizada propuesta por el comité de la ASCE, estima ET₀ para cultivos de referencia de talla baja (ET_{0s}) y para cultivos de referencia de talla alta (ET_{0s}). Dicha ecuación estandarizada está acompañada de una tabla de valores para los cultivos de referencia. Tiene una constante en el numerador (C_n) que es una función del tiempo y de la resistencia aerodinámica; y otra en el denominador (C_d) que también es función del tiempo, de la resistencia superficial de la masa vegetal y de la resistencia aerodinámica (tablas 1 y 2). La ecuación propuesta es (Walter *et al.*, 2000):

$$ET_{ref} = \frac{0.408 (Rn - G) - \frac{C_n}{T_2 - 273} U_2 (e_{sa} - e_a)}{(1 - C_d U_2)} \quad (2)$$

donde:

- ET_{ref} = Etos para cultivos de talla baja ó Etrs para cultivos de talla alta (mm d^{-1} ó mm h^{-1}).
 Rn = Radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ó $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$).
 G = Flujo de calor sensible del suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ó $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$).
 T_2 = Temperatura del aire diaria u horaria a 1.5 ó 2.5 m sobre el suelo ($^{\circ}\text{C}$).
 U_2 = Velocidad del viento diaria u horaria, a 2 m sobre el suelo (ms^{-1}).
 e_{sa} = Presión de vapor a saturación a 1.5 ó 2.5 m sobre el suelo (kPa).
 e_a = Presión de vapor actual a 1.5 ó 2.5 m sobre el suelo (kPa).
= Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa).
= Constante psicométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

La ecuación (2) fue comparada contra los siguientes métodos (Walter *et al.*, 2000):

1. Kimberly-Penman 1982 (alfalfa).
2. CIMIS Penman (pasto).
3. NCRS Penman-Monteith (pasto).
4. Hargreaves-Samani (pasto).
5. Penman-Monteith-FAO 56 (este método estima la ETo de cultivo hipotético de referencia que sustituye al cultivo vivo).
6. Método de Penman-Monteith ASCE para pasto ($h=0.12 \text{ m}$) y alfalfa ($h=0.50 \text{ m}$).
7. Datos de lisímetros.

En las evaluaciones se encontró que la ecuación de PMA (ec. 1) proporcionó muy buenas estimaciones comparadas con el lisímetro, cuando se usa la resistencia aerodinámica y la resistencia de superficie tal como se presenta en el manual # 70 de la ASCE, para los casos particulares de la alfalfa ($h=0.50 \text{ m}$) y pasto ($h=0.12 \text{ m}$). Esta ecuación ha sido recomendada por este comité

Tabla 1. Valores C_d y C_n para ET_{ref} (Walter *et al.*, 2000)

| Para cálculos | Cultivo bajo | | Cultivo alto | | Unidades | Unidades |
|------------------|--------------|-------|--------------|-------|--------------------|----------------------------------|
| | ETos | C_d | ETrs | C_d | ETos; ETrs | Rn; G |
| | C_n | C_d | C_n | C_d | | |
| Diarios | 900 | 0.34 | 1600 | 0.38 | mm d^{-1} | $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ |
| Horarios (día) | 37 | 0.24 | 66 | 0.25 | mm h^{-1} | $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ |
| Horarios (noche) | 37 | 0.96 | 66 | 1.7 | mm h^{-1} | $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ |

Tabla 2. Variables estandarizadas para ET_{ref} (Walter *et al.*, 2000)

| Variable | ETos | ETrs |
|---|---------------------------|---------------------------|
| Altura del cultivo de referencia (h_c) | 0.12 m | 0.50 m |
| Altura para la medición de la temperatura y humedad (z_h) | 1.5–2.5 m | 1.5–2.5 m |
| Altura para la medición de la velocidad del viento (z_w) | 2.0 | 2.0 |
| Plano de comparación (d) | 0.08 m | 0.08 m |
| Calor latente de vaporización () | 2.45 MJ kg^{-1} | 2.45 MJ kg^{-1} |
| Resistencia de superficie en el día (r_c) | 70 sm^{-1} | 45 sm^{-1} |
| Resistencia de superficie en el día (r_c) | 50 sm^{-1} | 30 sm^{-1} |
| Resistencia de superficie en la noche (r_c) | 200 sm^{-1} | 200 sm^{-1} |
| Rn (día) | >0 | >0 |
| Rn (noche) | 0 | 0 |

para estimar ETo y ser usada como método patrón para aquellos sitios en donde no se tengan datos de lisímetros. La ecuación de Penman Monteith ASCE es una expresión como la mostrada en (1) que se puede reescribir como (Walter *et al.*, 2000):

$$ETo = \frac{\frac{(Rn - G) k_1 C \frac{(e_{sa} - e_a)}{r_a}}{1 + \frac{r_c}{r_a}}}{(3)}$$

donde:

ETo = Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm d⁻¹ ó mm h⁻¹).

k₁ = Constante para la conversión de unidades (86400 sd⁻¹ para ETo en mmd⁻¹ y 3600 sh⁻¹ para ETo en mmh⁻¹).

Densidad del aire a presión constante (kPa).

C_p = Calor específico del aire a presión constante (MJ kg⁻¹ °C⁻¹).

Dado que los datos de lisímetro son escasos y limitados alrededor del mundo, el comité seleccionó el método de Penman-Monteith ASCE para evaluar la ecuación (2) antes descrita. Así, el comité de la ASCE encontró que dicha ecuación es suficientemente exacta como para recomendar su uso en la estimación de la evapotranspiración del cultivo de referencia (Walter *et al.*, 2000).

Estimaciones de ETo con la estación meteorológica automatizada

Las estaciones meteorológicas automatizadas Campbell Scientific, estiman ETo mediante una ecuación que se deduce, según la nota técnica 13-94PI (Campbell, 1994), de una ecuación similar a (1). Así, la ecuación Campbell Scientific para estimar ETo es (Campbell, 1994):

$$ETo = \frac{(Rn - G)}{\left(\frac{1}{R} \right)^*} \frac{M_w (e_z^* - e_z)}{RT_a \left(\frac{1}{r_v} \right)^*} \quad (4)$$

donde:

M_w = Masa molecular del agua (0.018 kg mol⁻¹).

R = Constante universal de los gases (8.31x10⁻² kJ mol⁻¹ K⁻¹).

T_a = Temperatura absoluta.

r_v = Combinación de la resistencia superficial a la transferencia de vapor (r_c) y la resistencia aerodinámica al vapor de agua (r_{av}).

Pendiente de saturación de la curva de presión de vapor

La pendiente de saturación de la curva de presión de vapor (en kPa) para rangos de temperatura entre -5 °C y 45 °C, se calcula de la siguiente manera (Campbell, 1994):

$$= 45.3 + 2.97(t_m) + 0.0549(t_m)^2 + 0.00223(t_m)^3 \quad (5)$$

Calor sensible del suelo (G)

El flujo de calor del suelo se puede estimar con la ecuación 6 (Campbell, 1994).

$$G = 0.1Rn \quad (6)$$

Resistencia superficial a la transferencia de vapor (r_c) y resistencia aerodinámica al calor sensible (r_a)

Se asume que (Campbell, 1994):

$$r_v = r_{av} + r_c \quad (7)$$

donde:

$$r_{av} = r_a \quad (8)$$

Por lo tanto:

$$r_v = r_a + r_c \quad (9)$$

Sin embargo, para la aplicación de la ecuación (4) se asume que r_c = 70 sm⁻¹ y r_a se calcula con (Campbell, 1994):

$$r_a = \frac{208}{U_2} \quad (10)$$

para valores de viento medidos a 2 m sobre el suelo. Y con:

$$r_a = \frac{226}{U_3} \quad (11)$$

para valores de viento medidos a 3 metros sobre el suelo.

Si las estaciones automatizadas disponen de dos sensores de viento a diferentes alturas, r_a se puede estimar con (Campbell, 1994):

$$r_a = \frac{[\log(z_2 - z_1)]^2}{k^2(U_2 - U_1)} \quad (12)$$

donde:

- z_1 = Altura de medición de viento z_1 .
- z_2 = Altura de medición de viento z_2 .
- U_1 = Velocidad de viento a la altura z_1 .
- U_2 = Velocidad de viento a la altura z_2 .
- k^2 = Conductividad térmica del aire ($0.026 \text{ J m}^{-1}\text{s}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$).

De manera alternativa, si las rugosidades para el momento de transferencia (z_{om} y z_{ov}) son conocidos, entonces $z_1=z_{ov}$, es decir, la velocidad del viento en z_0 es cero, por lo que sólo se requiere una medición de velocidad de viento a la altura z_2 ; así, la ecuación anterior se puede escribir como:

$$r_a = \frac{[\log(z_2)]^2}{k^2(U_2)} \quad (13)$$

Como ya se ha mencionado, Campbell (1994) asume $r_c = 70 \text{ sm}^{-1}$ en las estimaciones de ETo durante el día; sin embargo, se incrementa por un factor multiplicativo durante la noche, con el objeto de compensar el cierre de los estomas (Campbell, 1994).

Constante psicométrica modificada

La constante psicométrica modificada se estima de la siguiente manera:

$$* \quad \frac{r_v}{r_e} \quad (14)$$

donde la combinación de la resistencia radiativa y convectiva a la transferencia de calor (r_e) se estima de la siguiente manera (Campbell, 1994):

$$r_e = \frac{1}{\frac{1}{r_r} + \frac{1}{r_a}} \quad (15)$$

La resistencia radiativa depende sólo de la temperatura y se puede estimar con (Campbell, 1994):

$$\frac{1}{r_r} = 0.00382 - 0.00005(t_m) \quad (16)$$

Para estimar ETo con la ecuación Campbell Scientific (ec. 4) basta medir insitu las siguientes variables: temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento (referido a una o dos alturas distintas). Como se puede observar, la ecuación (4) no es una ecuación estandarizada en sus variables respecto a la ecuación de Penman-Monteith ASCE, como tampoco lo es la estimación de algunos parámetros de la misma, por ejemplo: la pendiente de saturación de la curva de presión de vapor, la resistencia aerodinámica y la constante psicométrica modificada, por mencionar los más importantes.

Resultados

En la tabla 3 y figura 1 se presentan las estimaciones de ETo con los siguientes métodos: Penman-Monteith ASCE (PMA), Penman-Monteith FAO 56 (PM FAO 56), Penman-Monteith estandarizado ASCE (PM Std. ASCE) y las estimaciones de la estación meteorológica automatizada CIANO (Est. Aut.).

Las estimaciones de los métodos PM FAO 56 y PM estandarizado ASCE (ec. 2) calculan exactamente los mismos valores de ETo para el periodo considerado, ya que la primera asume los mismos valores Cd y Cn que la segunda, tomando como referencia un cultivo bajo (similar al pasto), con $h_c = 12 \text{ cm}$ con una resistencia superficial a la transferencia de vapor $r_c = 70 \text{ sm}^{-1}$.

Así, asumiendo la consideración anterior, se puede observar en la figura 1, una ligera sobreestimación de ETo del método PM estandarizado ASCE, respecto al método patrón PMA, para el periodo estudiado.

Estas diferencias se deben entre otras razones a que el método PM estandarizado ASCE, asumió un valor constante de resistencia superficial a la transferencia de vapor, $r_c = 70 \text{ sm}^{-1}$, mientras que el método patrón PMA tomó un valor $r_c = 85.93 \text{ sm}^{-1}$, debido a que, en la primera ecuación se asumió un índice foliar $LAI = 24h_c$ (Allen *et al.*, 1998), mientras que con la segunda se siguió el criterio de la ASCE, donde $LAI = (1.5)(LN(h_c) - 1.4)$ (Jensen *et al.*, 1990).

A pesar de esta ligera sobreestimación el coeficiente de correlación R^2 del método PM estandarizado ASCE respecto a PMA es igual a la unidad, la desviación estándar entre ambos métodos es de 1.66 mm y el error

cuadrático medio anual es de 0.22 mm. Finalmente, la eficiencia en la estimación de ET₀ con el método PM estandarizado ASCE es de 98%.

Estos índices estadísticos se ven reflejados de manera gráfica en la figura 2, en donde se presenta la comparación de ambos métodos, respecto a la línea 1:1. La alta correlación de ambos métodos (figura 2), corrobora el índice estadístico R^2 calculado.

En dicha figura se aprecia también la ligera sobreestimación enunciada en el párrafo anterior y la alta

eficiencia del método PM estandarizado respecto a PMA para el periodo y sitio estudiado.

De igual forma, se puede observar en la figura 1 la comparación de las estimaciones de ET₀ realizadas con la estación automatizada CIANO (ec. 4) respecto al método patrón PMA (ec. 1). Asimismo, se observan diferencias notables entre ambas estimaciones, atribuidas en este caso, a la no estandarización de la ecuación que emplea la estación automatizada Campbell Scientific CIANO para estimar ET₀. Como se puede apreciar en

Tabla 3. Comparación de resultados en la estimación de ET₀ (mm) mensuales (1997-2001)

| Meses | PMA | PM FAO 56 | PM Std. ASCE | Est. Aut. |
|------------|------|-----------|--------------|-----------|
| Enero | 2.82 | 2.96 | 2.96 | 3.16 |
| Febrero | 3.26 | 3.42 | 3.42 | 3.81 |
| Marzo | 4.08 | 4.29 | 4.29 | 5.05 |
| Abril | 5.61 | 5.87 | 5.87 | 6.67 |
| Mayo | 6.84 | 7.12 | 7.12 | 7.66 |
| Junio | 7.22 | 7.52 | 7.52 | 7.63 |
| Julio | 6.67 | 6.91 | 6.91 | 6.72 |
| Agosto | 6.56 | 6.78 | 6.78 | 6.04 |
| Septiembre | 5.78 | 5.98 | 5.98 | 5.8 |
| Octubre | 4.82 | 5.01 | 5.01 | 5.12 |
| Noviembre | 3.44 | 3.59 | 3.59 | 3.85 |
| Diciembre | 2.7 | 2.93 | 2.93 | 3.1 |

Comparación de ET₀ (1997-2001)

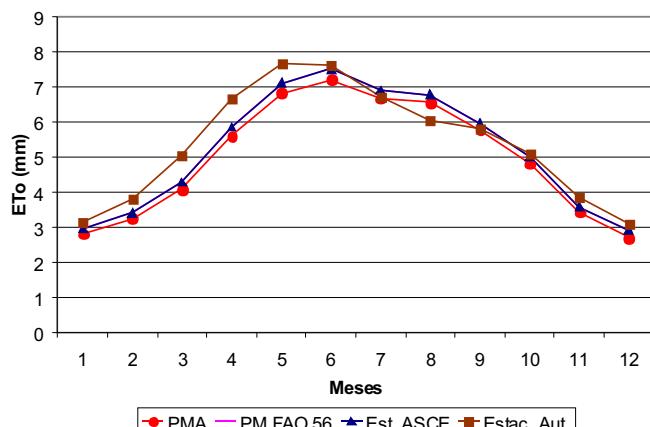


Figura 1. Estaciones de ET₀ con diferentes métodos

dicha figura, la estación automatizada CIANO sobreestima ETo en los meses que van de enero a junio, subestima ETo en el mes de agosto y sobreestima dicha variable en los meses de octubre, noviembre y diciembre.

En este caso, el coeficiente de correlación entre ambos métodos es de 0.92, con una desviación estándar de 1.63 mm, con un error cuadrático medio de 0.60 mm y una eficiencia en la estimación de ETo, respecto al método patrón del 87%. Estos índices estadísticos se pueden apreciar de manera gráfica en la figura 3, en donde se presenta la comparación de ambos métodos, respecto a la línea 1:1. Se puede observar en dicha figura la dispersión de los datos estimados por la estación automatizada CIANO y los períodos de sobreestimación y subestimación de la ETo.

Con idénticos resultados se analizaron las siguientes estaciones del distrito de riego Valle del Yaqui, Sonora: estación Atotonilco (año 2001), ubicada en las siguientes coordenadas geográficas $27^{\circ} 17' 37''$ latitud Norte y $110^{\circ} 10' 48''$ longitud Oeste) a una altura de 9 msnm; estación Costa Rica (año 2001), ubicada en las siguientes coordenadas geográficas $27^{\circ} 07' 23''$ latitud Norte $109^{\circ} 55' 48''$ longitud Oeste), a una altura de 4 msnm; estación El Jasmín-Cocorito (año 2001), ubicada en las siguientes coordenadas geográficas $27^{\circ} 32' 45''$ latitud Norte $110^{\circ} 00' 27''$ longitud Oeste, a una altura de 37 msnm.

Conclusiones

Dada la inexistencia de lisímetros para estimar de manera directa la evapotranspiración del cultivo de referencia en el valle del Yaqui, se utilizó como método *patrón* el de Penman-Monteith ASCE, debido a que diversos investigadores lo recomiendan, dentro de las versiones de Penman-Monteith, como una de las más precisas para estimar dicha variable (Amatya, 1995; Jensen *et al.*, 1990; Jensen *et al.*, 1997). Recientemente Walter *et al.* (2000), demostraron la precisión de este método al compararlo contra lisímetros y algunos métodos indirectos como las ecuaciones de Kimberly-Penman y Penman-Monteith FAO 56.

Así, una vez seleccionado el método patrón, se estimó ETo en la estación CIANO del valle del Yaqui para el periodo 1997-2001 con diversas ecuaciones para comparar y así verificar la magnitud de las diferencias entre las ecuaciones tipo Penman-Monteith estandarizadas y no estandarizadas, incluyendo la estación automatizada CIANO. Las diferencias encontradas no se pueden atribuir a errores en la medición de las variables climáticas, falta de calibración de algunos sensores (especialmente el sensor de radiación solar), ambiente de referencia, condiciones de entorno o cultivo de referencia, puesto que todas las ecuaciones estudiadas se sometieron a las mismas condiciones de comparación y bajo el

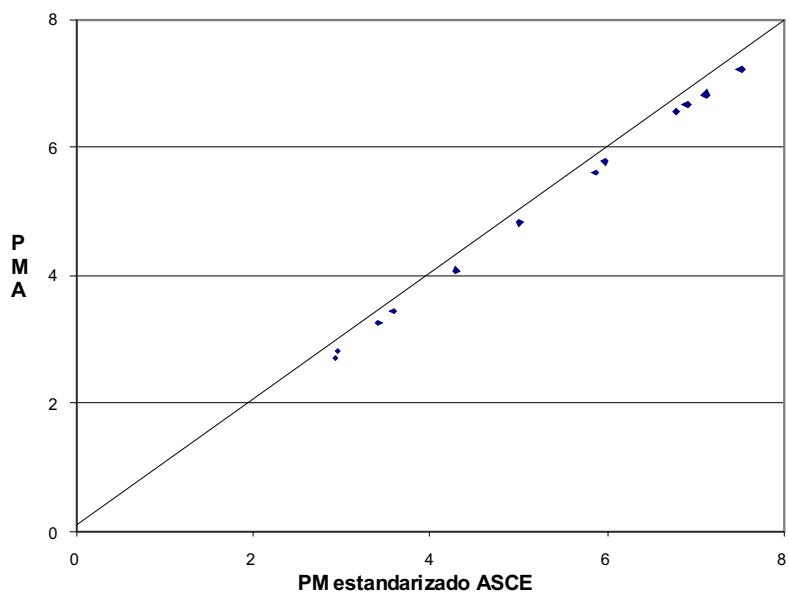


Figura 2. Comparaciones de los métodos PM estandarizados ASCE respecto a PMA

supuesto de tener pasto como cultivo de referencia, con $h_c = 12$ cm, resistencia a la transferencia de vapor $r_c = 70 \text{ sm}^{-1}$ y resistencia aerodinámica al calor sensible $r_a = 208/U_2$, para las ecuaciones de Penman-Monteith FAO 56, Penman-Monteith estandarizada ASCE y la estación automatizada CIANO. La ecuación Penman-Monteith FAO 56 que tiene la forma de la ecuación 2, se puede considerar estandarizada mientras asuma los valores estipulados en las tablas 1 y 2 para estimar ETo escala diaria y horaria, tomando referencia un cultivo bajo como el pasto o un cultivo alto como la alfalfa. Como se puede comprobar con los datos empleados en este trabajo y para el sitio de estudio seleccionado, las ecuaciones estandarizadas estimaron ETo de manera precisa. No fue así para las versiones no estandarizadas de Penman-Monteith (como la empleada por la estación automatizada CIANO Campbell Scientific), cuya eficiencia fue baja (87%) con un error porcentual anual del 13% en la estimación de ETo, que no puede considerarse aceptable, tomando en consideración la automatización de los datos, el costo de la estación y que además emplea una versión de las ecuaciones de Penman-Monteith. Esa eficiencia y error porcentual anual puede ser superada incluso con un método empírico bien calibrado para la zona y con menor información climática, por ejemplo, el tanque evaporímetro tipo A¹. Cuando este método asume valores k_p adecuados para la zona de estudio, puede estimar ETo con una buena precisión a un costo notablemente menor (se pueden instalar 20 tanques evaporímetros tipo A, bien calibrados, por cada estación automatizada adquirida). Por tal razón, no sólo es necesario calibrar adecuadamente una estación climática automatizada para un sitio determinado (especialmente el sensor de radiación solar), sino es indispensable proporcionarle la limpieza, mantenimiento y calibración periódica que cada uno de los sensores necesita.

Así, en zonas agrícolas en donde se tengan instaladas estaciones climáticas automatizadas, es necesario verificar la precisión de las mismas en la estimación de ETo, ya que la inmensa mayoría de éstas emplean ecuaciones no estandarizadas tipo Penman-Monteith para estimar dicha variable y las diferencias respecto a un método patrón (lisímetros o PMA) pueden ser importantes en cuanto su magnitud, por ejemplo, para el resto de la red de estaciones automatizadas del valle del

Yaqui, comparadas respecto al método PMA las diferencias fueron menores; sin embargo, el error promedio en porcentaje y la eficiencia de las mismas está por encima del 4% ó 5%, considerado elevado, si se toma en cuenta que se trata de ecuaciones combinadas tipo Penman-Monteith no estandarizadas.

Así, se recomienda documentar metodológicamente tales comparaciones con el afán de impulsar y promover que asociaciones, instituciones, técnicos, profesionales, investigadores del tema y compañías proveedoras de equipos utilicen ecuaciones de Penman-Monteith estandarizadas para estimar ETo con fines de aplicación o investigación, en aquellas zonas en donde sea factible hacerlo.

Referencias

- Al-Ghobari H.M. Estimation of Reference Evapotranspiration for Southern Region of Saudi Arabia. *J. Irrigation Science*, 19(2):81-86. 2000 b.
- Allen G.R., Pereira L.S., Raes D., Smith M. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirement). ISBN 92-5-104219-5., 290 pp. 1998.
- Amatya D.M., Skaggs R.W., Gregory J.D. Comparison of Methods for Estimating REF-ET. *J. Irrig. and Drain. Engrg.* ASCE, 121(6):427-435. 1995.
- Braunworth W.S., Mack H.J. Evapotranspiration and Yield Comparisons Among Soil-Water-Balance and Climate-Based Equations for Irrigation Scheduling of Sweet Corn. *Agron. J.*, 79:837-841. 1987.
- Campbell Scientific. On-Line Measurement of Evaporation and Potential Evapotranspiration. Technical note 13-94PI by Campbell Scientific in Cooperation with G.S. Campbell, Dept. of Crop and Soil Sciences, Washington State University, U.S.A. 1994.
- Hashmi M.A., García L.A. Spatial and Temporal Errors in Estimating Regional Evapotranspiration. *J. of Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 124(2):108-114. 1998.
- Hatfield J.L., Allen R.G. Evapotranspiration Estimates Under Deficient Water Supplies. *J. of Irrig. and Drain. Engrg.* ASCE, 122(5):301-308. 1996.
- Jensen M.E., Burman R.D., Allen R.G. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70, New York, 332 pp. 1990.
- Jensen D.T., Hargreaves H.G., Temesgen B., Allen R.G. Computation of Eto under Nonideal Conditions. *J. of Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 123(5):394-400. 1997.
- Michalopoulou H., Papaioannou G. Reference Crop Evapotranspiration Over Greece. *J. Agricultural Water Management*, 20(3):209-221. 1991.

¹ En zonas agrícolas en donde existe limitación en cuanto a la disponibilidad de datos climáticos, que es el caso de la inmensa mayoría de los distritos de riego en México es necesario adaptar, desarrollar y calibrar métodos que permitan estimar ETo con información climática mínima con una adecuada precisión.

- Mizyed N.R. Estimation of Irrigation Demands for Optimal Management of Multi-Reservoir Systems. PhD dissertation. Colorado State University, Fort Collins, Colo. In: Hashmi M.A., García L.A. (1998). Spatial and Temporal Errors in Estimating Regional Evapotranspiration. *J. of Irrig. and Drain. Engrg., ASCE*, 124(2):108-114. 1990.
- Mundo M.M.D., Martínez A.P. Sistema computarizado para la gestión del agua en sistemas de riego por gravedad en México. *Revista Ingeniería del Agua*, 9(2). Junio, 2002.
- Pereira L.S., Gilley R.J., Jense E.M. Research Agenda on Sustainability of Irrigated Agriculture. *J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE*, 122(3):172-177. 1996.
- Raghuvanshi N.S., Wallender W.W. Field-measured Evapotranspiration as a Stochastic Process. *J. Agric. Water Management*, 32(2):111-129. 1997.
- Stockle C.O., James G.L., Bassett D.L., Saxton E.K. Effect of evapotranspiration Underprediction on Irrigation Scheduling and Yield of Corn: a Simulation Study. *J. Agricultural Water Management*, 19(2):167-179. 1991.
- Thom H.C.S. Some Methods of Climatological Analysis. Thecnical Note No. 81. WMO, No. 199.TP.103. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. 1969.
- Walter I.A., Allen R.G., Elliot R., Jensen M.E., Itenfisu D., Mecham B., Howell T.A., Snyder R., Brown P., Echings S., Spofford T., Hattendorf M., Cuenca R.H., Wright J.L., Martin D. ASCE's Standardized Reference Evapotranspiration Equation. *Watershed Management and Operation Management 2000. Science and Engineering Technology for the Millenium*. CD, edited by Marshall Flug and Donald Frevert. 2000.

Semblanza del autor

Martín D. Mundo-Molina. Obtuvo la licenciatura en ingeniería civil en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas en 1989; el grado de maestro en ingeniería hidráulica en la División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en 1995 y el grado de doctor en ingeniería con mención honorífica en la Universidad Politécnica de Madrid en 2002. Laboró como investigador durante diez años en la Coordinación de Hidráulica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Actualmente es Coordinador del Centro de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas, en donde además imparte asignaturas en el nivel de licenciatura y postgrado. Su área de interés está dentro del campo de las ciencias de la tierra, en temas de cambio climático e inundaciones. En el campo de la tecnología ha adaptado, validado y desarrollado diferentes sistemas y dispositivos para el suministro de agua a pequeñas comunidades rurales, así como manuales y software para su aplicación en campo.