

A-01

ET₀ ESTANDARIZADA EN EL SUR DE ESPAÑA. ¿CUÁL DEBE SER LA REFERENCIA?

Gavilán, P.¹, Estévez, J.², Berengena, J.³

¹ Investigador Titular. IFAPA Centro Alameda del Obispo, Apdo. 3092, 14080 Córdoba, pedrod.gavilan@juntadeandalucia.es

² Profesor contratado doctor. Área de Proyectos de Ingeniería. Universidad de Córdoba. Carretera Nacional IV Km. 396, 14014. Córdoba. jestevez@uco.es

³ Investigador Principal. IFAPA Centro Alameda del Obispo, jubilado

Resumen

La evapotranspiración de referencia (ET₀) cuantifica la demanda evaporativa del aire y es necesaria para el cálculo del uso consuntivo de agua de los cultivos. Las redes de estaciones agrometeorológicas proporcionan esta información, utilizando diferentes versiones de la ecuación de Penman-Monteith, realizando cálculos horarios o diarios. Este trabajo pretende arrojar luz sobre la controversia que existe en la utilización de ambos tiempos de cálculo, realizando una comparación a escala local y regional entre las versiones FAO56 y ASCE de esta ecuación. La comparación se realizó en 31 localizaciones de Andalucía, calculando los valores diarios mediante suma de horarios. Además, se comparó la estimación diaria de ET₀ de la ecuación FAO56-PM con la medida en un lisímetro de pesada en Córdoba. Los resultados de la comparación entre valores medidos y estimados usando ambas ecuaciones estandarizadas indican que los métodos más precisos para estimar los valores diarios de la ET₀ fueron FAO56-PM en base diaria y ASCE-PM en base horaria. Ambos mostraron una precisión similar cuando se compararon con los valores medidos en un lisímetro de pesada. La ecuación FAO56-PM en base horaria mostró una menor precisión, con subestimaciones del 5%. A escala regional, la ecuación FAO56-PM en base horaria subestimó los valores diarios de ET₀ calculados mediante la misma ecuación estandarizada en su versión ASCE hasta un 6%, produciéndose una subestimación media del 4%. Esta diferencia fue debida al uso de un mayor valor de r_c (70 s m⁻¹) en la ecuación FAO56-PM, en relación con el valor de 50 s m⁻¹ aplicado en la ecuación estandarizada ASCE durante las horas diurnas.

Summary

The most practical way to quantify water consumption by the crops is by using the concept of reference crop evapotranspiration (ET₀). Agrometeorological networks provide daily ET₀ values using the Penman-Monteith equation on a daily or hourly basis. Up till now, the ET₀ methods are being used mainly for computation with a 24-h timestep because hourly meteorological data are not readily accessible for the users to apply ET₀ procedures on an hourly basis. This work quantifies the differences associated with using two different timesteps (hourly and daily basis) for computing ET₀ using two standardized Penman-Monteith equations (ASCE and FAO56) under different climatic conditions in Andalusia. Hourly ET₀ was measured in Córdoba, southern Spain, using a precision weighing lysimeter. Close to the lysimeter, an automatic weather station was located to register hourly meteorological variables. Penman-Monteith equation to estimate ET₀ was evaluated for hourly and daily estimates. ASCE and FAO-56 standardized ET₀ equations were also compared using data from 31 meteorological stations in Andalusia. Comparisons were made

between daily ET_o obtained by summing hourly standardized ASCE–Penman–Monteith estimations and calculated from the addition of hourly FAO56–Penman–Monteith estimations and daily ET_o estimated on a daily basis. On an hourly basis, the FAO-56 version estimated lower than the ASCE version as 6% in some locations, with a difference of 4% on the average, mainly due to the higher surface resistance (70 s m^{-1}) used in the FAO-56 version during daytime periods, as opposed to the 50 s m^{-1} value used by the ASCE version. The level of agreement improved when the two computational time steps (hourly and daily) were compared, because differences were lower (2% on the average).

1- Introducción y objetivos

Andalucía es una región semiárida con veranos muy cálidos y secos. Cuenta con más de un millón de hectáreas de regadío, que representan alrededor del 32% de la superficie cultivada, el 76% de la producción final agrícola y el 63% de la producción final agraria y el empleo agrario. El uso consuntivo de agua de la agricultura es elevado y la ausencia de lluvias limita el desarrollo de los cultivos y la producción de cosechas durante los periodos de sequía. Esta situación requiere actuaciones para un eficiente uso del agua, entre ellas la estimación precisa de la evapotranspiración de los cultivos (ET_c).

El método generalmente usado para estimar el uso consuntivo de agua por parte de los cultivos es el propuesto por la FAO en su Manual de Riego y Drenaje nº 24 (Doorenbos y Pruitt, 1977). Está basado en la cuantificación de la demanda atmosférica, mediante el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), y la posterior aplicación de un coeficiente de cultivo (K_c), que tiene en cuenta las características del mismo. El producto de esos dos componentes proporciona una estimación de la ET_c . El cultivo de referencia fue definido como una superficie extensa de gramíneas, de altura uniforme entre 8 y 15 cm, en crecimiento activo, con cobertura total y bien abastecida de agua (Doorenbos y Pruitt, 1977). Este cultivo de referencia ha sido posteriormente redefinido en el Manual de Riego y Drenaje nº 56 como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0.12 m, una resistencia de la cubierta (r_c) fija de 0.70 s m^{-1} y un albedo de 0.23 (Allen y col., 1998).

La mayoría de las redes de información agrometeorológica y de los servicios de asesoramiento al regante proporcionan diariamente valores de ET_o en las localizaciones de sus estaciones meteorológicas. Estos son calculados generalmente aplicando la ecuación estandarizada de Penman-Monteith, usando para los cálculos datos meteorológicos medios diarios. En algunos casos se realizan cálculos intradiarios, usando datos meteorológicos horarios o semihorarios, que posteriormente son sumados para obtener el valor de ET_o diario. Hace algunos años, los cálculos de la ET_o se realizaban siempre en base diaria debido a la falta de disponibilidad de datos meteorológicos intradiarios. Las redes de estaciones meteorológicas automáticas han permitido el cálculo de ET_o en base horaria o semihoraria.

Muchos trabajos indican que existe una mejora de la precisión de las estimaciones de ET_o cuando se usa la versión estandarizada por la American Society of Civil Engineers (ASCE) de la ecuación de Penman-Monteith (ASCE-PM) y se realizan los cálculos en base intradiaria (Lecina y col., 2003; Berengena y Gavilán, 2005; Allen y col., 2006). El cálculo horario tiene en cuenta los efectos de los cambios súbitos que ocurren durante el día en la velocidad del viento, la temperatura del aire o el déficit de presión de vapor (Irmak y col., 2005; Itenfisu y col., 2003). Esta ecuación, aplicada en base horaria, utiliza una resistencia de la cubierta (r_c) de 50 s m^{-1} durante los periodos diurnos y de 200 s m^{-1} durante los nocturnos. La versión FAO56 (FAO56-PM) utiliza un único valor de r_c igual a 70 s m^{-1} . Por tanto, una comparación entre ambas versiones de la ecuación, con diferentes tiempos de cálculo (horario y diario), sería aconsejable en las condiciones semiáridas del sur de

España, para aclarar las ventajas e inconvenientes del uso de cada una de ellas. Esto es lo que se pretende con este trabajo.

2. Material y métodos

2.1 Medida de la evapotranspiración de referencia

La comparación entre los valores de ET_0 medidos y estimados fue realizada en la estación lisimétrica del Centro IFAPA Alameda del Obispo en Córdoba (37°51'N, 4°51'W, 110 m sobre el nivel del mar), en el valle medio del Guadalquivir. Los datos experimentales fueron recogidos durante el año 2004 sobre una parcela de festuca (*Festuca arundinacea*) de 1.3 ha aproximadamente que fue usada como superficie de referencia. En total, se usaron para el análisis 266 días. La ET_0 fue medida con un lisímetro de pesada localizado en el centro de la parcela, con una superficie de 3 x 2 m² y una profundidad de 1.5 m. Está soportado por una plataforma contrapesada y es capaz de detectar variaciones de 0.1 kg (equivalente a 0.02 mm de ET_0). El peso del lisímetro fue medido usando una célula de carga conectada a un datalogger, programado para medir cada media hora. Dentro de la misma parcela, a 30 m del lisímetro, se ubica una estación meteorológica automática capaz de medir la humedad relativa y temperatura del aire, la radiación global, la velocidad y dirección del viento y la precipitación (Foto 1).



Foto 1. Estación meteorológica automática de la Red SIAR, usada para estimar la ET_0 .

2.2 Datos meteorológicos. Análisis regional.

Los datos meteorológicos usados en el análisis regional fueron obtenidos de las estaciones en Andalucía del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) (Foto 1). Esta red cuenta en Andalucía con 100 estaciones meteorológicas automáticas y tiene como objetivo fundamental proporcionar valores de precipitación, ET_0 y otras variables meteorológicas para la estimación de las necesidades de agua de los cultivos. Los datos meteorológicos de las estaciones de Andalucía están disponibles en la dirección de Internet (www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/ria). Las estaciones están controladas por un datalogger programable y equipadas con sensores para la medida de la temperatura y la humedad relativa del aire, la radiación global, la velocidad y dirección del viento y la precipitación en forma de lluvia. Las estaciones registran valores semihorarios y diarios. En el trabajo se usaron 31 estaciones, con diferentes condiciones climáticas, incluyendo estaciones costeras y de interior. Las elevaciones de las estaciones variaron entre 4 y 1212 m sobre el nivel del mar, la longitud entre 1.883 W y 7.018 W y la latitud entre 36.286 N y 38.255 N. La precipitación media anual varió entre 265 y 727 mm, la temperatura media entre 12.7 y 18.3 °C, la humedad relativa media del aire entre el 56 y el 71% y la velocidad media del viento entre 1.0 y 2.9 m s⁻¹. En el estudio se usaron tres años de datos.

2.3. Estimación de la evapotranspiración de referencia

La ecuación estandarizada ASCE-PM (ASCE-EWRI, 2004) fue fruto de un intento de simplificar la aplicación de la ecuación de Penman-Monteith en base horaria y diaria, usando una sencilla expresión válida para gramíneas (ET_o) y alfalfa (ET_r). Para gramíneas, cuando se realizan cálculos horarios, esta versión utiliza un valor de r_c de 50 s m^{-1} para periodos diurnos y de 200 s m^{-1} para los nocturnos. Para cálculos diarios utiliza un único valor de 70 s m^{-1} . La ecuación estandarizada FAO56-PM (Allen y col., 1998) utiliza una única resistencia r_c igual a 70 s m^{-1} para cálculos horarios y diarios (Tabla 1). Se consideran valores diurnos aquellos en los que la radiación neta en un periodo semihorario es mayor que cero. Ambas versiones utilizan los mismos procedimientos de cálculo de G , R_n y los otros parámetros de la ecuación de Penman-Monteith (ASCE-EWRI, 2004). La ecuación estandarizada de Penman-Monteith en sus versiones FAO56 y ASCE adopta la siguiente forma:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T_a + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d U_2)}$$

Donde ET_o = evapotranspiración de referencia (mm h^{-1} ó mm d^{-1}); Δ = pendiente de la curva de presión de vapor en saturación frente a la temperatura del aire ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n = radiación neta ($\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ó $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); G = flujo de calor en el suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ó $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); γ = constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); T = temperatura media horaria o diaria del aire ($^\circ\text{C}$); U_2 = velocidad del viento media horaria o diaria a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s = presión de vapor en saturación (kPa); e_a = presión de vapor actual (kPa); C_n y C_d = constantes que dependen de la superficie de referencia (festuca o alfalfa) y el periodo de cálculo (Tabla 1). El valor de la resistencia r_c está implícito en el denominador de la ecuación, concretamente en el factor C_d .

Tabla 1. Valores de C_n y C_d para las versiones estandarizadas FAO56 y ASCE de la ecuación de Penman-Monteith usando una gramínea como superficie de referencia.

Método	Tiempo de cálculo	C_n	C_d
FAO56-PM	Diario	900	0.34
	Horario	37	0.34
ASCE-PM	Diario	900	0.34
	Horario	37	0.24/0.96 ^a

^a El primer valor es para periodos diurnos ($R_n > 0$) y el segundo para nocturnos ($R_n < 0$).

2.3. Análisis de los resultados

La comparación entre valores medidos y estimados se realizó utilizando como referencia los valores de ET_o medidos con el lisímetro. Para el análisis a escala regional se utilizaron como referencia los valores de ET_o calculados a partir de la suma de los valores horarios obtenidos de la aplicación de la ecuación ASCE-PM. Este método ha sido seleccionado debido a que diferentes estudios realizados utilizando datos lisimétricos han mostrado su superioridad en las condiciones semiáridas de Andalucía frente a otras versiones (Berengena y Gavilán, 2005; Gavilán y col., 2007). En estos trabajos, los valores horarios y diarios de ET_o , que se utilizaron como referencia, fueron medidos usando un lisímetro de pesada.

En el análisis se determinó el error medio aritmético (MBE), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), el error relativo (RE) y la relación entre la media de los valores a comparar (R).

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{n}$$

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

$$RE = \frac{MBE}{x} \times 100$$

$$R = \frac{y}{x}$$

3. Resultados y discusión

3.1 Comparación de las estimaciones de ET_o frente a datos lisimétricos

Durante el año 2004 se realizó en Córdoba la comparación entre los valores de ET_o medidos usando un lisímetro de pesada y los estimados aplicando la ecuación estandarizada FAO56-PM usando datos meteorológicos medios diarios. La Figura 1 representa los valores mensuales medios diarios medidos y estimados. El valor anual estimado de ET_o fue de 1403 mm, mientras que el medido en el lisímetro fue igual a 1401 mm. Por tanto, la relación entre valores estimados y medidos fue prácticamente igual a 1. La raíz cuadrada del error cuadrático medio fue igual a 0.34 mm d^{-1} , equivalente a un error relativo del 9.3%. Puede considerarse que la ecuación ni sobrestimó ni subestimó, pues el error medio aritmético fue igual a -0.05 mm d^{-1} (Tabla 2).

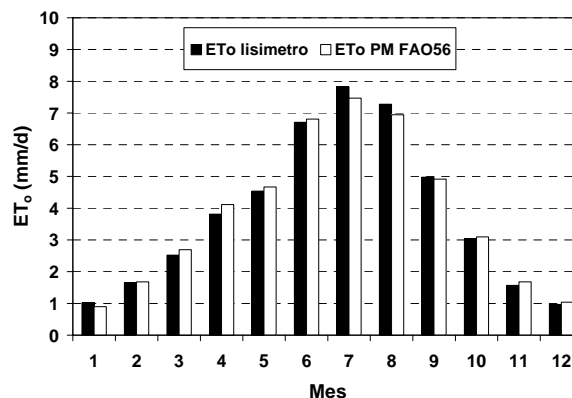


Figura 1. Comparación entre los valores mensuales medios diarios de ET_o (mm d^{-1}) medidos mediante lisimetría y estimados a partir de datos meteorológicos medios diarios utilizando la ecuación estandarizada FAO56-PM.

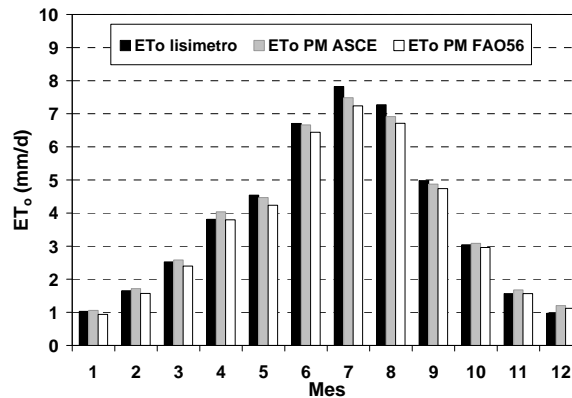


Figura 2. Comparación entre los valores mensuales medios diarios de ET_0 ($mm\ d^{-1}$) medidos mediante lisimetría y estimados a partir de datos meteorológicos horarios utilizando las ecuaciones estandarizadas ASCE-PM y FAO56-PM.

Tabla 2. Valores mensuales medios diarios y resultados de la comparación de los valores diarios de ET_0 ($mm\ d^{-1}$) medidos con lisimetría y estimados utilizando las ecuaciones estandarizadas de Penman-Monteith en sus versiones FAO56 y ASCE, usando datos meteorológicos diarios y horarios.

Mes	ET_0 lisímetro ($mm\ d^{-1}$)	ET_0 FAO56-PM diarios ($mm\ d^{-1}$)	ET_0 FAO56-PM horarios ($mm\ d^{-1}$)	ET_0 ASCE-PM horarios ($mm\ d^{-1}$)
Enero	1.03	0.90	0.94	1.06
Febrero	1.65	1.68	1.57	1.72
Marzo	2.52	2.69	2.40	2.58
Abril	3.81	4.11	3.80	4.04
Mayo	4.54	4.67	4.24	4.47
Junio	6.71	6.81	6.44	6.66
Julio	7.82	7.47	7.24	7.49
Agosto	7.28	6.95	6.71	6.92
Septiembre	4.98	4.91	4.74	4.87
Octubre	3.04	3.10	2.96	3.08
Noviembre	1.57	1.68	1.57	1.68
Diciembre	0.97	1.04	1.12	1.21
Anual (mm)	1401	1403	1334	1396
MBE ($mm\ d^{-1}$)	-	-0.05	-0.17	-0.01
RE (%)	-	9.3	10.6	7.3
RMSE ($mm\ d^{-1}$)	-	0.34	0.39	0.28
Ratio (-)	-	1.00	0.95	1.00
R^2	-	0.99	0.99	0.99

Además, se realizó la comparación entre los valores diarios de ET_0 medidos y los estimados mediante las dos ecuaciones estandarizadas descritas, utilizando datos meteorológicos horarios (Figuras 2 y 3). Cuando se usó la ecuación FAO56-PM se produjo una subestimación de la ET_0 del 5%, un RMSE de $0.39\ mm\ d^{-1}$ (equivalente a un error relativo del 10.6%) y un MBE de $-0.17\ mm\ d^{-1}$ (Gavilán y col., 2007). Sin embargo la utilización de la ecuación ASCE-PM produjo subestimaciones inferiores al 1%, con valores

de RMSE de 0.28 mm d^{-1} (equivalente a un error relativo del 7.3%) y MBE iguales a -0.01 mm d^{-1} (Tabla 2). Estas diferencias pueden ser explicadas por los valores usados en la resistencia de la cubierta (r_c) en ambas versiones de la ecuación cuando se realizan cálculos horarios. Durante las horas diurnas, en las que se producen elevados valores de la demanda evaporativa del aire, la versión ASCE utiliza valores de r_c de 50 s m^{-1} , valor que se incrementa hasta 200 s m^{-1} durante las horas nocturnas. En la versión FAO56 la resistencia de la cubierta usada en el cálculo permanece constante durante todo el día ($r_c = 70 \text{ s m}^{-1}$). Berengena y Gavilán (2005) calcularon los valores de esta resistencia a lo largo del día en una pradera de festuca en Córdoba, observándose que durante las horas centrales del día este valor ronda los 50 s m^{-1} y se eleva hasta los 200 s m^{-1} durante la noche (Figura 4). Esto demuestra que la hipótesis del valor constante de r_c no es en rigor aceptable y que los valores mínimos de r_c –inferiores a 70 s m^{-1} – se dan en las horas de máxima demanda evaporativa. Otros estudios han demostrado igualmente que durante las horas diurnas r_c es menor de 70 s m^{-1} para una cubierta de gramíneas de 12 cm de altura y que valores menores proporcionaron estimaciones más precisas de ET_o (Allen y col., 1996; Ventura y col., 1999; Todorovic, 1999; Wright y col., 2000; Lecina y col., 2003; Allen y col., 2006).

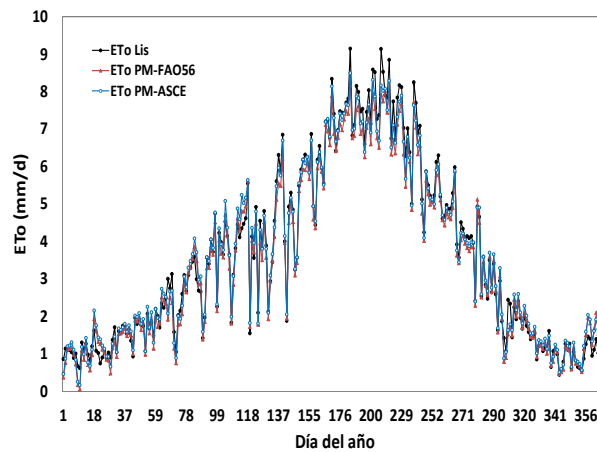


Figura 3. Evolución de los valores medios diarios de ET_o (mm/d) durante el año 2004 medidos mediante lisimetría y estimados a partir de datos meteorológicos horarios utilizando las ecuaciones estandarizadas ASCE-PM y FAO56-PM.

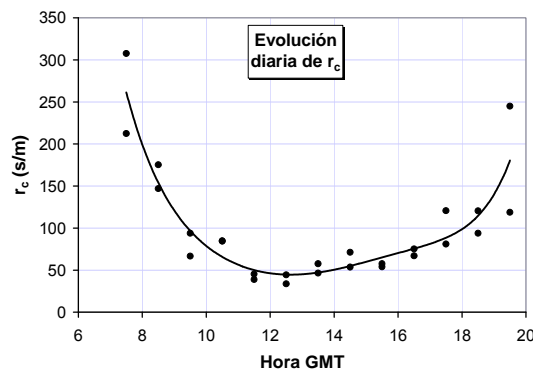


Figura 4. Evolución diaria media de la resistencia de la cubierta (r_c) de referencia durante la estación de riegos medidos sobre una pradera de festuca en Córdoba.

3.2 Comparación a escala regional entre los valores diarios de ET_o obtenidos de la suma horaria de los valores estandarizados FAO56-PM y ASCE-PM

Es difícil disponer de datos medidos de ET_o en diferentes localizaciones. En concreto, en Andalucía existe un único lisímetro de pesada. Sin embargo, se puede realizar la comparación entre dos ecuaciones estandarizadas utilizando como referencia una de ellas, a ser posible la que se haya mostrado más precisa al compararla con valores medidos. Para este trabajo se ha usado como referencia la ecuación estandarizada ASCE-PM en su versión horaria.

Los valores de ET_o obtenidos a partir de las sumas horarias de las ecuaciones estandarizadas FAO56 y ASCE en las 31 estaciones meteorológicas analizadas mostraron una alta correlación ($R^2 > 0.99$) (Figura 5) y bajos valores de RMSE (variaron entre 0.09 y 0.25 mm d^{-1}), bajo las condiciones semiáridas de Andalucía. Sin embargo, la versión FAO56 de la ecuación de Penman-Monteith en base horaria subestimó los valores de la versión ASCE-PM entre un 2% y un 6%, produciéndose una subestimación media del 4% de la versión FAO respecto a la ASCE (Tabla 3). Esto significa que la primera subestimó los valores de la versión ASCE en todas las localizaciones. El valor negativo del error medio aritmético, que varió entre -0.06 y -0.20 mm d^{-1} , corrobora esta afirmación. Por tanto, estos resultados sugieren que el uso de la versión FAO56 para cálculos horarios en lugar de la versión ASCE produciría subestimaciones de ET_o a escala regional de hasta el 6%. La diferencia fue menor del 2% en una sola localización y fue mayor del 5% en 15 localizaciones, el 50% de las estudiadas.

Tabla 3. Resultados de la comparación de las ecuaciones estandarizadas FAO56 y ASCE Penman-Monteith en base horaria para el cálculo de la ET_o .

	ET_o FAO56-PM horario vs ASCE-PM horario					ET_o ASCE-PM diario vs ET_o ASCE-PM horario				
	MBE (mm d^{-1})	RE (%)	RMSE (mm d^{-1})	Ratio (-)	R^2 (-)	MBE (mm d^{-1})	RE (%)	RMSE (mm d^{-1})	Ratio (-)	R^2 (-)
Máximo	-0.06	6.7	0.25	0.98	1.00	0.05	10.5	0.38	1.01	0.99
Mínimo	-0.20	2.6	0.09	0.94	0.99	-0.22	6.7	0.24	0.93	0.97
Medio	-0.14	4.7	0.17	0.96	0.99	-0.05	7.9	0.29	0.98	0.98

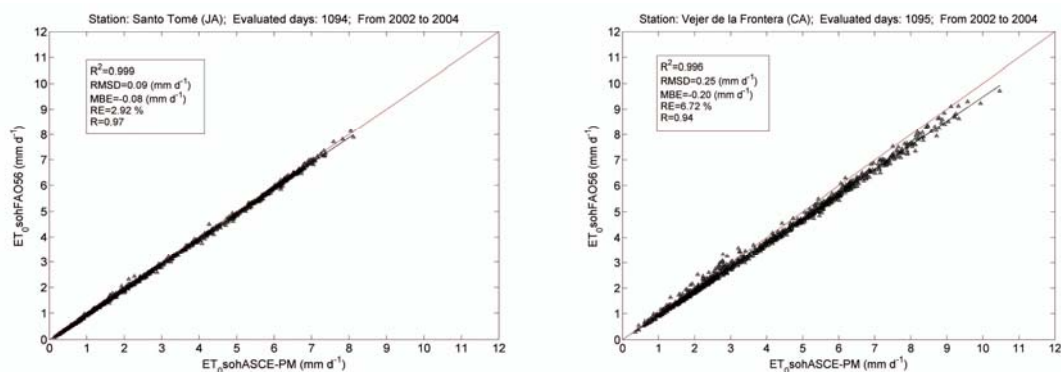


Figura 5. Comparación de los valores diarios de ET_o obtenidos de la suma horaria de los valores estandarizados FAO56 ($ET_{o_sohFAO56}$) y ASCE ($ET_{o_sohASCE}$) en dos localizaciones representativas de Andalucía durante los años 2002-2004.

3.3 Comparación a escala regional de los valores diarios obtenidos del cálculo diario de la ecuación estandarizada ASCE y los de su suma horaria

El acuerdo entre los cálculos de ET_o en base diaria y horaria de la ecuación estandarizada ASCE-PM fue muy razonable en todas las localizaciones, con una alta correlación ($R^2 > 0.97$) (Figura 6). Los valores de RMSE fueron mayores que en el caso anterior, variando entre 0.24 y 0.38 $mm\ d^{-1}$, con un valor medio de 0.29 $mm\ d^{-1}$. Sin embargo, la subestimación de los valores procedentes del cálculo diario con respecto a la suma diaria de los valores horarios fue menor, en concreto se produjo una subestimación media inferior al 2%, con un 60% de estaciones en las que no hubo subestimación alguna (Tabla 3). Las pequeñas diferencias entre ambos tiempos de cálculo pueden ser atribuidas a la incapacidad del cálculo en base diaria de tener en cuenta los rápidos cambios a lo largo del día de la velocidad del viento, la temperatura del aire y el déficit de presión de vapor. Sin embargo, los resultados demuestran que la robustez de la ecuación de Penman-Monteith en su versión ASCE cuando se utilizan diferentes tiempos de computación es superior a la de la versión FAO56-PM.

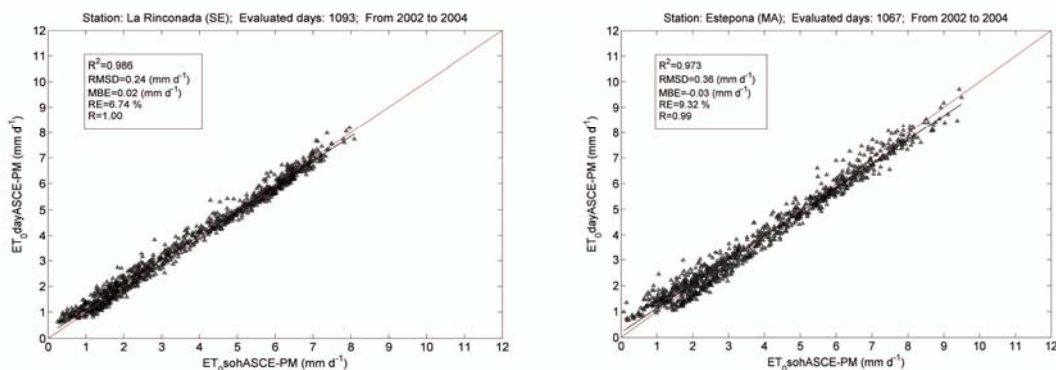


Figura 6. Comparación de los valores diarios de ET_o obtenidos del cálculo diario de la ecuación estandarizada ASCE ($ET_{o_dayASCE}$) y de la suma horaria de la misma ecuación ($ET_{o_sohASCE}$) en dos localizaciones representativas de Andalucía durante los años 2002-2004.

4. Conclusiones y recomendaciones

Los resultados de la comparación entre valores de ET_o medidos mediante lisimetría y los estimados usando las ecuaciones estandarizadas ASCE-PM y FAO56-PM indican que los métodos más precisos para estimar los valores diarios de la ET_o en el valle medio del Guadalquivir fueron el de Penman-Monteith FAO56 en base diaria y la versión ASCE de la misma ecuación en base horaria. Ambos mostraron una precisión similar cuando se compararon con los valores medidos en un lisímetro de pesada. Sin embargo, la ecuación FAO56-PM en base horaria mostró una menor precisión, con subestimaciones de ET_o del 5%. A escala regional, la ecuación FAO56-PM en base horaria subestimó los valores diarios de ET_o calculados mediante la misma ecuación estandarizada en su versión ASCE hasta un 6%, produciéndose una subestimación media del 4% en 31 estaciones meteorológicas de Andalucía. Esta diferencia fue debida principalmente al uso de un mayor valor de r_c ($70\ s\ m^{-1}$) en la ecuación FAO56-PM, en relación con el valor de $50\ s\ m^{-1}$ aplicado en la ecuación estandarizada ASCE durante las horas diurnas. Por tanto, para el cálculo de los valores diarios de ET_o se aconseja la utilización de la ecuación estandarizada PM-ASCE en base horaria o bien la de PM-FAO56 en base diaria. Sin embargo, no resulta aconsejable el uso de la ecuación estandarizada de PM-FAO56 en base horaria por los motivos que han sido

expuestos en este trabajo. Finalmente, para el cálculo de los valores horarios o semihorarios de ET_0 se aconseja el uso de la ecuación estandarizada ASCE-PM con dos resistencias, 50 y 200 s m^{-1} , para las horas diurnas y nocturnas, respectivamente.

5. Bibliografía

- Allen, R. G., Pruitt, W. O., Businger, J. A., Fritschen, L. J., Jensen, M. E., Quinn, F. H., 1996. Evaporation and transpiration. ASCE handbook of hydrology, Wootton et al., eds., Chap. 4, ASCE, New York, 125–252.
- 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, Roma.
- Allen, R.G., Pruitt, W.O., Wright, J.L., Howell, T.A., Ventura, F., Snyder, R., Itenfisu, D., Steduto, P., Berengena, J., Baselga, J., Smith, M., Pereira, L.S., Raes, D., Perrier, A., Alves, I., Walter, I., Elliott, R., 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET_0 by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management*, 81, 1-22.
- ASCE-EWRI, 2004. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee Final Report. Reston, Va.: ASCE Environmental and Water Resources Institute.
- Berengena, J., Gavilán, P., 2005. Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(2), 147–163.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1977. Las necesidades de agua de los cultivos. Manual FAO de Riego y Drenaje nº 24. Roma.
- Gavilán, P., Berengena, J., Allen, R.G., 2007. Measuring versus estimating net radiation and soil heat flux: Impact on Penman–Monteith reference ET estimates in semiarid regions. *Agricultural Water Management*, 89, 275-286.
- Gavilán, P., Estévez, J., Berengena, J., 2008. Comparison of standardized reference evapotranspiration equations in southern Spain. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(1), 1-12.
- Irmak, S., Howell, T.A., Allen, R.G., Payero, J.O., Martin, D.L., 2005. Standardized ASCE Penman-Monteith: impact of sum-of-hourly vs.24-hour timestep computations at reference weather stations sites. *Transactions of ASAE*, 48(3), 1063-1077.
- Itenfisu, D., Elliott, R. L., Allen, R. G., Walter, I. A., 2003. Comparison of reference evapotranspiration calculation as part of the ASCE standardization effort. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(6), 440-448.
- Lecina, S., Martínez-Cob, A., Pérez, P.J., Villalobos, F.J., Baselga, J.J., 2003. Fixed versus variable bulk canopy resistance for reference evapotranspiration estimation using the Penman-Monteith equation under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 60, 181-198.
- Todorovic, M., 1999. Single-layer evapotranspiration model with variable canopy resistance. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 125(5), 235–245.
- Ventura, F., Spano, D., Duce, P., Snyder, R. L., 1999. An evaluation of common evapotranspiration equations. *Irrigation Science*, 18, 163–170.
- Wright, J.L., Allen, R. G., Howell, T. A., 2000. Conversion between evapotranspiration references and methods. Proc., 4th Decennial National Irrigation Symp., Phoenix, ASAE, St. Joseph, Mich., 251–259.