

INFLUENCIA DE LA ADVECCIÓN DE CALOR SENSIBLE EN LA PRECISIÓN DE LOS MÉTODOS DE CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA EN EL VALLE DEL GUADALQUIVIR

Pedro Gavilán¹ y Joaquín Berengena²

Resumen:

El método más generalizado de cálculo de las necesidades de agua de los cultivos, propuesto por Doorenbos y Pruitt (1975), obliga a calcular previamente la llamada evapotranspiración de referencia (ET_0). Se dispone de numerosos métodos para ello, principalmente en función de las variables meteorológicas. Durante los años 1999, 2000 y 2001 se realizó una evaluación lisimétrica diaria y horaria de diferentes métodos de estimación de la ET_0 , en las condiciones advectivas del valle del Guadalquivir en Córdoba. Para ello se utilizaron un lisímetro gravimétrico, con una resolución de 0.02 mm h^{-1} , y una estación agrometeorológica automática, que registraron valores horarios de evapotranspiración y de las principales variables meteorológicas, respectivamente, ubicados sobre una parcela de festuca (*Festuca arundinacea* Schreb.). Para estimaciones diarias, los métodos más precisos fueron, por este orden, el de Penman, con una función de viento ajustada a las condiciones locales, y el de Penman-Monteith FAO-56. Los tres métodos evaluados recomendados en el manual FAO-24 dieron lugar a sobrestimaciones considerables. Para estimaciones horarias, el método de Penman-Monteith subestimó para valores de alta demanda evaporativa y viceversa, mientras que el basado en la ecuación de Penman, ajustado con una función de viento para las condiciones locales, volvió a mostrarse el más preciso. Se llevó a cabo un análisis de la capacidad predictiva de los diferentes métodos de estimación en función de la intensidad del proceso advectivo. Dada su precisión para diferentes valores del índice de advección (IA), el método de Penman-Monteith FAO-56 se presentó como el más adecuado para las condiciones del estudio. Los demás métodos mostraron una tendencia a subestimar con el aumento del índice de advección, a excepción del método Penman FAO-24, si bien este último tampoco dio estimaciones precisas para ningún valor de IA, por lo que su utilización en este tipo de ambientes no puede ser aconsejada.

Palabras clave: Evapotranspiración, evaluación de métodos, advección de calor sensible, lisimetría.

INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración (ET), proceso mediante el cual el agua en su estado líquido se evapora desde las superficies vegetadas a la atmósfera, es uno de los principales componentes del ciclo hidrológico. Este término engloba la evaporación del agua almacenada en la capa superficial del suelo, la interceptada por las plantas y la pérdida de agua a través de la superficie de las plantas, principalmente de las hojas (Jensen et al., 1990).

La cuantificación de la evapotranspiración es necesaria para la producción agrícola, manejo de recursos hídricos y, en general, estudios medioambientales.

Su medida es de vital importancia en regiones áridas y semiáridas, donde resulta imprescindible para la determinación de las necesidades de agua de los cultivos y por tanto para el diseño y manejo de los sistemas de riego.

La ET puede ser medida por procedimientos diversos: 1) balance de agua en el volumen de suelo enraizado; 2) balance de energía en la superficie vegetada; 3) métodos estrictamente micrometeorológicos. No obstante, en la práctica es preciso recurrir a su estimación porque su medida es cara, engorrosa y exige además un cierto grado de cualificación.

¹Departamento de Suelos y Riegos. Centro de Investigación y Formación Agraria "Alameda del Obispo". Avd. Menéndez Pidal s/n. 14004 Córdoba. Tfno. 34 957 016055. email:pedro.gavilan@juntadeandalucia.es

²Departamento de Suelos y Riegos. Centro de Investigación y Formación Agraria "Alameda del Obispo". Avd. Menéndez Pidal s/n. 14004 Córdoba. Tfno. 34 957 016014. email:joaquin.berengena@juntadeandalucia.es

Artículo recibido el 22 de abril de 2003, recibido en forma revisada el 10 de junio de 2003 y aceptado para su publicación el 17 de junio de 2003. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

El método más usado para estimar la ET es el propuesto por Doorenbos y Pruitt (1975), basado en la definición de una superficie vegetada de referencia cuya ET (ET_o o evapotranspiración de referencia) depende sólo de variables climáticas. Esta superficie fue definida como “una superficie extensa de gramíneas verdes de 8 a 15 cm de altura, uniforme, de crecimiento activo, que sombrea totalmente el suelo y bien abastecida de agua” (Doorenbos y Pruitt, 1975). Los factores relacionados con el cultivo y su manejo fueron englobados en una función empírica definida de la forma

$$K_c = ET_c / ET_o \quad (1)$$

donde ET_c es precisamente la ET del cultivo. El método obliga a determinar, en primer lugar, el valor de ET_o y, posteriormente, a encontrar el valor adecuado de K_c (coeficiente de cultivo).

Se dispone de una gran variedad de métodos para estimar la ET_o en función de las variables climáticas (Jensen et al., 1990), incorporando todos ellos un cierto grado de empirismo. Los más sencillos y empíricos se basan en los resultados de simples análisis estadísticos y suelen incorporar una o dos variables climáticas (normalmente radiación y/o temperatura). Naturalmente, al tener una menor base teórica, son los más exigentes en cuanto a necesidades de ajuste local, por lo que su uso habrá de restringirse a las condiciones en que fueron calibrados (Berengena, 1993), y son también los más sensibles a la advección (por ejemplo, Jury y Tanner, 1975). Entre estos métodos podemos citar los de Priestley-Taylor (Priestley-Taylor, 1972) y Makkink (Makkink, 1957) (métodos basados en la radiación) y Hargreaves (Hargreaves et al., 1985) y Blaney-Criddle (Blaney y Criddle, 1950) (métodos basados en la temperatura). Doorenbos y Pruitt (1975), en un intento de evitar los problemas derivados de la necesidad de calibración local, modificaron algunos de los métodos citados (en concreto, radiación y Blaney-Criddle), además del de Penman (Penman, 1948).

Entre las ecuaciones derivadas del análisis racional del proceso, y con más sólida base física, destacan las ecuaciones que utilizan el método combinado (Penman y Penman-Monteith). Estas ecuaciones son soluciones aproximadas de las ecuaciones de balance de energía y del transporte aerodinámico del vapor de agua (Sharma, 1985) y suponen flujo estrictamente vertical de vapor de agua y calor sensible desde la superficie a la atmósfera o, lo que es lo mismo, ausencia de gradientes horizontales (De Bruin et al., 1990).

La ecuación de Penman-Monteith (Monteith, 1965) incorpora la resistencia ofrecida por la superficie, y se basa en un modelo simplificado en el que la superficie cultivada se sustituye por una única hoja horizontal de grandes dimensiones con una resistencia aparente al flujo de vapor de agua que incluye la resistencia de los estomas y de las cutículas de las hojas y de la superficie del suelo.

A lo largo de los últimos años se han realizado estudios de evaluación de los principales métodos de estimación de ET_o en diferentes ambientes (Allen, 1989; Jensen et al., 1990). Estos estudios pusieron de manifiesto la mayor precisión de la ecuación de Penman-Monteith y la sobrestimación de la ecuación de Penman-FAO, aproximadamente entre un 15 y un 20%.

Estudios realizados en Córdoba a principios de los noventa (Berengena y Mantovani, 1992), con datos de la estación lisimétrica del CIFA de Córdoba, no pudieron confirmar en su totalidad los resultados de Allen et al. (1989) y Jensen et al. (1990). Así, considerando el año completo, el método de Penman-Monteith subestimó, mientras que Penman FAO-24 sobrestimó ligeramente la ET_o . Para los meses correspondientes a la campaña de riegos, se observó el mismo comportamiento, sugiriendo que la causa de la subestimación de la ecuación de Penman-Monteith es la existencia frecuente de situaciones advectivas en Córdoba (Berengena y Mantovani, 1992). Por ello, la subestimación resultó más acusada en los meses de mayor demanda evaporativa, en los que el fenómeno advectivo se presenta con más frecuencia. De cualquier forma, se pudo constatar que la precisión de la mayor parte de los métodos evaluados varió en función de la intensidad de la advección: cuando ésta era elevada se observaron subestimaciones considerables, de hasta un 25%. Otros estudios realizados en varios países de la cuenca mediterránea pusieron también de manifiesto la tendencia de la ecuación de Penman-Monteith a subestimar en lugares de alta demanda evaporativa (Steduto et al., 1996).

Sin embargo, Gavilán y Berengena (2000) han observado que, en el valle medio del Guadalquivir, las predicciones basadas en medias diarias de la ecuación de Penman-Monteith-FAO, con las variables y parámetros correctamente medidos –no estimados–, son de una alta precisión (valor de la raíz cuadrada del error cuadrático medio igual a 8.05 W m^{-2} , equivalente a 0.28 mm día^{-1}).

No se detectaron desviaciones significativas en días fuertemente advectivos –con valores de ET_o/R_n en torno a 1.4– en contra de lo observado en Zaragoza por Lecina y Martínez-Cob (2000), donde el método de Penman –Monteith FAO acusó una tendencia a subestimar conforme aumentaba el índice de advección. Quizás la razón de esa discordancia estribe en que en este último caso los cálculos fueron hechos en base semihoraria, obteniendo los valores diarios por acumulación de parciales. De hecho, los cálculos en base horaria con los datos de Córdoba, se ajustaron peor que los diarios, y dieron lugar a subestimaciones para valores altos del flujo y viceversa. Estas subestimaciones se debieron probablemente a la suposición de una resistencia aparente de la cubierta vegetal constante (Rana et al., 1994) y a la estimación –no la medida– de parámetros o variables que intervienen en la ecuación utilizando relaciones empíricas no ajustadas localmente, como podría ser el caso de la radiación neta (Batchelor, 1984). Parece razonable pensar que, en las horas centrales del día, el valor de la resistencia aparente de la cubierta vegetal debe ser mínimo, y en todo caso menor que 70 s m^{-1} (Berengena et al., 2001). Esto refuerza la hipótesis de que para estimar valores horarios de ET_o sería más adecuado utilizar una resistencia del cultivo variable (Todorovic, 1999). Esta situación no se plantea en la ecuación de Penman, en la que no interviene esta variable. De hecho, las desviaciones detectadas utilizando el método de Penman en base horaria fueron sistemáticas a lo largo de todo el intervalo medido (Berengena et al., 2001).

El objetivo de este trabajo es la evaluación de los métodos más usados para estimar la ET_o , en las condiciones advectivas del verano en el valle medio del Guadalquivir, investigando la relación entre el grado de precisión de las estimaciones y la intensidad del proceso advectivo.

MATERIAL Y MÉTODOS

El trabajo se realizó durante los años 1999, 2000 y 2001 en la estación experimental de la Alameda del Obispo (latitud $37^{\circ}51'N$, longitud $4^{\circ}51'W$ y altitud 110 m), donde se ubica el Centro de Investigación y Formación Agraria de Córdoba (España), en el valle medio del Guadalquivir. Todos los experimentos fueron realizados sobre una pradera de festuca (*Festuca arundinacea* Schreb.), utilizada como referencia, periódicamente regada y segada, con una superficie aproximada de 1.5 ha.

En el centro de la parcela se ubica un lisímetro gravimétrico cuyo tanque tiene unas dimensiones de $2 \times 3 \text{ m}^2$ en superficie y 1.5 m de profundidad (Colomer et al., 1986). Dicho tanque gravita sobre la plataforma de una báscula contrapesada capaz de detectar variaciones de peso en torno a los 100 g, por lo que la precisión del lisímetro se sitúa aproximadamente en 11.3 W m^{-2} para registros horarios de evapotranspiración. Las lecturas del lisímetro se automatizaron mediante una célula de carga modelo TSF (Epel Industrial S.A., Barcelona) y un datalogger CR510 (Campbell Scientific, Logan, UT) programado para registrar el peso cada hora durante el año 1999 y cada media hora durante los años 2000 y 2001. Cada registro horario de peso resultó de la media de las 120 lecturas tomadas cada dos segundos en el intervalo de cuatro minutos centrado en la hora entera (1999) o en ésta y la media hora (2000 y 2001). De esta manera se eliminaron las fluctuaciones en el peso originadas por la fricción del aire sobre la superficie del lisímetro. La célula de carga se calibró cada año al comienzo de los experimentos relacionando el registro en mV con el peso del lisímetro para diferentes valores del mismo, obteniéndose los parámetros de la recta de calibración por regresión mínimo cuadrática.

Sobre la pradera, a unos 30 m del lisímetro, se ubica una estación agroclimática automática equipada con un datalogger CR10X (Campbell Scientific, Logan, UT), alimentado con panel solar y batería, con sensores para la medida de la temperatura y humedad relativa media del aire a 1.5 m de altura (Sonda HMP45A, Vaisala), radiación solar (piranómetro CM 6B, Kipp & Zonen), velocidad y dirección del viento a 2 m de altura (anemómetro A100R y veleta W200P, Vector Inst.) y radiación neta (radiómetro neto Q-7, REBBS, Inc.).

Se evaluaron los siguientes métodos:

1. Dos ecuaciones derivadas del llamado método combinado (Penman, 1948), que resulta de combinar la ecuación de transporte con la de balance de energía en la superficie: Penman y Penman-Monteith versión FAO-56 (Allen et al., 1998).

2. Dos métodos basados en la temperatura: Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985) y Blaney-Criddle versión FAO-24 (Doorenbos y Pruitt, 1975) con el coeficiente b calculado en la forma propuesta por Allen y Pruitt (1991).

3. Tres métodos basados en la radiación: Priestley-Taylor (1972), Radiación FAO-24 (Doorenbos y Pruitt, 1975) y Ritchie (Jones y Ritchie, 1990).

La ecuación de Penman se evaluó en su versión FAO-24, utilizando el coeficiente corrector en la forma propuesta por Allen y Pruitt (1991) y con el déficit de presión de vapor (DPV) medio diario calculado a partir de los valores medios diarios de temperatura y humedad relativa. Por otra parte, con la mitad de los días estudiados se ajustó una función de viento a las condiciones locales y se evaluó la ecuación ajustada, con esta función de viento, utilizando la otra mitad de los días disponibles.

Dado que la altura media del cultivo de referencia fue 0.12 m, la altura del anemómetro 2 m y la de los sensores de humedad y temperatura 1.5 m, en la ecuación de Penman-Monteith FAO-56 se consideró una resistencia de la cubierta constante e igual a 70 s m^{-1} y una resistencia aerodinámica igual a $198.93/u \text{ s m}^{-1}$, siendo u la velocidad del viento medida a 2 m de altura. El déficit de presión de vapor (DPV) medio diario se obtuvo a partir de la media aritmética de los 24 valores medios horarios de DPV.

En la ecuación Radiación FAO-24 se utilizó el factor de corrección propuesto por Doorenbos y Pruitt (1977), calculado con la expresión ajustada por Frevert *et al.* (1983).

Los valores de ET_o estimados con cada uno de los métodos mencionados se compararon con los valores medidos con el lisímetro. Se eliminaron todos los registros que estuvieron afectados por la aplicación de un riego, la siega de la pradera o lluvia, así como aquellos días posteriores al riego o la lluvia en que el agua interceptada por la vegetación pudo influir en los registros de evapotranspiración. Durante los experimentos no se observaron diferencias aparentes entre el desarrollo de la festuca dentro y fuera del lisímetro.

Por último, se evaluó la influencia de la advección de calor sensible sobre las estimaciones de ET_o analizando separadamente los días en los que el índice de advección ($IA=ET_o/R_n$) fue mayor y menor que la unidad. Dado que la media diaria del flujo de calor en el suelo (G) suele ser pequeña, su valor fue despreciado en los cálculos medios diarios. Igualmente se evaluaron la precisión y sensibilidad de cada uno de los métodos frente a la severidad de la advección.

Parámetros estadísticos de comparación

Los valores de ET_o fueron comparados utilizando análisis de regresión simple y otros estadísticos citados por Willmott (1982). El error fue calculado como:

$$RMSE=[N^{-1} \sum(P_i - O_i)^2]^{1/2} \quad (2)$$

donde N es el número de observaciones horarias o diarias y P_i y O_i son los valores estimados y observados comparados. Se estimaron las componentes sistemática y aleatoria ($RMSE_s$ y $RMSE_a$ respectivamente) del $RMSE$, dadas por:

$$RMSE_s=[N^{-1} \sum(P_{iest} - O_i)^2]^{1/2} \quad (3)$$

$$RMSE_a=[N^{-1} \sum(P_i - P_{iest})^2]^{1/2} \quad (4)$$

donde P_{iest} es el valor estimado ajustado con los parámetros de la regresión correspondiente.

La raíz cuadrada del error cuadrático medio expresado como un porcentaje del valor medio de una de las variables (normalmente ET_o medida en el lisímetro) fue utilizado como una medida del error relativo ($ER=RMSE/ET_o$).

Se utilizó igualmente el índice de similitud (IS) como una medida relativa de la diferencia entre variables, dado por:

$$IS = 1 - [\sum(P_i - O_i)^2 / \sum(P_i - O_{med} + O_i - O_{med})^2] \quad (5)$$

donde O_{med} es el valor medio de la variable observada. Un perfecto acuerdo entre P y O existe si $IS=1$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estimaciones diarias

La Figura 1 presenta los gráficos donde se relacionan los valores diarios de la ET_o medida en el lisímetro con los estimados mediante los métodos descritos. De los mismos se deduce la superioridad de la ecuación de Penman-Monteith versión FAO-56 sobre el resto de los métodos estudiados,

INFLUENCIA DE LA ADVECCIÓN DE CALOR SENSIBLE EN LA PRECISIÓN DE LOS MÉTODOS DE CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN...

aunque ésta produjo una ligera subestimación de la ET_o para valores superiores a 6 mm día⁻¹. La ecuación de Penman versión FAO-24 sobrestimó considerablemente la evapotranspiración en todo el intervalo medido. El factor de corrección “c” introducido por Doorenbos y Pruitt (1975) no supuso ninguna mejora en las estimaciones, más bien al contrario. El resto de los métodos recomendados por la FAO en el manual n° 24 (Doorenbos y Pruitt, 1975) sobrestimaron igualmente la evapotranspiración de forma considerable. El método de Hargreaves se comportó de manera irregular, sobrestimando ligeramente la ET_o para valores inferiores a 5 mm día⁻¹, valor a partir del cual produjo una subestimación de la misma. La ecuación de Priestley-Taylor con $\alpha=1.26$ subestimó la evapotranspiración prácticamente en todo el intervalo de medida, con una dispersión bastante acusada. Por último, el método de Ritchie sobrestimó hasta valores de 4 mm día⁻¹, momento a partir del cual subestimó la evapotranspiración, todo ello con bastante dispersión.

En la Tabla 1 se presenta el resultado de la evaluación de los ocho métodos de estimación de la ET_o media diaria, mediante análisis de regresión simple entre los valores estimados y los medidos en el lisímetro, con indicación del cálculo de estadísticos de error y del índice de similitud. La ecuación de Penman-Monteith FAO-56 presentó el mejor comportamiento, con una subestimación media inferior al 3% y el valor más bajo de la raíz cuadrada del error cuadrático medio ($RMSE$), 0.42 mm día⁻¹,

lo que supuso un error relativo (definido como el cociente del $RMSE$ y el valor medio de la evapotranspiración medida en el lisímetro) del 7%. Por último el índice de similitud superó el valor de 0.99, presentando la menor dispersión de todos los métodos evaluados ($R^2=0.97$).

Los tres métodos propuestos en el manual FAO-24 (Doorenbos y Pruitt, 1975) dieron lugar a sobrestimaciones importantes. El mejor comportamiento correspondió al método FAO-Radiación, con una sobrestimación media del 13% y un $RMSE$ de 1.12 mm día⁻¹, equivalente a un error relativo del 19% aproximadamente, seguido del método Penman-FAO con $c=1$, que sobrestimó como media un 17%, con un error relativo del 19%. Los peores comportamientos correspondieron a los métodos de FAO Blaney-Criddle y Penman-FAO corregido, con sobrestimaciones medias del 21 y el 25% respectivamente, y errores de 1.52 y 1.63 mm día⁻¹ para cada uno de ellos, lo que supuso errores relativos superiores al 25% en ambos casos.

El método de Ritchie presentó el segundo valor más bajo de $RMSE$ (0.91 mm d⁻¹), aunque lejos del de Penman-Monteith FAO-56, con un error relativo del 15% y una subestimación media del 5%, pero con uno de los valores más bajos del coeficiente de determinación, igual 0.85, lo cual supone una limitación a este método. De igual forma, el método de Hargreaves, con una subestimación media del 7%, tuvo un comportamiento similar al anterior,

Tabla 1. Evaluación de los métodos de estimación de ET_o media diaria. Regresiones de los valores estimados sobre los observados (medidos en el lisímetro). Los estimados se tomaron como variable dependiente.

| METODO | N | O_{med} | P_{med} | A | B | R^2 | RMSE | $RMSE_s$ | $RMSE_a$ | ER | IS |
|------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------|------|
| | | (mm día ⁻¹) | (mm día ⁻¹) | (mm día ⁻¹) | | | (mm día ⁻¹) | (mm día ⁻¹) | (mm día ⁻¹) | (%) | |
| RANK | $ET_o(mod) = A + B * ET_o$ | | | | | | | | | | |
| PENMAN-MONTEITH FAO | 184 | 6.0 | 5.8 (97) | 0.20 ^{ns} | 0.94 ^{ns} | 0.97 ^s | 0.42 | 0.20 | 0.37 | 7.0 | 0.99 |
| RITCHIE | 184 | 6.0 | 5.7 (95) | 0.85 ^s | 0.81 ^s | 0.85 ^s | 0.91 | 0.51 | 0.75 | 15.1 | 0.95 |
| HARGREAVES | 184 | 6.0 | 5.6 (93) | 0.96 ^s | 0.77 ^s | 0.81 ^s | 1.04 | 0.56 | 0.87 | 17.2 | 0.93 |
| RADIACIÓN FAO-24 | 184 | 6.0 | 6.8 (113) | 0.32 ^{ns} | 1.07 ^{ns} | 0.90 ^s | 1.12 | 0.77 | 0.81 | 18.7 | 0.94 |
| PENMAN FAO-24 $c=1$ | 184 | 6.0 | 7.0 (117) | 0.36 ^{ns} | 1.11 ^{ns} | 0.97 ^s | 1.15 | 1.06 | 0.45 | 19.2 | 0.94 |
| PRIESTLEY-TAYLOR | 184 | 6.0 | 5.1 (85) | 0.60 ^s | 0.75 ^s | 0.90 ^s | 1.17 | 1.01 | 0.58 | 19.5 | 0.92 |
| BLANEY-CRIDDLE FAO | 184 | 6.0 | 7.3 (121) | 0.71 ^s | 1.10 ^{ns} | 0.93 ^s | 1.52 | 1.33 | 0.72 | 25.3 | 0.90 |
| PENMAN FAO-24 | 184 | 6.0 | 7.5 (125) | 0.24 ^{ns} | 1.20 ^s | 0.96 ^s | 1.63 | 1.53 | 0.55 | 27.1 | 0.90 |

N: número de observaciones; O_{med} : media de los valores medidos; P_{med} : media de los valores estimados (entre paréntesis se expresa el porcentaje respecto al valor medido); A: ordenada en el origen; B: coeficiente de regresión; R^2 : coeficiente de determinación; $RMSE$: raíz cuadrada del error cuadrático medio; $RMSE_s$ y $RMSE_a$: componentes sistemática y aleatoria de la raíz cuadrada del error cuadrático medio; ER: error relativo ($RMSE/O_{med}$); IS: índice de similitud. s: significativo para R^2 , significativamente distinto de 0 para A y distinto de 1 para B ($\alpha=0.05$). ns: no significativo para R^2 , no significativamente distinto de 0 para A y de 1 para B ($\alpha=0.05$).

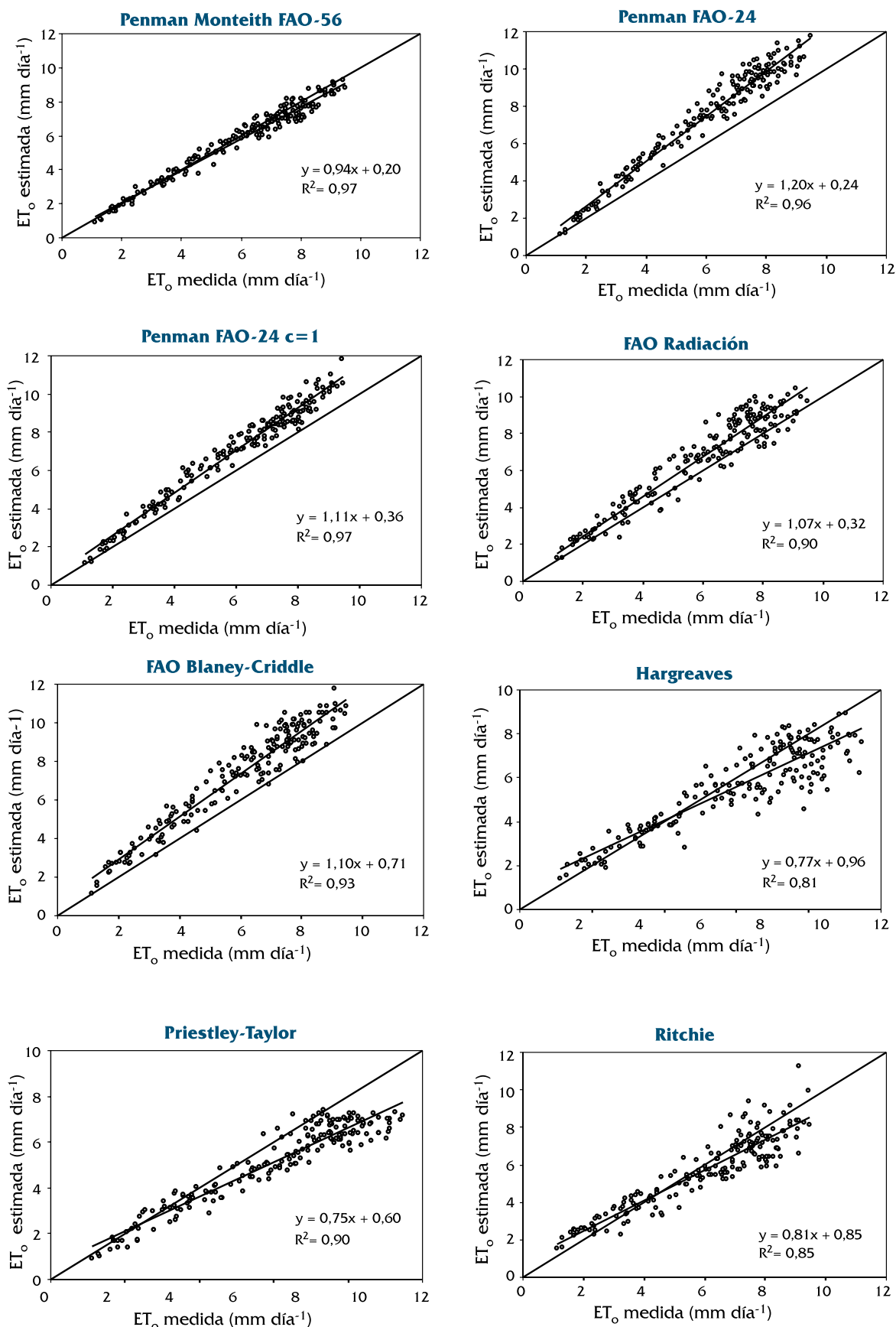


Figura 1. Comparación entre los valores diarios de ET_0 medidos y estimados con diferentes métodos de cálculo de la evapotranspiración de referencia.

aunque la subestimación aumentó igualmente con la demanda y presentó el valor más bajo del coeficiente de determinación ($R^2=0.81$), lo cual supone igualmente una limitación al método.

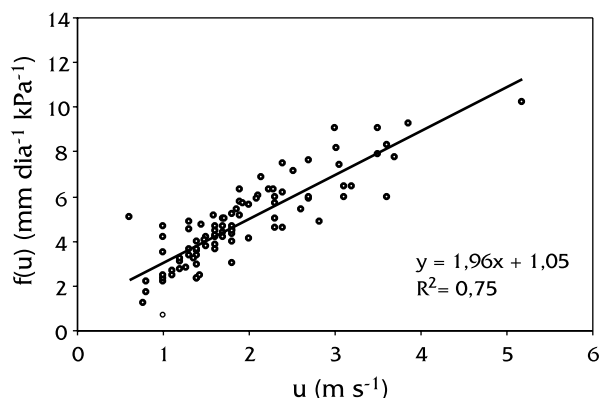


Figura 2. Función de viento diaria ajustada ($f(u)$) para la ecuación de Penman para las condiciones locales (u : velocidad del viento medida a 2 m de altura).

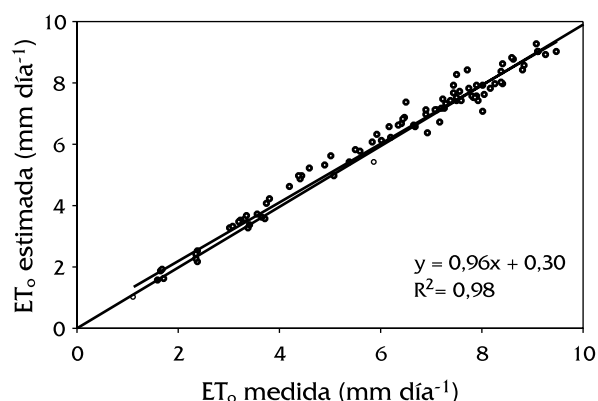


Figura 3. Comparación entre los valores de ET_0 medidos y estimados mediante la ecuación de Penman con la función de viento ajustada $f(u) = 1.96 \cdot u + 1.05$.

El método de Priestley-Taylor subestimó considerablemente, aproximadamente un 15% de media, y manifestó una fuerte tendencia a acentuar la subestimación al aumentar la demanda. Este mal comportamiento era de esperar teniendo en cuenta que el valor de α fue obtenido en las condiciones frescas y húmedas de Holanda.

Los métodos estudiados presentaron diferentes comportamientos en cuanto a posibilidades de ajuste local. Las posibilidades de ajuste local en el caso de Penman-Monteith son mínimas, aunque no parecen ser necesarias. Para el método Penman-FAO con $c=1$ la componente aleatoria del $RMSE$ fue igual a 0.45 mm día^{-1} , lo que supondría un error relativo aleatorio del 7.5%. Similares resultados se observaron para el método de Penman-FAO 24: componente aleatoria del $RMSE$ igual a 0.55 mm día^{-1} (equivalente a un error relativo del 9%). En los restantes casos las posibilidades de ajuste local fueron limitadas, pues en todos ellos el $RMSE$ aleatorio superó el 12%, llegando en algunos casos, como en la ecuación del Hargreaves, al 15%.

Para estudiar el comportamiento local de la ecuación de Penman se calculó una función de viento diaria ajustada a las condiciones locales utilizando la mitad de los datos de los tres años disponibles elegidos al azar (en total, 92 días). La función de viento diaria ajustada (Figura 2) resultante fue: $f(u) = 1.96 \cdot u + 1.05$ ($R^2 = 0.75$), siendo u la velocidad del viento medida a 2 m de altura, con los coeficientes válidos para R_n en mm día^{-1} y el déficit de presión de vapor en kPa . Con esta función de viento se calculó la evapotranspiración por el método de Penman para los 92 días restantes. La comparación de estos valores calculados con los medidos (Tabla 2) indica que la ecuación de Penman, una vez ajustada a las condiciones locales, fue incluso superior a la de Penman-Monteith FAO-56, con valores de $RMSE$ iguales a 0.33 y 0.44 mm día^{-1} respectivamente. La ecuación de Penman ajustada a las condiciones locales sobrestimó un 1%,

Tabla 2. Evaluación de los métodos de estimación de ET_0 media diaria para 92 días utilizando la función de viento ajustada en el método de Penman. Regresiones de los valores estimados sobre los observados (medidos en el lisímetro). Los estimados se tomaron como variable dependiente.

| METODO | N | O_{med} | P_{med} | A | B | R^2 | RMSE | $RMSE_s$ | $RMSE_a$ | ER | IS |
|---|----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------|------|
| | | (mm día^{-1}) | (mm día^{-1}) | (mm día^{-1}) | | | (mm día^{-1}) | (mm día^{-1}) | (mm día^{-1}) | (%) | |
| $ET_0 \text{ (mod)} = A + B \cdot ET_0$ | | | | | | | | | | | |
| PENMAN-MONTEITH FAO | 92 | 6.1 | 5.9 (97) | 0.20 ^{ns} | 0.95 ^{ns} | 0.97 ^s | 0.44 | 0.21 | 0.38 | 7.2 | 0.99 |
| PENMAN FAO-24 | 92 | 6.1 | 7.7 (125) | 0.27 ^{ns} | 1.21 ^s | 0.96 ^s | 1.70 | 1.60 | 0.55 | 27.6 | 0.90 |
| PENMAN AJUSTADA | 92 | 6.1 | 6.2 (101) | 0.30 ^{ns} | 0.96 ^{ns} | 0.98 ^s | 0.33 | 0.00 | 0.33 | 5.4 | 0.99 |

Leyenda: ver Tabla 1.

mientras que la de Penman-Monteith FAO-56 subestimó un 3% (Tabla 2). Por último hay que señalar que el método Penman FAO-24, aun en la situación más favorable de $c=1$, no puede competir con ninguno de los anteriores a la vista de los resultados (Tablas 1 y 2).

Estimaciones horarias

Se evaluaron dos métodos de determinación de la ET_o horaria: el de Penman-Monteith FAO-56 y el de Penman FAO-24 con $c=1$. En total se analizaron las fracciones horarias de los 52 días en los que se midió con precisión el flujo de calor en el suelo (valor medio de 4 platos de flujo y 8 termopares de suelo). Nuevamente, el método de Penman-Monteith volvió a mostrarse superior igualmente en este caso (Tabla 3), aunque para valores del flujo de calor latente superiores a 300 W m^{-2} (aproximadamente 0.44 mm h^{-1} de ET_o) se manifestó una clara tendencia a la subestimación de la evapotranspiración, ocurriendo lo contrario por debajo de este valor, de lo que se deduce la tendencia del método a subestimar en horas de alta demanda evaporativa y sobrestimar en caso contrario (Figura 4). En cualquier caso, el método sobrestimó como media apenas un 2%, con un error relativo del 18% y un índice de similitud igual a 0.99 (Tabla 3). Este comportamiento se puede atribuir al error introducido al suponer un valor constante de $r_c=70 \text{ s m}^{-1}$ a lo largo de todo el día. Es de suponer que los valores mínimos de r_c se den a las horas de máxima demanda evaporativa, lo que explicaría la existencia de subestimaciones en estas condiciones (Berengena et al., 2001).

El método Penman FAO-24 sobrestimó siempre la ET_o horaria, tanto más cuanto mayor fue la demanda evaporativa (Figura 5), con un $RMSE$ que fue casi el doble del caso anterior y con un índice de similitud igual a 0.98 (Tabla 3). En este caso las desviaciones fueron sistemáticas (La componente sistemática de $RMSE$ fue igual a 57.22 W m^{-2}).

Para estudiar el comportamiento local de la ecuación de Penman para estimaciones horarias, se calculó una función de viento ajustada a las condiciones locales utilizando las mitad de los datos de los tres años disponibles elegidos al azar (en total, 624 registros horarios). La función de viento diaria ajustada resultante fue: $f(u)=1.94 \cdot u - 0.68$ ($\text{mm h}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$) ($R^2=0.62$), siendo u la velocidad del viento medida a 2 m de altura, con los coeficientes válidos para R_n en W m^{-2} y el déficit de presión de vapor en kPa (Figura 6). Con esta función de viento se calculó la evapotranspiración por el método Penman ajustado para los 624 periodos horarios restantes. La comparación de estos valores calculados con los medidos (Tabla 3) indica que el método de Penman una vez ajustado a las condiciones locales fue incluso superior al de Penman-Monteith FAO-56, con valores de $RMSE$ igual a 25.6 y 35.2 W m^{-2} respectivamente, de lo que se deduce que cuando se requieran estimaciones horarias precisas sería preferible recurrir a la ecuación de Penman ajustada, al igual que ocurre para estimaciones medias diarias (Figura 7).

Tabla 3. Evaluación de los métodos de estimación de ET_o horaria para 26 días utilizando la función de viento ajustada en el método Penman. Regresiones de los valores estimados sobre los observados (medidos en el lisímetro). Los estimados se tomaron como variable dependiente.

| METODO | N | O_{med} | P_{med} | A | B | R^2 | RMSE | $RMSE_s$ | $RMSE_a$ | ER | IS |
|----------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------|------|
| | | (W m^{-2}) | (W m^{-2}) | (W m^{-2}) | | | (W m^{-2}) | (W m^{-2}) | (W m^{-2}) | (%) | |
| RANK | $ET_o (mod) = A + B \cdot ET_o$ | | | | | | | | | | |
| P-M FAO-56 | 1246 | 189.5 | 194.0 (102) | 26.65 ^{ns} | 0.88 ^{ns} | 0.98 ^s | 34.7 | 24.7 | 24.7 | 18.3 | 0.99 |
| PENMAN FAO-24 | 1246 | 189.5 | 246.6 (130) | 46.84 ^s | 1.05 ^{ns} | 0.98 ^s | 65.3 | 57.2 | 29.7 | 34.4 | 0.98 |
| P-M FAO-56 (26 días) | 624 | 190.1 | 192.4 (101) | 25.99 ^{ns} | 0.87 ^{ns} | 0.98 ^s | 35.2 | 24.7 | 24.0 | 18.5 | 0.99 |
| P FAO-24 (26 días) | 624 | 190.1 | 245.3 (129) | 45.75 ^s | 1.05 ^{ns} | 0.98 ^s | 62.8 | 56.1 | 28.1 | 33.0 | 0.98 |
| PENMAN AJUSTADO | 624 | 190.1 | 184.4 (97) | 4.15 ^{ns} | 0.95 ^{ns} | 0.98 ^s | 25.6 | 11.3 | 22.8 | 13.5 | 0.99 |

Leyenda: ver Tabla 1.

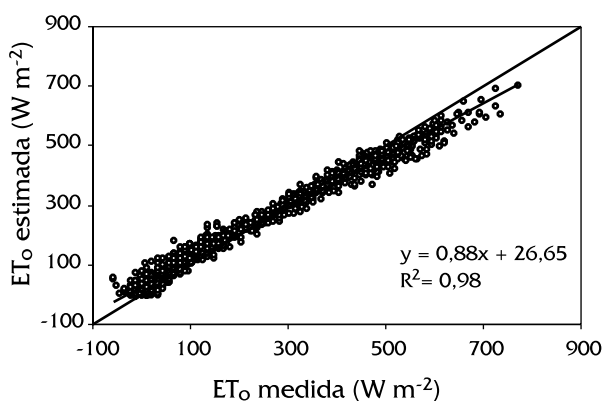


Figura 4. Comparación entre los valores horarios de ET_0 medidos y estimados con el método de Penman-Monteith FAO-56.

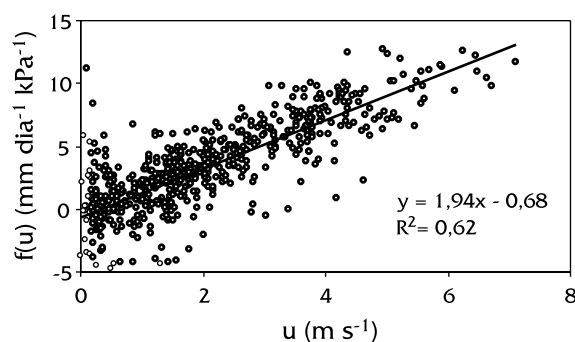


Figura 6. Función de viento ($f(u)$) horaria ajustada para la ecuación de Penman (u : velocidad del viento medida a 2 m de altura).

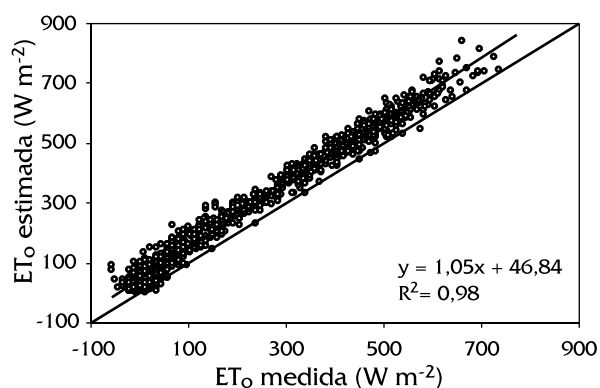


Figura 5. Comparación entre los valores horarios de ET_0 medidos y estimados con el método de Penman FAO-24 $c=1$.

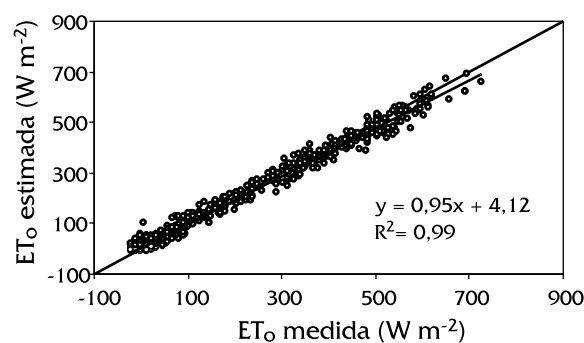


Figura 7. Comparación entre los valores de ET_0 horaria medidos y estimados con la ecuación de Penman y la función de viento ajustada $f(u) = 1.94 \cdot u - 0.68$.

Influencia de la advección en la precisión de los métodos analizados

En las Tablas 4 y 5 se presentan las evaluaciones de los métodos de estimación de la ET_0 para días advectivos ($IA > 1$) y no advectivos ($IA < 1$) respectivamente. La ecuación de Penman-Monteith FAO-56 siguió presentando el mejor comportamiento en ambos casos, si bien en condiciones advectivas se produjo un pequeño aumento del $RMSE$ (de 0.42 a 0.48 $mm día^{-1}$), para disminuir en condiciones no advectivas ($RMSE$ de 0.24 $mm d^{-1}$). De cualquier forma los errores relativos se mantuvieron en torno al 7% y los índices de similitud no bajaron del 0.98 en ninguno de los dos casos, resultando el método menos sensible a la advección de los evaluados.

El método de Penman FAO-24, sobrestimó considerablemente la ET_0 en ambos casos, si bien en condiciones advectivas la sobrestimación fue menor.

El uso del coeficiente corrector c no supuso mejora alguna en ninguno de los casos estudiados. De cualquier forma, los métodos Penman FAO-24 y Penman FAO-24 con $c=1$ resultaron ser, junto al método de Penman-Monteith, los dos procedimientos de estimación de la ET_0 menos sensibles a la advección.

Las subestimaciones del método de Priestley-Taylor con $\alpha=1.26$ disminuyeron drásticamente en condiciones no advectivas (desde un 15 hasta un 1% en sus valores medios), y el $RMSE$ pasó de 1.17 a 0.28 $mm/día$. Sin embargo, y como era de esperar, en condiciones advectivas las subestimaciones aumentaron hasta casi el 20%.

Otro método de estimación bastante sensible a la advección fue el de Hargreaves. En condiciones no advectivas se comportó razonablemente bien, con errores relativos del 13% y una subestimación de apenas el 1%. En condiciones advectivas las subestimaciones aumentaron hasta un 11%.

Tabla 3. Evaluación de los métodos de estimación de ET_o media diaria para días advectivos ($Le/Rm > 1$). Regresiones de los valores estimados sobre los observados (medidos en el lisímetro). Los estimados se tomaron como variable dependiente.

| METODO | N | O_{med} (mm día ⁻¹) | P_{med} (mm día ⁻¹) | A (mm día ⁻¹) | B | R^2 | RMSE (mm día ⁻¹) | RMSE _s (mm día ⁻¹) | RMSE _a (mm día ⁻¹) | ER (%) | IS |
|----------------------|-----|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------|-------------------|---------------------------------|--|--|-----------|------|
| RANK | | | $ET_o (mod) = A + B * ET_o$ | | | | | | | | |
| PENMAN-MONTEITH FAO | 128 | 6.8 | 6.6 (96) | 0.23 ^{ns} | 0.93 ^{ns} | 0.95 ^s | 0.48 | 0.29 | 0.39 | 7.1 | 0.98 |
| RITCHIE | 128 | 6.8 | 6.2 (91) | 0.10 ^{ns} | 0.89 ^{ns} | 0.80 ^s | 1.00 | 0.63 | 0.76 | 14.7 | 0.92 |
| RADIACIÓN FAO-24 | 128 | 6.8 | 7.5 (109) | -0.24 ^{ns} | 1.13 ^{ns} | 0.85 ^s | 1.07 | 0.68 | 0.83 | 15.7 | 0.92 |
| HARGREAVES | 128 | 6.8 | 6.1 (89) | 0.90 ^s | 0.76 ^s | 0.72 ^s | 1.19 | 0.83 | 0.86 | 17.4 | 0.87 |
| PENMAN FAO-24 c=1 | 128 | 6.8 | 7.9 (116) | 0.53 ^s | 1.08 ^{ns} | 0.94 ^s | 1.21 | 1.11 | 0.48 | 17.7 | 0.90 |
| PRIESTLEY-TAYLOR | 128 | 6.8 | 5.6 (82) | 0.24 ^{ns} | 0.78 ^s | 0.91 ^s | 1.39 | 1.32 | 0.44 | 20.3 | 0.84 |
| BLANEY-CRIDDLE FAO | 128 | 6.8 | 8.1 (119) | 0.49 ^s | 1.12 ^{ns} | 0.89 ^s | 1.48 | 1.31 | 0.70 | 21.7 | 0.86 |
| PENMAN FAO-24 | 128 | 6.8 | 8.4 (122) | 0.17 ^{ns} | 1.20 ^s | 0.94 ^s | 1.65 | 1.57 | 0.52 | 24.2 | 0.84 |

Tabla 5. Evaluación de los métodos de estimación de ET_o media diaria para días no advectivos ($Le/R_n < 1$). Regresiones de los valores estimados sobre los observados (medidos en el lisímetro). Los estimados se tomaron como variable dependiente.

| METODO | N | O_{med} (mm día ⁻¹) | P_{med} (mm día ⁻¹) | A (mm día ⁻¹) | B | R^2 | RMSE (mm día ⁻¹) | RMSE _s (mm día ⁻¹) | RMSE _a (mm día ⁻¹) | ER (%) | IS |
|----------------------|----|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|--------------------|-------------------|---------------------------------|--|--|-----------|------|
| RANK | | | $ET_o (mod) = A + B * ET_o$ | | | | | | | | |
| PENMAN-MONTEITH FAO | 56 | 4.1 | 4.2 (101) | -0.07 ^{ns} | 1.03 ^{ns} | 0.99 ^s | 0.24 | 0.07 | 0.23 | 5.7 | 0.99 |
| RITCHIE | 56 | 4.1 | 4.6 (111) | 0.69 ^s | 0.95 ^{ns} | 0.95 ^s | 0.63 | 0.36 | 0.51 | 15.4 | 0.97 |
| RADIACIÓN FAO-24 | 56 | 4.1 | 5.2 (125) | -0.10 ^{ns} | 1.28 ^s | 0.98 ^s | 1.23 | 1.18 | 0.34 | 29.7 | 0.93 |
| HARGREAVES | 56 | 4.1 | 4.2 (101) | 0.23 ^{ns} | 1.03 ^{ns} | 0.96 ^s | 0.54 | 0.33 | 0.43 | 13.1 | 0.98 |
| PENMAN FAO-24 c=1 | 56 | 4.1 | 5.0 (121) | 0.02 ^{ns} | 1.21 ^s | 0.98 ^s | 1.02 | 0.97 | 0.30 | 24.6 | 0.95 |
| PRIESTLEY-TAYLOR | 56 | 4.1 | 4.1 (99) | 0.02 ^{ns} | 0.99 ^{ns} | 0.98 ^s | 0.28 | 0.02 | 0.28 | 6.8 | 0.99 |
| BLANEY-CRIDDLE FAO | 56 | 4.1 | 5.6 (135) | 0.24 ^{ns} | 1.29 ^s | 0.97 ^s | 1.60 | 1.53 | 0.46 | 38.7 | 0.89 |
| PENMAN FAO-24 | 56 | 4.1 | 5.4 (132) | -0.29 ^{ns} | 1.39 ^s | 0.98 ^s | 1.57 | 1.53 | 0.36 | 38.1 | 0.90 |

Leyenda: ver Tabla 2.

Dos de los métodos propuestos en el manual FAO-24, el basado en la radiación y el de Blaney-Criddle, se mostraron muy sensibles a la advección. Las condiciones advectivas hicieron disminuir las sobrestimaciones, pero siempre fueron superiores al 9 y 19% respectivamente.

El método de Ritchie se mostró igualmente muy sensible a la advección, con un mejor comportamiento en condiciones no advectivas, pero siempre con errores relativos superiores al 15%.

Se realizó un estudio de la precisión de las estimaciones de los métodos evaluados definiendo la variable Q , dada por:

$$Q = ET_{o \text{ estimada}} / ET_{o \text{ medida}} \quad (24)$$

La precisión del método depende de la mayor o menor desviación de Q respecto a 1. Valores mayores que 1 indican sobrestimación y viceversa.

Se observó una correlación negativa entre Q e IA con excepción de las ecuaciones de Penman-Monteith y la de Penman FAO-24, en las que el bajo valor del coeficiente de determinación puso de manifiesto la escasa dependencia entre ambas variables (Tabla 6). No obstante, y a pesar de ello, las ecuaciones resultantes del ajuste se utilizaron en el análisis.

Las relaciones observadas resultaron ser de tipo potencial ($Q=a \cdot IA^b$) (Figura 8) y de ellas se deduce la tendencia a sobrestimar la evapotranspiración en todos los métodos para valores bajos de IA y al contrario. El índice de advección que da lugar a la máxima precisión depende de cada método de estimación (Tabla 6). Con un índice de advección igual a 0.84 la ecuación de Penman-Monteith ofrece los mejores resultados, mientras que la de Radiación FAO-24 lo hace para un $IA=1.36$. Se observa que para valores de IA igual a 1 se obtienen buenas estimaciones en los métodos de Penman-Monteith FAO-56, Ritchie y Hargreaves, pero si se alcanzan valores de IA superiores, el único método que proporciona buenas estimaciones es el de Penman-Monteith FAO-56 (subestimaciones del 4.05 y 5.75% para IA iguales a 1.2 y 1.4 respectivamente). El único método que muestra un buen comportamiento a lo largo de todo el intervalo de IA es el de Penman-Monteith FAO-56.

La sensibilidad a la advección de cada uno de los métodos se calculó derivando la expresión $Q=f(IA)$ con respecto a IA . El resultado se presenta en la Figura 9 para un intervalo del índice de advección entre 0.5 y 2.5. En todos los casos la sensibilidad disminuyó conforme aumentó la intensidad del proceso advectivo. Los métodos menos sensibles fueron, por este orden, Penman-Monteith,

Penman FAO-24 con $c=1$ y Penman FAO-24, de lo que se deduce que el uso del factor c , además de producir mayores subestimaciones, aumenta la sensibilidad de la ecuación de Penman modificada a la advección, es decir no presenta ninguna ventaja en este tipo de ambientes. Los métodos más sensibles resultaron ser, por este orden, el Ritchie, Hargreaves y Priestley-Taylor, con los métodos FAO-Radiación y Blaney-Criddle FAO en situación intermedia, aunque muy lejos de los basados en la ecuación de Penman. Por último, cabría destacar que para una precisión del 100% ($Q=I$), los valores menores de sensibilidad los registraron igualmente los métodos basados en la ecuación de combinación. Como conclusión, se observó que el método de Penman-Monteith en un intervalo de IA entre 0.8 y 1.4, pasó de sobrestimar la ET_0 un 0.5% a subestimarla en un 5.75%, un indicador más de su buen comportamiento, incluso en situaciones en que la advección pueda ser un fenómeno de relevancia, como ocurre en el Valle del Guadalquivir. Ningún otro método mostró tanta capacidad para predecir con precisión bajo situaciones tan diversas.

Estimaciones horarias

Como cabría esperar, el fenómeno advectivo se intensificó conforme aumentó la velocidad del viento. Esta dependencia en base diaria debe tener su reflejo a escala horaria. La relación entre la velocidad del viento media diaria y la intensidad de la advección se pone de manifiesto en la Figura 10, donde se presenta la variación del índice de advección con dicha variable. Se evaluó el método de Penman-Monteith para valores horarios para distintas velocidades de viento con el resultado que aparece en la Tabla 7.

Tabla 6. Precisión de los métodos de estimación de la ET_0 en función de la intensidad de la advección.

| MÉTODO | ECUACIÓN | R ² | % DE ERROR PARA IA | | | | IA | Q | S |
|---------------------|----------------------|----------------|--------------------|-------|--------|--------|------|--------|-------|
| | | | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.4 | | | |
| PENMAN-MONTEITH FAO | $Q=0.98 x^{-0.116}$ | 0.062 | 0.57 | -2 | -4.05 | -5.75 | Q=1 | IA=1.3 | Q=1 |
| RITCHIE | $Q=1.028 x^{-0.827}$ | 0.549 | 23.63 | 2.80 | -11.59 | -22.17 | 1.03 | 0.83 | -1.19 |
| HARGREAVES | $Q=0.996 x^{-0.736}$ | 0.419 | 17.38 | -0.40 | -12.91 | -22.25 | 0.99 | 0.82 | -1.03 |
| RADIACIÓN FAO-24 | $Q=1.165 x^{-0.492}$ | 0.355 | 30.02 | 16.50 | 6.50 | -1.27 | 1.36 | 1.02 | -0.36 |
| PENMAN FAO-24 c=1 | $Q=1.184 x^{-0.099}$ | 0.044 | 21.04 | 18.40 | 16.28 | 14.52 | 5.51 | 1.15 | -0.02 |
| PRIESTLEY-TAYLOR | $Q=0.903 x^{-0.73}$ | 0.799 | 6.28 | -9.70 | -20.95 | -29.37 | 0.87 | 0.75 | -0.84 |
| BLANEY-CRIDDLE FAO | $Q=1.271 x^{-0.43}$ | 0.351 | 39.90 | 27.10 | 17.52 | 9.98 | 1.75 | 1.14 | -0.25 |
| PENMAN FAO-24 | $Q=1.257 x^{-0.202}$ | 0.144 | 31.50 | 25.70 | 21.15 | 17.44 | 3.10 | 1.19 | -0.07 |

Q : cociente entre la ET_0 estimada y la medida; x : índice de advección (IA); S : sensibilidad (dQ/dIA).

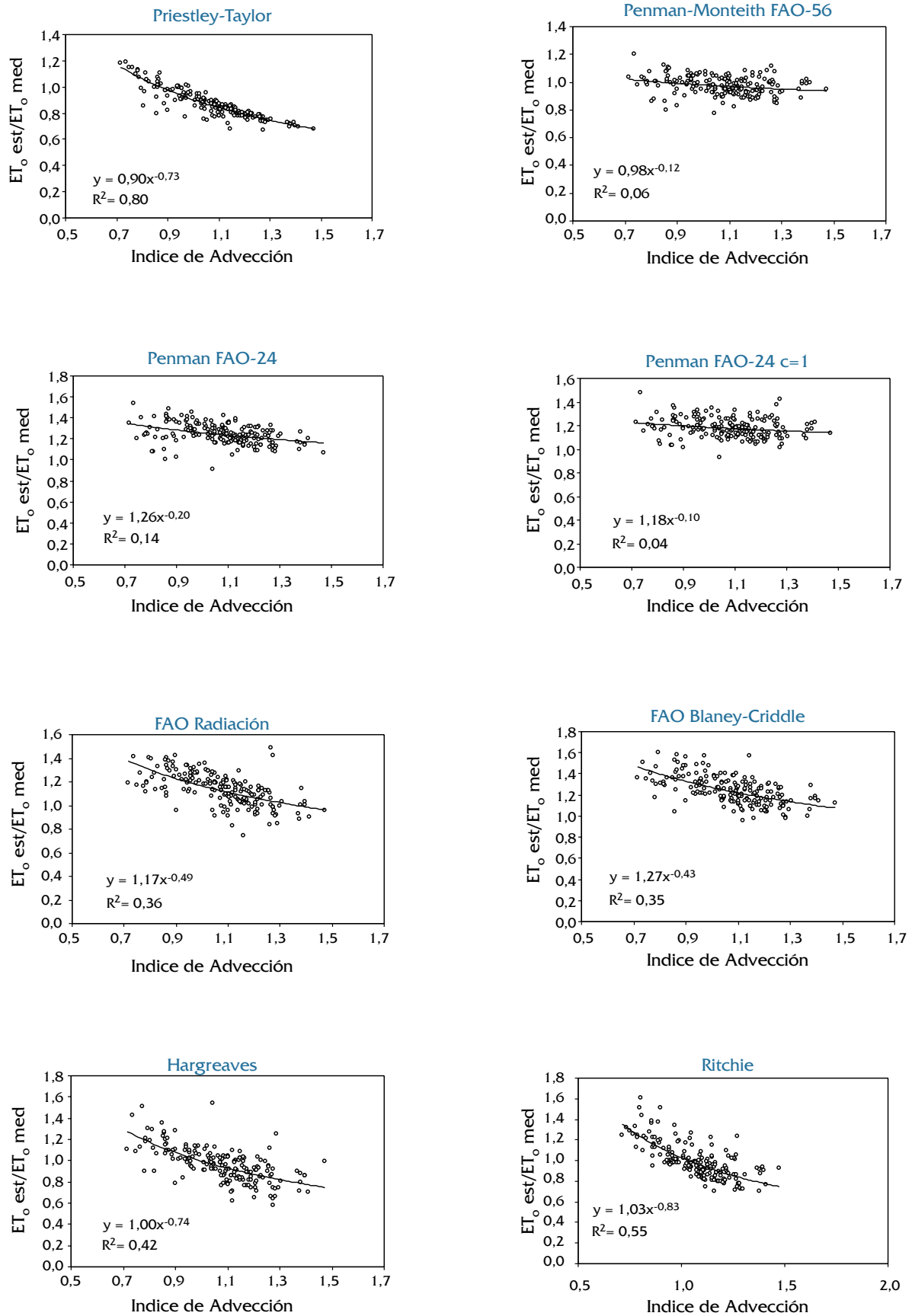


Figura 8. Precisión de los diferentes métodos de estimación de la ET_0 en función del índice de advección.

INFLUENCIA DE LA ADVECCIÓN DE CALOR SENSIBLE EN LA PRECISIÓN DE LOS MÉTODOS DE CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN...

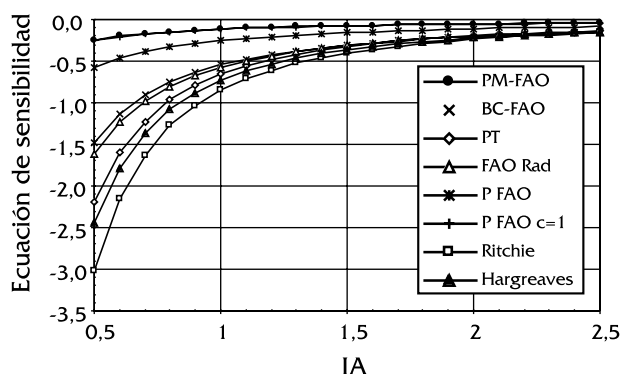


Figura 9. Funciones de sensibilidad a la advección (PM-FAO: Penman-Monteith FAO-56; BC-FAO: Blaney-Criddle FAO-24; PT: Priestley-Taylor; FAO Rad: Radiación FAO-24; P FAO: Penman FAO-24; P FAO c=1: idem con c=1; IA: índice de advección).

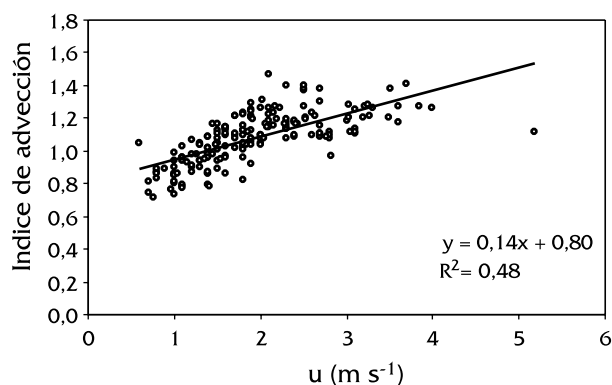


Figura 10. Índice de advección (IA) en función de la velocidad del viento media diaria (u).

El menor valor de *RMSE* se registró para velocidades inferiores a 2 m s^{-1} (*RMSE* igual a 27.8 W m^{-2} , equivalente a 0.04 mm h^{-1} de evapotranspiración), aumentando prácticamente al doble (56.1 W m^{-2} , equivalente a 0.08 mm h^{-1} de *ET*) para velocidades del viento mayores a 5 m s^{-1} . Por tanto, cuando la velocidad media del viento se multiplicó por 5, el error sólo lo hizo por 2. Así pues, la ecuación amortiguó considerablemente la influencia del fenómeno advectivo sobre su precisión,

Tabla 7. Evolución de los errores (*RMSE* y *ER*) e índice de similitud (*IS*) de la comparación entre los valores horarios de ET_0 medidos y estimados por el procedimiento de Penman-Monteith FAO-56 para distintos intervalos de velocidad del viento.

| VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s) | N | RMSE (W m^{-2}) | ER | IS |
|-------------------------------|-----|-------------------------------|------|-------|
| 0.0-2.0 | 745 | 27.8 | 23.5 | 0.993 |
| 2.0-3.0 | 205 | 34.4 | 13.6 | 0.991 |
| 3.0-4.0 | 151 | 43.4 | 15.6 | 0.986 |
| 4.0-5.0 | 103 | 50.1 | 13.6 | 0.980 |
| >5.0 | 44 | 56.1 | 15.0 | 0.975 |

N: número de registros disponibles; *RMSE*: raíz cuadrada del error cuadrático medio; *ER*: error relativo ($RMSE/ET$); *IS*: índice de similitud.

lo cual se suma a los resultados de las estimaciones diarias. Lecina *et al.* (2000) encontraron que en Zaragoza, en el mismo intervalo de velocidades, los errores se multiplicaron casi por 4, pasando de 0.04 mm h^{-1} a 0.14 mm h^{-1} , achacando este mal comportamiento del método al fenómeno advectivo. Los resultados aquí presentados indican que si bien la ecuación de Penman-Monteith para registros horarios se ve afectada por la advección, lo hace en menor medida que lo presentado hasta ahora.

CONCLUSIONES

El método de Penman-Monteith FAO-56 resultó ser el más adecuado para la estimación de la ET_0 media diaria en las condiciones advectivas del valle medio del Guadalquivir. Las ecuaciones recogidas en el Manual FAO-24 (Penman, Blaney-Cridle y Radiación) sobrestimaron considerablemente la ET_0 . La ecuación de Priestley-Taylor con $\alpha=1.26$ subestimó la ET_0 , como era de esperar, mientras que las ecuaciones de Ritchie y Hargreaves subestimaron para valores de alta demanda evaporativa. La ecuación de Penman con una función de viento ajustada a las condiciones locales se reveló como la más precisa.

El método de Penman-Monteith para estimaciones horarias subestimó para valores de alta demanda evaporativa y viceversa, comportamiento que se puede atribuir al error introducido al suponer un valor constante de $r_c=70 \text{ s m}^{-1}$ a lo largo de todo el día. Es de suponer que los valores mínimos de r_c ocurran a las horas de máxima demanda evaporativa, lo que explicaría la existencia de subestimaciones en estas condiciones. El método Penman FAO-24 sobrestimó siempre la ET_0 horaria, mientras que de nuevo el mejor comportamiento fue el de la ecuación de Penman con una función de viento ajustada a las condiciones locales.

El método de Penman-Monteith se mostró superior tanto en condiciones advectivas como no advectivas, siendo el único método que tuvo un buen comportamiento a lo largo de todo el intervalo de IA . El único método que mejoró notablemente en condiciones no advectivas fue el de Priestley-Taylor, como era de esperar, si bien su comportamiento en condiciones advectivas empeoró considerablemente. Los métodos menos sensibles a la advección fueron los de Penman-Monteith y Penman FAO-24, mientras que los más sensibles fueron, por este orden, los de Ritchie, Hargreaves y Priestley-Taylor, con los métodos FAO-Radiación y Blaney-Criddle FAO en una situación intermedia. La evaluación del método de Penman-Monteith para valores horarios y distintas velocidades del viento vuelve a indicar el buen comportamiento del mismo en diferentes condiciones advectivas. En este caso, el error en la estimación de la ET_0 sólo se multiplicó por dos cuando la velocidad del viento pasó de menos de 2 a más de 5 m s⁻¹.

REFERENCIAS

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper n° 56. Roma.
- Allen, R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L., Burman, R.D., 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agron. J.*, 81: 650-662.
- Allen, R.G., Pruitt, W.O., 1991. FAO-24 reference evapotranspiration factors. *J. Irrig. Drain. Eng.*, ASCE. 117(5): 758-773.
- Batchelor, C.H., 1984. The accuracy of evapotranspiration estimated with the FAO modified Penman equation. *Irrig. Sci.*, 5: 223-233.
- Berengena, J., Mantovani, E.C., 1992. Selección de los métodos de cálculo de la ET_0 que se consideran más adecuados. Calibración de los mismos utilizando los datos climáticos y lisimétricos de la estación de la Alameda del Obispo en Córdoba. En: Estudio sobre la productividad hídrica de los regadíos. I Convenio UC-CEDEX. Centro de Estudios Hidrográficos, Madrid.
- Berengena, J., 1993. Descripción y estudio comparativo de los métodos en uso para el cálculo de la evapotranspiración de referencia. En: Estudio sobre la productividad hídrica de los regadíos. I Convenio U.C.-CEDEX. Centro de Estudios Hidrográficos, Madrid.
- Berengena, J., Gavilán, P., Márquez, F., 2001. Precisión de las estimaciones de la ET_0 en un ambiente advectivo. XIX Congreso Nacional de Riegos. Zaragoza, junio 2001. Asociación Española de Riegos y Drenajes.
- Blaney, H.F., Criddle, W.D., 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA Soil Conserv. Serv., SCS-TP96. 44 pp.
- Colomer, I., Villalobos, F.J., Lourence, F., Berengena, J., Ferreres, E., 1986. Instalación y calibrado de dos grandes lisímetros gravimétricos. V Jornadas Técnicas sobre Riegos. Málaga, Diciembre 1986. Pag. 6-I.
- De Bruin, H.A.R., Bink, N.J., Kroon, L.J.M., 1990. Fluxes in the surface layer under advective conditions. In: T.J. Schmugge and J.C. André (eds.), *Land Surface Evaporation*, New York, pp. 157-171.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1975. Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper n° 24. Roma.
- Frevert, D.K., Hill, R.W., Braaten, B.C., 1983. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. *J. Irrig. Drain. Eng.*, ASCE. 109(2): 265-270.
- Gavilán, P., Berengena, J., 2000. Comportamiento de los métodos de Penman-FAO y Penman-Monteith-FAO en el valle medio del Guadalquivir. XVIII Congreso Nacional de Riegos. Huelva, del 20 al 22 de Junio. Asociación Española de Riegos y Drenajes.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engrg.* In *Agric.*, 1(2): 96-99.
- Jensen, M.E., Burman, R.D., Allen, R.G. (ed.), 1990. Evapotranspiration and water irrigation requirements. Committee on irrigation Water Requirements, Irrigation and Drainage Division of ASCE, Manual n° 70. ASCE, N.Y.
- Jones, J.W., Ritchie, J.T., 1990. Crop Growth models. In Hoffman, G.J., Howell, T.A., Solomon, K.H. (ed.). *Management of farm irrigation systems*. ASAE Monograph N° 9. ASAE, St. Joseph, MI, pp 63-89.
- Jury, W.A., Tanner, C.W., 1975. Advection modification of the Priestley and Taylor evapotranspiration formula. *Agron. J.*, 67: 840-842.
- Lecina, S., Martínez-Cob, A., 2000. Evaluación lisimétrica de la evapotranspiración de referencia semihoraria calculada por el método FAO Penman-Monteith. XVIII Congreso Nacional de Riegos. Huelva, del 20 al 22 de junio. Asociación Española de Riegos y Drenajes.
- Makkink, G.F., 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Inst. Water Engrg.*, 11: 277-228.
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. In: Fogg, G. (Ed.), *The state and movement of water in living organisms*. Proceedings of the XIX Symposium of the Society for Experimental Biology, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 205-234.
- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Royal Soc., London Proc. Ser. A*, 193: 120-146.
- Priestley, C.H.B., Taylor, R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Mon. Weath. Rev.*, 100: 81-92.

- Rana, G., Katerji, N., Mastrorilli, M., El Moujabber, M., 1994. Evapotranspiration and canopy resistance of grass in a Mediterranean region. *Theor. Appl. Climatol.*, 50: 61-71.
- Sharma, M.L., 1985. Estimating evapotranspiration. In: Hillel, D. (ed.). *Advances in Irrigation*, Vol. 3, pp 213-281. Academic Press, Inc.
- Steduto, P., Calciandro, A., Rubino, P., Ben Mechlia, N., Mas-moudi, M., Martínez-Cob, A., Jose Faci, M., Rana, G., Mastrorilli, M., El Mourid, M., Karrou, M., Kanber, R., Kirda, C., El-Quosy, D., El-Askari, K., Ait Ali, M., Zareb, D., Snyder, R.L., 1996. Penman-Monteith reference evapotranspiration estimates in the mediterranean region. In: *Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*. Proceedings of the International Conference. Nov. 3-6. pp 357-364. San Antonio, Texas. ASAE.
- Todorovic, M., 1999. Single-layer evapotranspiration model with variable canopy resistance. *J. Irrig. Drain. Eng.*, ASCE. 125 (5): 235-245.
- Willmott, C.J., 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin American Meteorological Society*, 63 (11): 1309-1313.

LISTA DE SÍMBOLOS

- A:** ordenada en el origen
- B:** coeficiente de regresión
- c:** factor de corrección de la ecuación de Penman FAO-24
- DPV:** déficit de presión de vapor
- ER:** error relativo ($RMSE/ET_o$)
- ET (ó ET_c):** evapotranspiración del cultivo
- ET_o:** evapotranspiración de referencia
- f(u):** función de viento ajustada en la ecuación de Penman
- IA:** índice de advección medio diario (ET/R_n)
- IS:** índice de similitud
- K_c:** índice de similitud
- N:** coeficiente de cultivo
- O_i:** número de observaciones horarias o diarias de ET_o
- O_{med}:** valor de la variable observada
- P_i:** valor medio de la variable observada
- P_{iest}:** valor de la variable estimada
- P_{med}:** valor estimado ajustado con los parámetros de la regresión
- Q:** valor medio de la variable estimada
- r_c:** precisión de las estimaciones ($ET_{o\text{ estimada}}/ET_{o\text{ medida}}$)
- r_c:** resistencia aparente de la cubierta vegetal en la ecuación de Penman-Monteith FAO-56 (70 s m^{-1})
- RMSE:** raíz cuadrada del error cuadrático medio
- RMSE_a:** componente aleatoria de la raíz cuadrada del error cuadrático medio
- RMSE_s:** componente sistemática de la raíz cuadrada del error cuadrático medio
- R_n:** radiación neta
- R²:** coeficiente de determinación
- S:** sensibilidad de las estimaciones (dQ/dIA)
- u:** velocidad del viento medida a 2 m de altura
- α:** parámetro alfa en la ecuación del Priestley-Taylor