EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA DIARIA Y MENSUAL EN ARAGÓN

A. Martínez Cob

Dpto. Genética y Producción Vegetal (EEAD), Lab. Asoc. Agronomía y Medio Ambiente (DGA-CSIC), Apdo. 202, 50080 Zaragoza. Email: macoan@eead.csic.es

RESUMEN

Mediante su comparación con el método FAO56 Penman-Monteith, en tres localidades representativas de los regadíos aragoneses (Zaragoza, Ejea y Tamarite), este trabajo evalúa varios métodos de cálculo de la ET_0 diaria y mensual: 1996 Kimberly Penman (*1996-Kpen*), 1948 Penman (*1948-Pen*), FAO24 Penman (*FAO24-Pn*), FAO24 Radiación (*FAO24-Rd*), FAO24 Blaney-Criddle (*FAO24-BC*), 1985 Hargreaves (*1985-Harg*) y Priestley-Taylor (*Prs-Tylr*). Los métodos *FAO24-Pn*, *FAO24-Rd* y *FAO24-BC* sobrestimaron claramente la ET_0 diaria y mensual. Los métodos *1996-Kpen* y *1948-Pen* también sobrestimaron la ET_0 pero bastante menos acusadamente, sobre todo el método *1948-Pen* que, a escala diaria, fue el mejor método en las tres localidades. Los métodos *1985-Harg* y *Prs-Tylr* mostraron una gran dispersión a escala diaria pero a escala mensual su dispersión fue similar a la de los otros métodos. A esta escala, el método *1985-Harg* fue el mejor en Zaragoza y Ejea, y el método *Prs-Tylr* lo fue en Tamarite. Estos distintos resultados se explican por las diferencias en las velocidades de viento típicas en cada zona.

1. INTRODUCCIÓN

La mejora de la gestión de los recursos hídricos es de gran importancia para una agricultura sostenible. La cuantificación de la evapotranspiración de los cultivos es fundamental para un manejo adecuado de los recursos hídricos. El clima tiene una gran influencia sobre la evapotranspiración. Esta influencia se representa con la denominada evapotranspiración de referencia (ET_0). Existen diversos métodos de estimación de la ET_0 a partir de variables meteorológicas (Jensen et al., 1990). Recientemente, la FAO ha propuesto el método FAO56 Penman-Monteith (*FAO56PM*) (Allen et al., 1998) como el procedimiento estándar de estimación de la ET_0. Además, recomienda la evaluación y calibración de otros métodos mediante su comparación con el método *FAO56PM*. Varios trabajos indican que, en España, las estimas obtenidas con este método son muy similares a valores medidos de ET_0 mediante lisimetría (Berengena, 2001; Gavilán y Berengena, 2001; Lecina y Martínez Cob, 2000).

Este trabajo evalúa varios métodos de cálculo de la ET_0 en tres localidades representativas de los regadíos de Aragón, Zaragoza, Ejea y Tamarite. La evaluación se realizó comparando las estimas diarias y mensuales de ET_0 obtenidas con esos métodos con los valores calculados con el método *FAO56PM*.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El trabajo se realizó con los datos meteorológicos diarios registrados en tres estaciones meteorológicas automáticas situadas en los términos municipales de Zaragoza, Ejea de los Caballeros (Zaragoza) y Tamarite de Litera (Huesca) (Tabla 1). En estas estaciones se registraron valores diarios de temperatura y humedad

relativa máximas y mínimas del aire, radiación solar global incidente y velocidad de viento (Martínez Cob y Tejero, 2002), los cuales se usaron para calcular la ET_0 diaria con los métodos *FAO56PM*, 1996 Kimberly Penman (*1996-Kpen*), 1948 Penman (*1948-Pen*), FAO24 Penman (*FAO24-Pn*), FAO24 Radiación (*FAO24-Rd*), FAO24 Blaney-Criddle (*FAO24-BC*), 1985 Hargreaves (*1985-Harg*) y Priestley-Taylor (*Prs-Tylr*). Se empleó la aplicación informática *Ref-ET* Windows (versión 2) elaborada por el Dr. R. Allen (Universidad de Idaho, EE.UU.). Los distintos métodos se describen detalladamente en Jensen et al. (1990) y Allen et al. (1998). Las estimas diarias de ET_0 se promediaron para obtener estimas mensuales. De acuerdo con Allen et al. (1998), los distintos métodos se evaluaron mediante su comparación con el método *FAO56PM* por medio de análisis de regresión simple $y=a+bx$, siendo el método *FAO56PM* la variable dependiente y, los restantes métodos la variable independiente x, a la ordenada en el origen y b la pendiente de regresión.

Tabla 1. Coordenadas geográficas (latitud y longitud), elevación sobre el nivel del mar y período analizado de las tres estaciones meteorológicas.

Estación	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Elevación (m)	Período
Zaragoza	41.7192	0.8197 W	225	1994-2001
Ejea	42.1703	1.2139 W	380	1999-2001
Tamarite	41.7800	0.3733 E	218	1997-2001

3. RESULTADOS

La Tabla 2 lista los resultados del análisis de regresión obtenidos con las estimas diarias. Los coeficientes de determinación (R^2) fueron bastante elevados, superiores a 0.95, en las tres localidades, en el caso de los métodos que más variables meteorológicas (temperatura y humedad relativa del aire, radiación solar y velocidad de viento) emplean en el cálculo: *1996-Kpen*, *1948-Pen*, *FAO24-Pn*, *FAO24-Rd* y *FAO24-BC*. Los otros dos métodos, *1985-Harg* (que sólo requiere temperatura del aire) y *Prs-Tylr* (que no requiere velocidad del viento), presentaron unos R^2 menores de 0.94, excepto en Tamarite.

Tabla 2. Análisis de regresión simple entre las estimas diarias de ET_0 obtenidas con el método *FAO56PM* y las obtenidas con otros métodos. R^2, coeficiente de determinación; a, ordenada en el origen; b, pendiente de regresión.

Método	Zaragoza			Ejea			Tamarite		
	R^2	$a^{(1)}$	b	R^2	$a^{(1)}$	b	R^2	$a^{(1)}$	b
1996-Kpen	0.962	0.419^a	0.829^c	0.961	0.300^a	0.835^c	0.978	0.230^a	0.879^c
1948-Pen	0.988	0.071^a	0.901^c	0.988	0.059^a	0.890^c	0.997	-0.029^a	0.909^c
FAO24-Pn	0.986	0.357^a	0.712^c	0.984	0.332^a	0.705^c	0.996	0.190^a	0.753^c
FAO24-Rd	0.959	0.286^a	0.786^c	0.962	0.199^a	0.770^c	0.966	0.201^a	0.753^c
FAO24-BC	0.976	0.342^a	0.760^c	0.982	0.322^a	0.764^c	0.978	0.317^a	0.730^c
1985-Harg	0.827	0.131^a	0.937^c	0.889	0.010^b	0.959^c	0.932	-0.314^a	0.912^c
Prs-Tylr	0.907	0.632^a	0.975^c	0.936	0.547^a	0.910^c	0.961	0.313^a	0.941^c

$^{(1)}$ mm día^{-1}; ^{a} significativamente diferente de 0; ^{b} no significativamente diferente de 0; ^{c} significativamente diferente de 1 ($\alpha = 0.95$).

No obstante, las ordenadas en el origen y las pendientes de regresión indican que en las tres localidades, los cinco métodos citados en primer lugar sobrestimaron significativamente la ET_0, particularmente el método *FAO24-Pn*, excepto para

valores muy bajos en que la infraestimaron. Este comportamiento ya había sido observado por otros autores, sobre todo en el caso del método *FAO24-Pn* (Allen et al., 1994). Las estimas del método *1948-Pen* fueron las más parecidas a los valores diarios de ET_0 del método *FAO56PM*. Así, la raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RMSE*) obtenida con el método *1948-Pen* fue la más baja de todos los métodos evaluados, en las tres localidades, y varió entre 0.37 y 0.46 mm día^{-1}.

El método *Prs-Tylr* infraestimó apreciablemente la ET_0 en Zaragoza y Ejea, mientras que en Tamarite sus estimas, globalmente, ni infraestimaron ni sobrestimaron. El método *1985-Harg* no infraestimó ni sobrestimó la ET_0 diaria en Zaragoza y Ejea pero sí en Tamarite. No obstante, la dispersión de las estimas de estos dos métodos fue relativamente importante (valores de R^2 entre 0.83 y 0.96 Tabla 2) lo que indica que ambos métodos tienen gran incertidumbre y no parecen adecuados para estimar la ET_0 diaria. Por tanto, si se dispone de todas las variables meteorológicas pertinentes, lo más adecuado para estimar la ET_0 diaria es utilizar directamente el método *FAO56PM*. Aunque la precisión del método *1948-Pen* fue similar, este método requiere el mismo número de variables por lo no parece justificado recomendar su uso.

La Tabla 3 lista los resultados del análisis de regresión para las estimas mensuales. Como se esperaba, los R^2 aumentaron y superaron 0.97 en todos los casos. La dispersión de todos los métodos fue bastante similar (Figuras 1 a 3). En términos de ordenada en el origen y pendiente de regresión, los resultados fueron similares a los obtenidos con las estimas diarias: los métodos *1996-Kpen*, *FAO24-Pn*, *FAO24-Rd* y *FAO24-BC* sobrestimaron significativamente la ET_0, mientras que el método *1948-Pen* también la sobrestimó aunque bastante menos. El método *1985-Harg* no infaestimó ni sobrestimó la ET_0 en Zaragoza y Ejea, su dispersión fue similar a la de los restantes métodos y, en estas dos localidades, fue el mejor a escala mensual, con los más bajos valores de *RMSE* (0.27-0.32 mm día^{-1}). En Tamarite, sin embargo, este método sobrestimó la ET_0. El método *Prs-Tylr* infraestimó la ET_0 en Zaragoza y Ejea pero no en Tamarite donde fue el mejor método (*RMSE* = 0.26 mm día^{-1}).

Tabla 3. Análisis de regresión simple entre las estimas mensuales de ET_0 obtenidas con el método *FAO56PM* y las obtenidas con otros métodos. R^2, coeficiente de determinación; *a*, ordenada en el origen; *b*, pendiente de regresión.

Método	Zaragoza			Ejea			Tamarite		
	R^2	$a^{(1)}$	*b*	R^2	$a^{(1)}$	*b*	R^2	$a^{(1)}$	*b*
1996-Kpen	0.987	0.413^a	0.830^c	0.993	0.290^a	0.839^c	0.995	0.227^a	0.880^c
1948-Pen	0.998	0.071^a	0.901^c	0.998	0.083^a	0.883^c	1.000	-0.015^b	0.905^c
FAO24-Pn	0.997	0.313^a	0.723^c	0.996	0.296^a	0.714^c	0.999	0.174^a	0.757^c
FAO24-Rd	0.993	0.189^a	0.812^c	0.997	0.088^a	0.801^c	0.998	0.089^a	0.788^c
FAO24-BC	0.991	0.325^a	0.765^c	0.993	0.279^a	0.777^c	0.990	0.285^a	0.740^c
1985-Harg	0.973	-0.019^b	0.984^d	0.983	-0.047^b	0.978^d	0.990	-0.363^a	0.928^c
Prs-Tylr	0.971	0.673^a	0.960^c	0.989	0.590^a	0.895^c	0.992	0.317^a	0.941^c

$^{(1)}$ mm día^{-1}; ^{a} significativamente diferente de 0; ^{b} no significativamente diferente de 0; ^{c} significativamente diferente de 1; ^{d} no significativamente diferente de 1 ($\alpha = 0.95$).

El cociente entre las estimas mensuales de ET_0 del método *1985-Harg* y las del método *FAO56PM* disminuyó con el aumento de la velocidad de viento y se hizo menor de 1 para velocidades superiores a 2.5-3.0 m s^{-1} (Martínez Cob y Tejero,

2002). En Zaragoza y Ejea se superaron dichas velocidades de viento y, por ello, en conjunto no hubo ni infraestimación ni sobrestimación. En Tamarite no se superaron velocidades medias mensuales de 2.0 m s^{-1} por lo que el método *1985-Harg* sobrestimó la ET_0 mensual. En el método *Prs-Tylr*, el cálculo de la ET_0 no incluyó el término aerodinámico presente en las diversas versiones de la ecuación de Penman. Por ello, en localidades con viento, dicho método infraestimó la ET_0 mensual pero en localidades sin viento la estimó bastante bien. A escala mensual, se sugiere el método *1985-Harg*, con la correspondiente calibración en zonas con escasa velocidad de viento, para estimar la ET_0 mensual pues sólo precisa datos de temperatura del aire.

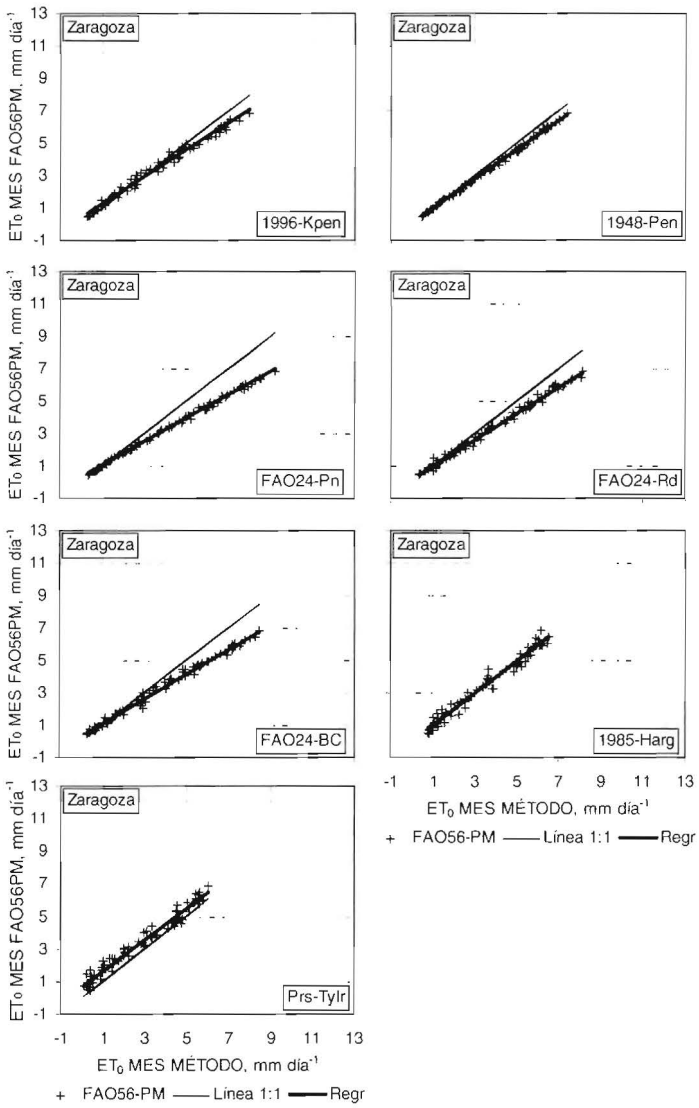


Figura 1. Comparación gráfica entre las estimas mensuales de ET_0 obtenidas con el método *FAO56PM* y las obtenidas con el resto de métodos en Zaragoza.

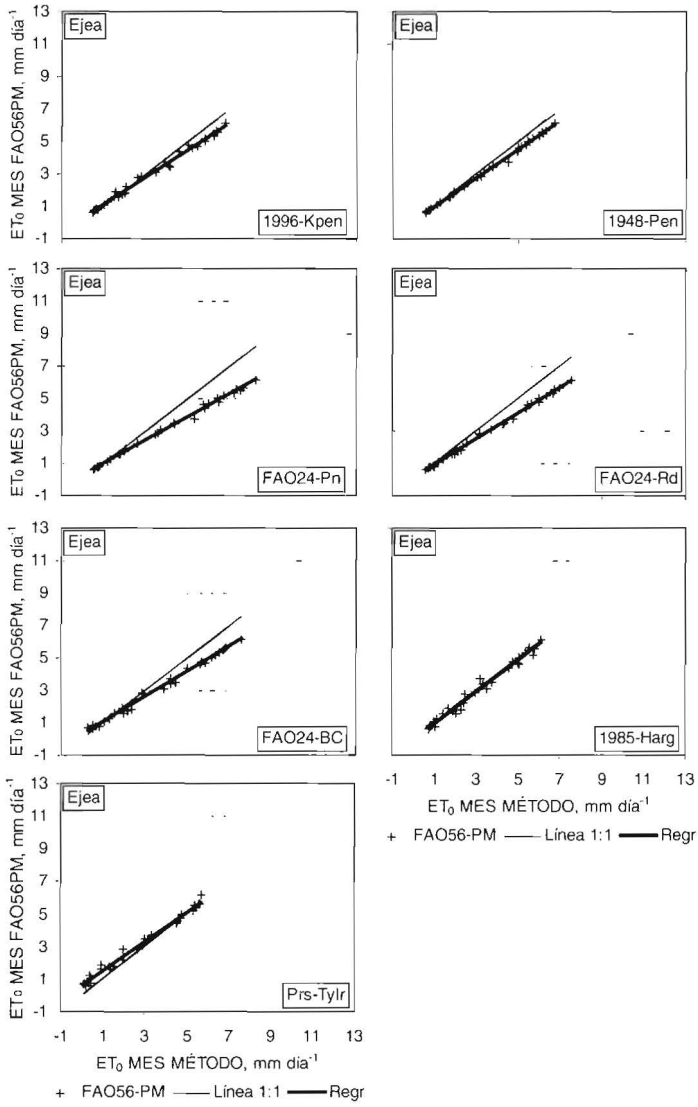


Figura 2. Comparación gráfica entre las estimas mensuales de ET_0 obtenidas con el método *FAO56PM* y las obtenidas con el resto de métodos en Ejea.

4. CONCLUSIONES

A escala diaria, el método que estimó mejor la ET_0 en las tres localidades estudiadas fue el de *1948-Pen* aunque sobrestimó algo esta variable para valores altos. El método *1985-Harg* no sobrestimó ni infraestimó globalmente la ET_0 diaria en Zaragoza y Ejea pero sí en Tamarite; en todos los casos la gran dispersión observada no permite apoyar a este método como adecuado para estimar la ET_0. El método *Prs-Tylr* infraestimó la ET_0 diaria en Zaragoza y Ejea pero no en Tamarite. Pero su dispersión también fue importante. Los peores métodos fueron los de *FAO24-Pn*, *FAO24-Rd* y *FAO24-BC* que sobrestimaron apreciablemente la ET_0

diaria. Los requerimientos de variables meteorológicas de los distintos métodos sugiere que a escala diaria lo mejor es estimar la ET_0 con el método *FAO56PM*. A escala mensual, el método *1985-Harg* fue el más preciso en Zaragoza y Ejea pero no en Tamarite; en esta localidad, el método *Prs-Tylr* fue el más preciso. Las distintas condiciones de viento fueron la principal causa de estas diferencias entre localidades. A escala mensual, se sugiere el método *1985-Harg* para estimar la ET_0, con la correspondiente calibración en zonas con escaso viento.

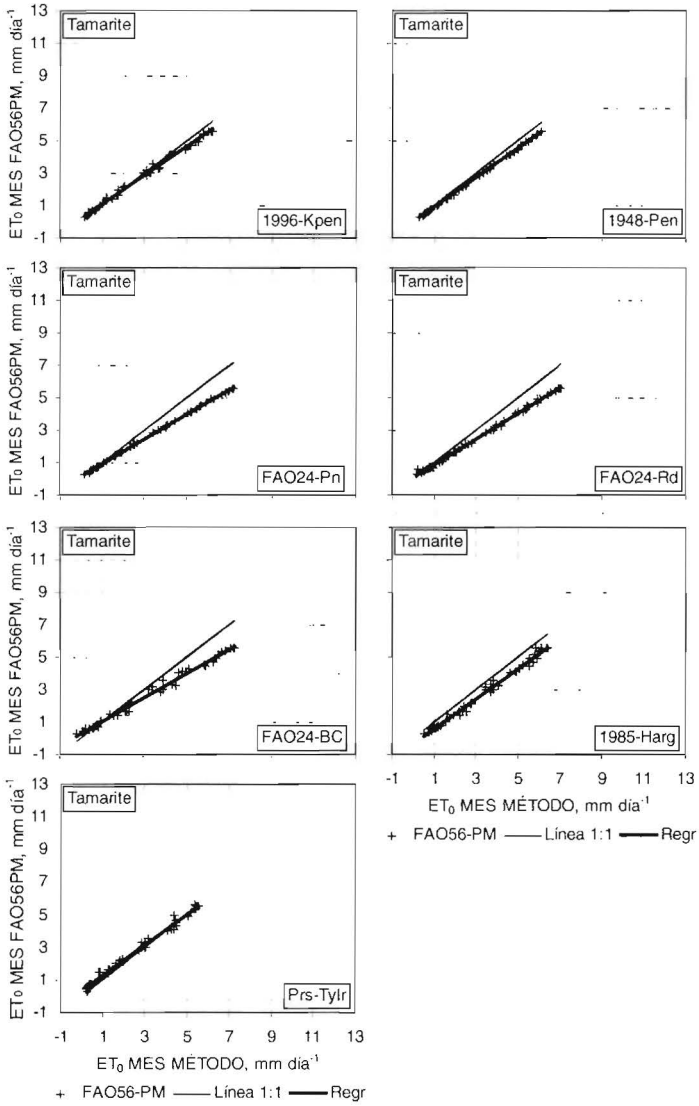


Figura 3. Comparación gráfica entre las estimas mensuales de ET_0 obtenidas con el método *FAO56PM* y las obtenidas con el resto de métodos en Tamarite.

REFERENCIAS

Allen R.G., Smith M., Perrier A., Pereira L.S. 1994. An update for the definition of reference evapotranspiration. ICID Bulletin. 43 (2): 1-34.

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56. FAO, Roma, Italia. 300 pp.

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, 12-14 junio. 67-68. Confederación Hidrográfica del Ebro, Zaragoza.

Gavilán P., Berengena J. 2000. Comportamiento de los métodos Penman-FAO y Penman-Monteith-FAO en el valle medio del Guadalquivir. XVIII Congreso Nacional de Riegos. Huelva, 20-22 de junio. 21-22. Dirección General de Investigación y Formación Agraria, Junta de Andalucía, Sevilla.

Jensen M.E., Burman R.D., Allen R.C. (eds.). 1990. Evapotranspiration and irrigation requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No 70. American Society of Civil Engineers (ASCE), Nueva York, EE.UU. 332 pp.

Lecina S., Martínez Cob A. 2000. Evaluación lisimétrica de la evapotranspiración de referencia semihoraria calculada con el método FAO Penman-Monteith. XVIII Congreso Nacional de Riegos. Huelva, 20-22 de junio. 37-38. Dirección General de Investigación y Formación Agraria, Junta de Andalucía, Sevilla.

Martínez Cob A., Tejero M. 2002. Calibración regional de la ecuación de Hargreaves en zonas semiáridas. XX Congreso Nacional de Riegos. Ciudad Real, 12-14 junio. Ciudad Real. Asociación Española de Riegos y Drenajes.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por los proyectos *HID96-1295-C04-04* (Programa Nacional de Recursos Hídricos) y 2FD97-0547-C02-01 (Programa FEDER). Gracias a la Confederación Hidrográfica del Ebro por su permiso para ubicar una estación meteorológica en su finca La Melusa, en Tamarite de Litera (Huesca); a Francisco Mateo, Juan Manuel Sanmartín y a José Antonio Cambra por el mantenimiento de la estación de Tamarite; a la Comunidad V de Regantes de Bardenas (Ejea de los Caballeros, Zaragoza) por su ayuda en la ubicación y mantenimiento de la estación de Ejea; a Miguel Izquierdo, Jesús Gaudó y Enrique Mayoral por su ayuda en la instalación de las tres estaciones meteorológicas y el mantenimiento de la estación de Zaragoza; y, finalmente, a Enrique Torrente y Félix Padilla por su ayuda en la configuración de la recopilación de datos mediante telefonía móvil.