

Estimación de la evapotranspiración de referencia a partir de tanque «A» en el noroeste del Uruguay

Otero Alvaro¹, Goñi Carmen¹, Castaño José Pedro²

¹Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. INIA-Salto Grande. Casilla de Correo 68033. Salto. Uruguay. Correo electrónico: aotero@sg.inia.org.uy

²Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Grupo Agroclima y Sistemas de información. Ruta 48 km 10. Rincón del Colorado. Las Piedras. Uruguay.

Recibido: 28/6/11 Aceptado: 14/9/11

Resumen

El manejo eficiente del agua en la agricultura requiere de una precisa estimación de la evapotranspiración de los cultivos. La dificultad de obtener registros de todas las variables necesarias para la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) por el modelo propuesto por Penman-Monteith-FAO56 (Allen *et al.*, 1998), lleva al uso de métodos alternativos, como lo es el tanque de evaporación clase «A» (E_o); el cual requiere de calibraciones regionales para su correcta aplicación. En el presente trabajo se comparan cuatro procedimientos de estimación del coeficiente de ajuste (K_p) de la E_o respecto a ET_o: i) el propuesto por Snyder (1992), ii) el propuesto por Allen *et al.* (1998), iii) el propuesto por Puppo y García Petillo (2009) y iv) el K_p combinado obtenido de la regresión de la E_o respecto a ET_o en la región bajo estudio. Los valores del coeficiente de regresión de E_o respecto a ET_o cambia levemente de acuerdo al intervalo promedio utilizado, siendo de 0,77; 0,75 y 0,73 para el intervalo mensual, decádico (10 días) y semanal. El error de estimación disminuye a medida que promediamos intervalos mayores. El procedimiento i) sobrestima considerablemente los valores de ET_o, mientras que el ii) los subestima a ambos con errores absolutos medios de 0,49 y 0,86 mm respectivamente, mientras que con el iii) el error absoluto medio es de 0,32 y con el iv) es de 0,37 mm. Tanto el método iii), como el iv) con valores constantes de K_p demuestran tener mejor desempeño en la región del noroeste del Uruguay.

Palabras clave: Método de Penman-Monteith, necesidades de riego, evaporación, programación de riego

Summary

Reference Evapotranspiration Estimation from Class «A» Pan in the Northwest of Uruguay

Efficient water management in agriculture requires accurate estimation of the evapotranspiration. The difficulty in obtaining records of all the variables needed to estimate reference evapotranspiration (ET_o) by the model proposed by Penman-Monteith-FAO56 (Allen *et al.*, 1998), leads to the use of alternative methods, such as pan evaporation class «A» (E_o), which requires regional calibrations for successful implementation. This paper compares four methods for estimating the adjustment coefficient (K_p) of E_o over ET_o: i) the procedure proposed by Snyder (1992); ii) by Allen *et al.* (1998); iii) by Puppo and García Petillo (2009); and iv) the K_p-combined obtained through the regression coefficient of E_o to ET_o for the region under study. The regression coefficient values of E_o over ET_o change slightly according to the average interval used, being 0.77, 0.75 and 0.73 for the monthly interval, decadic (10 days) and weekly. The estimation error decreases as we average at longer intervals. The procedure i) significantly overestimated ET_o, while ii) underestimated both, with a mean absolute error of 0.49 and 0.86 mm respectively, while in iii) is 0.32 and the iv) is 0.37 mm. Procedures iii) and iv) with constant values of K_p had the best performance for the northwestern region of Uruguay.

Key words: Penman-Monteith method, crop water requirements, evaporation, irrigation schedule

Introducción

La estimación de las necesidades de agua de los cultivos es una información necesaria no solo para el correcto diseño del sistema de riego sino también para la planificación y uso del mismo (Pereira *et al.*, 1995). El requerimiento de agua de un cultivo es estimado -entre otros métodos- en relación a la evapotranspiración de referencia (ET_o) de una superficie del suelo con una cubierta estandarizada de vegetación. La evapotranspiración de referencia ajustada por distintos coeficientes de cultivo (K_c) estima la evapotranspiración para un cultivo dado y en especial para cada estado de desarrollo del mismo (Doorembos y Pruitt, 1977).

Varias ecuaciones se han utilizado para estimar la evapotranspiración de referencia. El modelo universalmente más aceptado es el propuesto por Penman-Monteith-FAO56 (Allen *et al.*, 1998). Este modelo requiere, para su correcta aplicación, de datos climáticos que habitualmente no están fácilmente disponibles o no son registrados en forma sistemática en cada localidad. Las variables meteorológicas mínimas requeridas para su cálculo en una determinada zona son: temperatura máxima (T_{máx}), temperatura mínima (T_{mín}), humedad relativa media y mínima (HR %) del aire, velocidad del viento a 2 m de altura (u₂) y radiación neta (R_n). Esta última puede ser estimada a través de la radiación solar incidente, (R_s), o a través del número de horas diarias de insolación.

Por otro lado, el tanque de evaporación clase «A» es un método alternativo para estimar la evapotranspiración, de bajo costo y de mayor difusión dentro de muchos predios de producción (Doorembos y Pruitt, 1975). Los valores resultantes de la evaporación del tanque clase «A» están altamente influenciados por las características de instalación y las condiciones atmosféricas locales, como ser: la distancia con cubierta verde a su alrededor, el viento sobre la superficie del mismo, la humedad relativa del aire, la radiación solar, etc. (Doorembos y Pruitt, 1977). Dado que la evaporación del tanque responde a la demanda atmosférica sin los mecanismos de resistencias que presentan los cultivos se han propuesto coeficientes de ajuste del registro acumulado o diario de evaporación del tanque que concuerdan satisfactoriamente con los modelos de estimación de la ET_o, habitualmente llamados coeficientes de tanque (K_p) (Allen *et al.*, 1998).

El coeficiente K_p puede ser calculado a través de formulas empíricas (Cuenca, 1989; Snyder, 1992; Allen *et al.*, 1998; Pereira *et al.*, 1995) utilizando datos diarios de humedad relativa del aire, velocidad del viento y distancia a la vegetación, pero con la desventaja que estos datos mu-

chas veces no pueden ser obtenidos en todas las localidades. Por otro lado, el coeficiente de tanque K_p, puede ser calculado en forma fija a través de regresiones entre los valores de evaporación del tanque clase «A» (E_o) y los valores de evapotranspiración calculados de ET_o (Doorembos y Pruitt, 1975, 1977), o por el cociente entre ET_o y E_o calibrado para cada mes del año como propone Puppo y García Petillo (2009) pero limitando su uso a un área de influencia climática regional.

Es el propósito de esta comunicación determinar el mejor método de cálculo de K_p a los efectos de estimar la ET_o a través de registros de evaporación de tanque «A», para región del litoral noroeste del Uruguay, a través de los promedios diarios mensuales, decádicos (10 días) y semanales.

Metodología

Se utilizaron los registros de la estación agroclimatológica de la estación experimental INIA-Salto Grande, localizada con latitud -31° 16' 20,2" y longitud -57° 53' 25,7". Para los cálculos se tomaron los datos diarios de temperatura del aire, máxima y mínima, humedad relativa media y mínima del aire, velocidad del viento a 2 m de altura, pluviometría y radiación total incidente del período 1984-2011. Se utilizaron también los registros diarios de evaporación del tanque evaporímetro clase «A» del período 1984-2011. La radiación total incidente (R_s) diaria fue medida durante el período 1984 a 1996 con un piranómetro esférico Gum-Bellani y en el período 1996 a 2011 con un piranómetro Licor (LI-200SA, USA).

Se utilizó el modelo propuesto por Penman-Monteith-FAO56 (Allen *et al.*, 1998) para la estimación diaria de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), utilizando los procedimientos del software Ref-Et, versión 2.0 para su cálculo.

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

Donde:

- ET_o - evapotranspiración del cultivo de referencia [mm día⁻¹],
- R_n - radiación neta en la superficie del cultivo [MJ m⁻² día⁻¹],
- G - flujo de calor sensible [MJ m⁻² día⁻¹],
- T - temperatura media diaria del aire a 2 m de altura [°C],
- u₂ - velocidad del viento a 2 m de altura [m s⁻¹],
- e_s - presión de vapor a saturación del aire [kPa],
- e_a - presión de vapor real del aire [kPa],
- e_s - e_a - déficit de presión de vapor [kPa],
- Δ - pendiente de la curva de presión de vapor a saturación y temperatura [kPa °C⁻¹],
- γ - constante psicrométrica del aire [0.0642 kPa °C⁻¹].

La radiación neta sobre la superficie del cultivo (R_n) diaria fue estimada a partir de la radiación total incidente (R_s) diaria según el procedimiento sugerido por Allen (2001).

Se compararon cuatro métodos distintos de cálculo del coeficiente K_p :

- Snyder (1992):

$$K_p = 0,482 + 0,024 \ln(\text{distancia}) - 0,000376 u_2 + 0,0045 \text{HR media}$$

Donde:

u_2 - velocidad del viento a 2 m de altura [$\text{km } 24\text{h}^{-1}$],
 HRmedia - humedad relativa media diaria [%],
 distancia - distancia libre en la dirección del viento [m].

- Allen *et al.* (1998):

$$K_p = 0,108 - 0,028 u_2 + 0,0422 \ln(\text{distancia}) + 0,1434 \ln(\text{HR media}) - 0,000631 [\ln(\text{distancia})]^2 \ln(\text{HR media})$$

Donde:

u_2 - velocidad del viento a 2 m de altura [m s^{-1}],
 HRmedia - humedad relativa media diaria [%],
 distancia - distancia libre en la dirección del viento [m].

- K_p Calibrado (Puppo y García Petillo 2009) para cada mes del año:

$$K_p = E_{To_i} / E_{o_i}$$

Donde:

E_{To_i} - evapotranspiración media mensual del cultivo de referencia [mm día^{-1}] del mes i ,

E_{o_i} - tanque de evaporación media mensual clase «A» [mm día^{-1}], del mes i .

- K_p Combinado. Obtenido de la pendiente de la regresión lineal entre la E_{To} media mensual del mes i y el registro de evaporación medio mensual del tanque «A» del mes i , del período 1985-2006.

Los procedimientos de Snyder (1992) y Allen *et al.* (1998) no requieren de calibración previa, ya que para el cálculo de K_p se utilizan los valores medios mensuales de velocidad del viento a 2 m de altura, de la humedad relativa media mensual del aire y la distancia (500 m) con cubierta verde en la dirección del viento, de la propia serie de datos a verificar. Por otro lado, en el procedimiento de cálculo del K_p Calibrado (Puppo y García Petillo, 2009), se utiliza en

nombre ' K_p Calibrado' propuesto por sus autores para hacer referencia a la obtención de un K_p ajustado mensualmente y obtenido previamente al análisis de la serie de verificación, a partir de los registros históricos regionales. Para este último análisis, se utilizaron los registros medios mensuales del tanque de evaporación clase «A» (mm día^{-1}) y la evapotranspiración media mensual del cultivo de referencia (E_{To}) (mm día^{-1}). Para el K_p Combinado se tomó, como único valor, la pendiente de la regresión simple entre la evaporación media mensual del tanque clase «A» (mm día^{-1}) y la evapotranspiración media mensual del cultivo de referencia (mm día^{-1}) en cada uno de los meses de la serie histórica regional. También se estimó la pendiente de la regresión simple entre la evaporación media del tanque clase «A» (mm día^{-1}) y la evapotranspiración de referencia media (mm día^{-1}) cada 10 días y semanales de la serie histórica regional. Para el cálculo del K_p Calibrado como para el K_p Combinado, se utilizaron los registros meteorológicos diarios de la serie 1985 a 2006.

Para la comparación de los métodos, se utilizó como serie de verificación independiente los registros diarios de seis años, elegidos al azar, de la misma estación meteorológica: 1984 y 2007 a 2011. De esta nueva serie de datos meteorológicos se obtuvieron los valores reales medios mensuales de E_{To} y E_{o_i} , a partir de las principales variables meteorológicas, los K_p medios mensuales calculados por los métodos de Snyder (1992) y Allen *et al.* (1998). Con los valores medios mensuales de E_{o_i} de la serie independiente de registros y con los K_p calculados por los métodos (1), (2), (3) y (4) se estimaron los nuevos valores de E_{To} .

Se siguió el criterio de Willmott *et al.* (1985) para la comparación de los modelos a través de:

Error Absoluto Medio (EAM)

$$1/n \sum_{i=1} |O_i - E_i|$$

Donde:

O_i - valor observado de E_{To} (evapotranspiración del cultivo de referencia) del registro i ,

E_i - valor estimado de E_{To} a través de los métodos de cálculo de K_p para el registro i ,

n - número de i observaciones,

Error Absoluto Máximo (EMAX)

$$\text{MAX} (|O_i - E_i|)_{i=1}^n$$

Donde:

O_i - valor observado de ETo (evapotranspiración de cultivo de referencia) del registro i ,

E_i - valor estimado de ETo a través de los métodos de cálculo de Kp para el registro i ,

n - número de i observaciones,

Coefficiente de Concordancia (D)

$$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - X| + |O_i - X|)^2}$$

Donde:

O_i - valor observado de ETo (evapotranspiración del cultivo de referencia) del registro i ,

E_i - valor estimado de ETo a través de los métodos de cálculo de Kp para el registro i ,

n - número de i observaciones,

X - media de los valores observados de ETo, en n observaciones.

Para el ajuste de las regresiones lineales, así como los demás cálculos se utilizaron los procedimientos estadísticos habituales de Proc Reg y Univariate del SAS (SAS Inst. Inc. Carv, N.C.).

Resultados y discusión

La evaporación promedio mensual (mm día⁻¹) del tanque «A» registrada durante el periodo 1985-2007 fue superior en cada uno de los doce meses del año a la evapotranspiración de referencia promedio mensual (mm día⁻¹) en el mismo periodo (Figura 1). Los valores estimados de ETo (mm día⁻¹) fueron entre un 26% y un 23% inferiores a los valores registrados de la evaporación de tanque «A» (mm día⁻¹). Otra característica observada para las condiciones meteorológicas de la región del litoral noroeste es que los valores promedio mensuales de ETo y Eo de cada año no presentan una distribución de frecuencia normal en

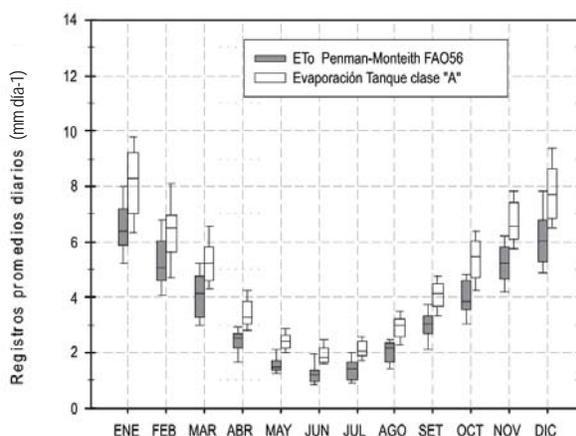


Figura 1. Valores promedio diarios (mm día⁻¹) de ETo y tanque «A» para el periodo 1984-2007 de la Estación INIA-Salto Grande. La línea horizontal dentro del rectángulo mensual representa la mediana para cada mes y el extremo inferior y superior de la caja corresponden al percentil 25 y 75 respectivamente. Los segmentos de línea horizontal inferior y superior corresponden al valor mínimo y máximo respectivamente.

todos los meses, de acuerdo al test de normalidad de Shapiro-Wilk (Cuadro 1). Por esta razón, y para no violar algunos de los supuestos de normalidad asumidos cuando se comparan medias que supuestamente siguen una distribución normal, se prefirió utilizar el criterio propuesto por Willmott *et al.* (1985) en la comparación de los valores observados y los estimados a través de los cuatro métodos de cálculo de Kp. A diferencia de lo que ocurre con los valores de evaporación del tanque «A», los valores de ETo suelen tener más meses de registros medios con distribución normal, solo un mes de los 12 del año no satisface los requerimientos de normalidad de sus registros promedio mensuales (mes de junio) (Cuadro 1).

Los coeficientes Kp calibrados promedio para cada mes (Puppo y García Petillo, 2009) variaron entre los meses (Cuadro 2). En los meses de invierno, los valores prome-

Cuadro 1. Probabilidad de aceptación-rechazo de la H_0 de valores con distribución normal, para los registros diarios medios (mm día⁻¹) para cada mes de ETo y tanque «A», estadístico W de Shapiro-Wilk ($p < W$) en el periodo 1985-2006.

	p<W	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
ETo		0,915	0,256	0,54	0,549	0,626	0,015	0,389	0,175	0,762	0,5	0,765	0,202
Tanque "A"		0,392	0,052	0,834	0,033	0,626	0,02	0,019	0,022	0,24	0,351	0,043	0,879

dio del Kp-calibrados fueron menores que los Kp de los meses con mayor ETo. Por otro lado, los valores mensuales de Kp-calibrados para la zona sur del país (Puppo y García Petillo, 2009) son ligeramente inferiores a los calculados para el área del litoral noroeste (Cuadro 2) posiblemente debido a diferencias meteorológicas locales.

Cuadro 2. Coeficientes de tanque (Kp, calibrados) mensuales para la Estación Experimental INIA Salto Grande, del período 1985-2006.

Mes	Kp-Calibrado
Enero	0,75
Febrero	0,75
Marzo	0,76
Abril	0,71
Mayo	0,66
Junio	0,67
Julio	0,69
Agosto	0,67
Septiembre	0,74
Octubre	0,75
Noviembre	0,76
Diciembre	0,78

Para calcular la lámina de reposición de agua en un cultivo, muchas veces se emplea un intervalo de tiempo diario, semanal o incluso cada 10 días (Smith *et al.*, 1996). El registro promedio diario (mm día^{-1}) de evaporación del tanque «A» en intervalos de tiempo mensuales, decádicos y semanales fueron buenos estimadores de la evapotranspiración de referencia (ETo) calculada a través del modelo propuesto por Penman-Monteith-FAO56 (Allen *et al.*, 1998) (Cuadro 3), lo que coincide con observaciones similares realizadas por Sentelhas y Folegatti (2003) para la zona de Piracicaba (San Pablo, Brasil). Dentro del período de evaluación, los coeficientes de regresión entre las dos variables en los tres intervalos estudiados fueron altamente significativas ($p < 0,001$). Se determinó el r^2 como indicador de la precisión de los valores estimados, siendo de 0,94 para los valores acumulados mensualmente, de 0,92 para los valores decádicos y de 0,90 para los valores semanales (Cuadro 3). La dispersión de los pares de registros entre la ETo y el tanque «A» es mayor a medida que reducimos en intervalo de cálculo, de tal forma que la raíz del error medio estimado en ambas variables es mayor con intervalos se-

manales, que con intervalos decádicos y menor aún con intervalos mensuales.

El error medio estimado de la regresión (Cuadro 3) es relativamente bajo en cualquiera de los tres períodos calculados, lo que permitiría estimar la ETo dentro de límites de confianza muy aceptables desde el punto de vista agronómico, cuando no se tienen valores suficientes de variables meteorológicas para que se pueda usar directamente el modelo Penman-Monteith y ésta deba de ser estimada a través de la evaporación del tanque «A».

Los valores esperados de la estimación de la ETo a través del método de Snyder (1992) fueron consistente y ligeramente superiores a los valores de ETo calculados directamente a través del modelo propuesto PM-FAO56 (Allen *et al.*, 1998) en todas las situaciones analizadas, lo que concuerda con Braga *et al.* (2008) y con Esteves *et al.* (2010) (Cuadro 4). En comparación con los otros métodos, el método propuesto por Snyder (1992), que fuera originalmente desarrollado para áreas semiáridas (Snyder *et al.*, 2005) tiene valores intermedios de concordancia y los errores absolutos medios están en el orden de $0,49 \text{ mm día}^{-1}$ y que expresado en relación a la media observada de ETo en la población de control es de un 14%.

Por otro lado, el método propuesto por Allen *et al.* (1998) fue el que mostró peor desempeño de los cuatro métodos estudiados, evidenciado a través del mayor error absoluto medio y menor concordancia entre los valores estimados y los observados. Ambos métodos, el de Snyder (1992) y el de Allen *et al.* (1998) toman en cuenta la humedad relativa del aire, la velocidad del viento y la distancia con cubierta verde a barlovento para el ajuste del Kp, pero con relaciones cuantitativas distintas entre ambos, en donde las variaciones regionales de las mismas inciden claramente en el cálculo de Kp (Cuadro 4).

La estimación de la ETo a través de los Kp calibrados para cada mes (Puppo y García Petillo, 2009) o usando el Kp combinado proveniente de la regresión de los valores de ET del tanque «A» con los ETo de PM-FAO56 (Cuadro 3), fueron los mejores métodos de estimación de ETo, lo que coincide con las apreciaciones realizadas por Puppo y García Petillo (2009) para el área sur de Uruguay y por Conceição (2002) para la región noroeste del estado de San Pablo, Brasil. Ya sea a través del análisis combinado de todos los meses del año (Cuadro 4) como del análisis ajustado por mes (Cuadro 5), la estimación de ETo a través del método del Kp-calibrado como propone Puppo y García Petillo (2009) o usando la pendiente de la regresión de los valores de tanque «A» y la ETo (Kp-combinado) tuvie-

Cuadro 3. Estimación de la ETo (mm día⁻¹) a través de valores medios diarios de Tanque «A» (mm día⁻¹) en períodos mensuales, decádicos y semanales, del período 1985-2006.

	Ecuación de Rearesión	RMSE	r ²
Base mensual	ETo = -0,1294 + 0,769 * Tanque "A"	0,51	0,94
Base decádica	ETo= -0,0347 + 0,749 * Tanque "A"	0,63	0,91
Base semanal	ETo = 0,0541 + 0,734 * Tanque "A"	0,69	0,90

RMSE= Error Cuadrático Medio Relativo.

Cuadro 4. Estadísticos de la validación de los procedimientos propuestos de cálculo de Kp con los diferentes métodos. Análisis combinado de todos los meses del año. Período 1984 y 2007-2011.

	ETo		Coeficiente de Concordancia	Error Absoluto Medio	Error Absoluto Máximo
	mm día ⁻¹	R ²			
Snyder, 1992	4,0	0,93	0,97	0,49	1,66
Allen <i>et al.</i> , 1998	2,7	0,94	0,91	0,86	1,99
Kp-Calibrado	3,7	0,94	0,98	0,32	1,32
Kp-Combinado	3,8	0,94	0,98	0,37	1,52
ETo Observado	3,5				

D=Coeficiente de Concordancia; EMA= Error Absoluto Medio; EMAX=Error Absoluto Maximo.

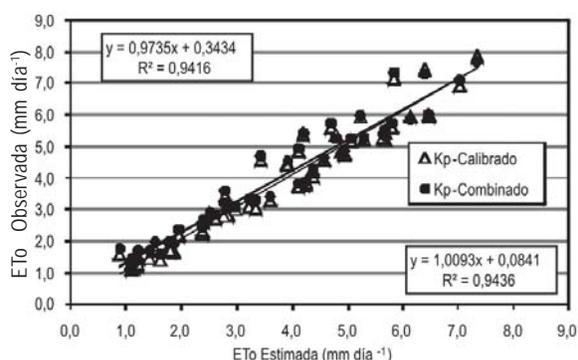


Figura 2. Relaciones entre la ETo estimada por los métodos de Kp-calibrado y de Kp-combinado y la ETo observada (PM-FAO56) para los promedios diarios de los meses estudiados en el período 1984 y 2007-2011 de la Estación INIA-Salto Grande.

ron los mejores coeficientes de concordancia y los menores errores absolutos medios. A pesar de que los valores de r² fueron altos (Cuadro 4 y 5), usando solo este criterio de evaluación no alcanza para hacer una discriminación buena entre estos dos métodos. La relación entre la ETo observada y la ETo estimada por ambos métodos es altamente significativa (p<0,001) y en ambos métodos la pendiente entre ambas variables es muy cercana a una relación 1:1 (Figura 2). En este sentido la estimación a través del cálculo de Kp-calibrado mensualmente parece tener un mejor ajuste que los datos usando el Kp-combinado, pero como vimos anteriormente los errores de estimación absolutos de ambos métodos son relativamente semejantes, para todos los meses a excepción de mayo y junio (Cuadro 5).

Cuadro 5. Estadísticos de la validación de los procedimientos propuestos de cálculo de Kp con los diferentes métodos calculados para cada mes. Período 1984 y 2007-2011.

	PM-FAO56			Snyder, 1992			Allen, 1998			Kp-Calibrado			Kp-Combinado				
	ETo Obs mm día ⁻¹	ETo Est mm día ⁻¹	D	EMA mm día ⁻¹	EMAX mm día ⁻¹	ETo Est mm día ⁻¹	D	EMA mm día ⁻¹	EMAX mm día ⁻¹	ETo Est mm día ⁻¹	D	EMA mm día ⁻¹	EMAX mm día ⁻¹	ETo Est mm día ⁻¹	D	EMA mm día ⁻¹	EMAX mm día ⁻¹
Enero	5,8	6,4	0,45	0,73	1,66	4,6	0,49	1,24	1,90	6,1	0,71	0,60	1,32	6,3	0,66	0,61	1,52
Febrero	5,0	5,4	0,72	0,41	1,25	3,6	0,49	1,40	1,69	4,9	0,85	0,36	0,74	5,1	0,85	0,34	0,84
Marzo	3,9	4,2	0,92	0,30	0,77	2,8	0,66	1,13	1,50	3,9	0,96	0,23	0,42	3,9	0,96	0,23	0,40
Abril	2,8	3,3	0,75	0,43	0,76	2,2	0,69	0,65	0,90	2,8	0,95	0,17	0,30	3,0	0,93	0,21	0,43
Mayo	1,6	2,1	0,54	0,49	0,67	1,3	0,66	0,27	0,40	1,6	0,87	0,12	0,24	1,8	0,69	0,28	0,47
Junio	1,1	1,5	0,21	0,36	0,39	0,9	0,27	0,23	0,25	1,2	0,98	0,01	0,02	1,3	0,37	0,18	0,19
Julio	1,2	1,7	0,35	0,50	1,13	1,1	0,13	0,27	0,53	1,4	0,38	0,25	0,71	1,5	0,39	0,34	0,90
Agosto	2,1	2,5	0,80	0,44	0,69	1,6	0,75	0,44	0,56	2,0	0,97	0,13	0,21	2,3	0,89	0,28	0,47
Septiembre	2,8	3,2	0,63	0,48	1,02	2,1	0,55	0,69	1,17	2,9	0,82	0,27	0,67	3,0	0,77	0,32	0,81
Octubre	3,9	4,4	0,67	0,60	1,58	2,9	0,57	0,95	1,55	4,1	0,80	0,46	1,15	4,2	0,77	0,48	1,28
Noviembre	5,1	5,4	0,72	0,59	1,45	3,8	0,57	1,26	1,99	5,3	0,80	0,57	1,20	5,3	0,80	0,57	1,24
Diciembre	5,9	6,1	0,93	0,40	0,78	4,5	0,67	1,37	1,80	6,3	0,92	0,47	1,04	6,2	0,94	0,44	0,92

ETo Obs=ETo Observado; ETo Est= ETo Estimado; D=Coefficiente de Concordancia; EMA= Error Absoluto Medio; EMAX=Error Absoluto Máximo.

Conclusiones

La estimación de la ETo por medio del ajuste del Kp y de los registros de tanque «A» es una alternativa válida en las condiciones del litoral noroeste del Uruguay. Dos clases de métodos para cálculo del Kp fueron evaluados: i) aquellos que no requieren una calibración previa, ya que usan variables meteorológicas del mismo período del cual se quiere estimar la ETo, como son los métodos propuestos por Snyder (1992) y por Allen *et al.* (1998); y ii) aquellos que requieren de una previa calibración o trabajos en la región para su verificación, como son los métodos propuestos por Puppo y García-Petillo (2009) y el método del Kp-combinado, como es el objetivo del presente trabajo. El método de Snyder (1992) usado para el cálculo del Kp tiende a sobrestimar los valores de ETo, mientras que cuando se usa el método de Allen *et al.* (1998) los valores de ETo son subestimados. Por otro lado, el ajuste mensual de Kp a través de la relación ETo/Eo (Puppo y García Petillo, 2009) tuvo el mejor desempeño, medido a través de su error absoluto medio; así mismo, la utilización de un único valor de Kp-combinado para todos los meses tiene también un excelente desempeño y minimiza los errores absolutos en comparación con los métodos de Snyder (1992) y Allen *et al.* (1998). Más allá de la precisión de los cuatro métodos en el cálculo de Kp para la estimación de ETo, la gran ventaja comparativa del método del Kp-calibrado y del Kp-combinado es que no se requiere de valores adicionales de otras variables meteorológicas, como lo requieren los procedimientos de Snyder (1992) y Allen *et al.* (1998). En este sentido, la estimación de la ETo a través de un único valor (Kp-combinado) podría ser además una alternativa de muy fácil implementación. Proponemos para la región del litoral noroeste de Uruguay el uso de los valores de Kp-calibrados mensualmente o en su defecto los valores de Kp-combinado: mensual (0,77), decádico (0,75) o semanal (0,73).

Bibliografía

- Allen RG. 2001. REF-ET : The reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE standardized equations. Version 2.0 for windows. Idaho : University of Idaho.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome : FAO. 300p. (Irrigation and Drainage ; 56).
- Braga MB, Calgaro M, Moura MSB, Silva TGF. 2008. Coeficientes do tanque classe «A» para estimativa da evapotranspiração de referência na região do Vale do Submédio São Francisco, Estado da Bahia. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 16(1): 49 - 57.

- Conceição MAF. 2002. Reference evapotranspiration based on class A pan evaporation. *Scientia Agricola*, 59(3): 417 - 420.
- Cuenca RH. 1989. Irrigation system design : A engineering approach. New Jersey : Prentice-Hall, Englewood Cliffs. 133p.
- Doorenbos J, Pruitt WO. 1977. Las necesidades de agua de los cultivos. 4a ed. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 144p. (Riego y Drenaje; 24).
- Doorenbos J, Pruitt WO. 1975. Guidelines for predicting crop water requirements. Rome: FAO. 179p. (Irrigation and Drainage; 24).
- Esteves B, Mendoça JC, Sousa EF, Salassier B. 2010. Avaliação de Kt para estimativa da evapotranspiração de referencia (ETo) em Campos dos Goytacazes, RJ. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(3): 274 - 278.
- Pereira AR, Villa Nova N, Pereira AS, Barbieri V. 1995. A model for the class A pan coefficient. *Agricultural Water Management*, 76: 75 - 82.
- Puppo L, Garcia Petillo M. 2009. Estimación de los coeficientes de tanque «A» para calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia en la zona sur del Uruguay. *Agrociencia*, 13(2): 47 - 51.
- Sentelhas PC, Folegatti MV. 2003. Class A pan coefficients (Kp) to estimate daily reference evapotranspiration (ETo). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7(1): 111 - 115.
- Smith M, Pereira LS, Berengena J, Itier B, Goussard J, Ragab R, Tollefson L, van Hoffwegen P. 1996. Irrigation scheduling : From theory to Practice. Roma : FAO. 384p. (Water Report ; 8).
- Snyder RL, Morteza O, Scott M, Grismer M. 2005. Simplified estimation of reference evapotranspiration from Pan evaporation data in California. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(3): 249 - 253.
- Snyder RL. 1992. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 118: 977 - 980.
- Willmott CJ, Ackleson SG, Davis RE, Feddema JJ, Klink KM, Legates DR, O'Donnell J, Rowe CM. 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research Oceans*, (90): 8995 - 9005.