

**Comunicación Breve****Estimación de los coeficientes de tanque «A» para calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia en la zona sur del Uruguay**Puppo, L.<sup>1</sup>; García Petillo, M.<sup>1</sup><sup>1</sup>Grupo Disciplinario de Ingeniería Agrícola, Unidad de Hidrología - Departamento de Suelos y Aguas - Facultad de Agronomía - Avda. E. Garzón 780 - 12900 Montevideo - Uruguay. Correo electrónico: lpuppo@fagro.edu.uy

Recibido: 22/7/09 Aceptado: 9/11/09

**Resumen**

El objetivo del trabajo fue estimar localmente los coeficientes de tanque ( $K_p$ ) para calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia según Penman-Monteith modificado por FAO ( $E_{To}$  PM-FAO). Se utilizó una serie de datos climáticos correspondiente a 34 años (1975-2008) de la Estación Experimental INIA Las Brujas (EELB), representativa de la zona sur del país. Los años pares se usaron para calibrar un  $K_p$  para cada mes y para cada año ( $K_p$ -calibrado) y los años impares se usaron para su validación. Se probaron cuatro métodos de estimación de la  $E_{To}$ , mediante el producto de la evaporación mensual ( $E_o$ ) por distintos coeficientes  $K_p$  ( $E_{To} = E_o \times K_p$ ). Los coeficientes  $K_p$  evaluados fueron:  $K_p$ -FAO;  $K_p$ -Corsi;  $K_p$ -calibrado y  $\overline{K_p}$  calculado como el promedio de los  $K_p$ -calibrados obtenidos en el período octubre-abril. Para evaluar el ajuste de los cuatro métodos se hizo la comparación de los valores de  $E_{To}$  estimados a partir del valor de  $E_o$  mensual de los años impares y sus respectivos  $K_p$  con el método patrón ( $E_{To}$  PM-FAO) para los mismos años, mediante la prueba  $t$  de Student para datos apareados ( $\alpha = 0,05$ ). El uso del  $K_p$  calibrado dio la mejor estimación de la  $E_{To}$  PM-FAO. El  $\overline{K_p}$  obtenido fue 0,71 y su utilización durante toda la estación de riego permitió una buena estimación para la zona sur del país. El empleo de este coeficiente único para corregir el dato de evaporación de tanque es una herramienta simple, fácil de adoptar por los productores y constituye una buena estimación de la  $E_{To}$ .

**Palabras claves:** Penman-Monteith, necesidades de riego, evaporación, programación de riego**Summary****Estimated class «A» pan coefficients to calculate the reference crop evapotranspiration in the south of Uruguay**

The objective was to estimate the local pan coefficients ( $K_p$ ) to calculate the reference crop evapotranspiration according to Penman-Monteith modified by FAO (FAO-PM  $E_{To}$ ). The climatic data used correspond to 34 years (1975-2008) and were taken from the Estación Experimental INIA Las Brujas (EELB), which is representative of the south of the country. Even years were used to calibrate a  $K_p$  for each month and for each year ( $K_p$ -calibrated) and the odd years were used for validation. Four alternative methods were tested to estimate  $E_{To}$ , using the following equation:  $E_{To} = E_o \times K_p$ . Where  $E_o$  corresponds to the monthly pan evaporation. Evaluated  $K_p$  coefficients were:  $K_p$ -FAO;  $K_p$ -Corsi;  $K_p$ -calibrated and  $\overline{K_p}$  calculated as the average of the  $K_p$  calibrated obtained in the period October-April. To evaluate the adjustment of the four methods, the values of the estimated from the monthly  $E_o$  values corresponding to odd years and its  $K_p$  were compared with the standard method (FAO-PM  $E_{To}$ ) for the same years, by the  $t$ -Student test for matched up data ( $\alpha = 0.05$ ). The use of calibrated  $K_p$  gave the best estimation of FAO-PM  $E_{To}$ . The  $\overline{K_p}$  was 0.71 and its use during the irrigation season allowed a good estimation for the south of the

country. The use of this unique coefficient to correct the pan evaporation data is a simple and easy tool to adopt by the farmers, and constitutes a good estimation of the ETo.

**Key words:** Penman-Monteith, irrigation requirements, evaporation, irrigation scheduling

## Introducción

Un método comúnmente utilizado para predecir la evapotranspiración de los cultivos (ETc) es el propuesto por Allen *et al.* (1998) el cual involucra un doble paso de estimación: primeramente se calcula la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) y luego se multiplica por el coeficiente de cultivo (Kc).

Allen *et al.* (1998) sugieren el uso de dos métodos de estimación para la ETo: Penman-Monteith modificado por FAO (PM-FAO) y el método del tanque evaporímetro clase «A».

Como resultado de una Consulta de Expertos realizada en mayo de 1990, el método PM-FAO es ahora considerado el método estándar para la definición y cálculo de la ETo. (Allen *et al.*, 1998) Para aplicar la ecuación de PM-FAO se necesitan las siguientes variables climáticas medidas: temperatura máxima (T<sub>máx</sub>), temperatura mínima (T<sub>mín</sub>), humedad relativa (HR %), velocidad del viento a 2 m de altura (u<sub>2</sub>) y radiación neta (Rn) (ó en su defecto radiación solar incidente, Rs, ó número de horas diarias de insolación, n). Este método ha demostrado predecir correctamente la ETo en un amplio rango de localidades y climas, con tiempos cortos de resolución.

En contraste el método del tanque evaporímetro clase «A» tiene como ventaja su simplicidad, dado que permite medir los efectos integrados del clima en función de una única medida: la evaporación de una superficie libre de agua (Eo). Asimismo su costo de instalación y mantenimiento es bajo. Esto ha determinado que sea un método de uso frecuente en proyectos y programación de riego (Conceição, 2002; Stanhill, 2002; Sentelhas y Folegatti, 2003). Para la instalación y manejo hay que respetar las especificaciones descritas por Strangeways (2001).

La evapotranspiración de un cultivo se produce en respuesta a las mismas variables climáticas que la evaporación desde la superficie del tanque pero existen una serie de factores que tienden a producir diferencias y éstas quedan corregidas al multiplicar la evaporación del tanque «A» por el coeficiente de tanque (Kp).

Allen *et al.* (1998) sugieren la utilización de Kp obtenidos empíricamente, a través de una regresión derivada de la tabla de Doorenbos y Pruitt (1977). Su cálculo

necesita de los promedios mensuales de la HR y de la u<sub>2</sub>, así como de la distancia y características del medio circundante del tanque. Sin embargo estos mismos autores enfatizan en la recomendación de calibrar localmente los Kp en función de la ETo medida con un lisímetro o calculada por el método PM-FAO.

Corsi (1994) calibró los Kp para la Estación Experimental INIA Las Brujas (EELB), mediante la relación de la ETo calculada por el método de Penman con Eo. Estos Kp son los utilizados hasta el momento para corregir los datos de evaporación de tanque «A» de esta estación y para estimar la demanda de riego en la zona horti-frutícola del sur del país. Dado que el método de Penman puede sobreestimar la ETo en determinadas condiciones de demanda atmosférica (Allen *et al.*, 1998) en el presente trabajo se propone calibrar localmente los Kp a partir de la estimación de la ETo realizada por el método PM-FAO. con el fin de conseguir mayor exactitud en la estimación de este parámetro.

## Metodología

Se utilizó una serie de datos climáticos correspondiente a 34 años (1975-2008) de la Estación Experimental INIA Las Brujas (EELB) ubicada en las coordenadas: latitud 34° 40' S, longitud 56° 20' W y altitud 32 m s.n.m., en Rincón del Colorado, departamento de Canelones. La información climática fue proporcionada por una estación meteorológica automática Davis modelo Vantage Pro, emplazada en un predio horti-frutícola de 446 ha.

La ETo se calculó con la ecuación de PM-FAO (Allen *et al.*, 1998) a partir de los valores promedios mensuales de las variables requeridas por la fórmula.

Su fórmula es la siguiente:

$$ETo = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

Donde:

ETo - evapotranspiración del cultivo de referencia (mm mes<sup>-1</sup>)

Rn - radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m<sup>-2</sup> mes<sup>-1</sup>)

- G - calor sensible desde la superficie al interior del suelo (MJ m<sup>-2</sup> mes<sup>-1</sup>)
- T - temperatura media mensual medida a 2 m de altura (°C)
- u<sub>2</sub> - velocidad del viento media mensual medida a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>)
- e<sub>s</sub> - presión de vapor a saturación (KPa)
- e<sub>a</sub> - presión de vapor real del aire (KPa)
- e<sub>s</sub> - e<sub>a</sub> - déficit de presión de vapor (KPa)
- Δ - pendiente de la curva T- Presión de vapor a saturación (KPa °C<sup>-1</sup>)
- γ - cte psicrométrica del aire (KPa °C<sup>-1</sup>)

La radiación solar incidente fue estimada según la relación que indican Allen *et al.* (1998) a partir del número de horas diarias de insolación.

De la serie de 34 años, se usaron 17 (años pares) para calibrar para cada mes y para cada año un coeficiente de tanque (Kp-calibrado) calculado como:

$$Kp = \frac{ETo}{Eo} \quad (2)$$

Donde:

ETo - Evapotranspiración del cultivo de referencia calculada con la ecuación (1) (mm mes<sup>-1</sup>)

Eo - Evaporación del tanque (mm mes<sup>-1</sup>)

Los años impares de la serie se usaron para validar la ETo estimada al utilizar dichos coeficientes.

Dado que en la zona de estudio el riego se utiliza casi exclusivamente entre octubre y abril, se promedió un único Kp para este período (*Kp*).

Se calculó el Kp-FAO (Allen *et al.*, 1998), para cada mes y para cada año, con la siguiente ecuación:

$$Kp = 0.108 - 0.0286u_2 + 0.0422\ln(FET) + 0.1434\ln(HRmedia) - 0.00063[\ln(FET)]^2 \ln(HRmedia) \quad (3)$$

Donde:

FET - distancia de la cubierta verde a barlovento (m)

HR media - humedad relativa media mensual (%)

u<sub>2</sub> - velocidad media mensual del viento (ms<sup>-1</sup>)

La distancia circundante al tanque utilizada en la ecuación (3) se fijó en 1000 m, dada la ubicación de la estación meteorológica en un predio horti-frutícola de extensa superficie. Esta es la máxima distancia prevista para la estimación del Kp tanto en el ajuste de la regresión de Allen *et al.* (1998) como en la tabla de Doorenbos y Pruitt (1977).

Se utilizaron los Kp-Corsi (Corsi, 1994) que se presentan en el Cuadro 1.

Se calculó la ETo por el método del tanque mediante el producto de la Eo mensual de los años impares por los coeficientes: Kp-FAO; Kp-Corsi; Kp-calibrado y *Kp* calculado como el promedio de los Kp-calibrados obtenidos en el período octubre-abril, a los que se nombró método 1, método 2, método 3 y método 4 respectivamente.

Para evaluar el ajuste de los métodos propuestos se hizo la comparación de los valores de ETo obtenidos por los mismos a partir del valor de Eo mensual de los años impares y sus respectivos Kp con el método patrón (ETo PM-FAO) para los mismos años, mediante la prueba t de Student para datos apareados (α= 0,05).

Se hizo la regresión entre la ETo estimada por el método 4 y la calculada por el método patrón (ETo PM-FAO) y se graficaron los errores relativos.

### Resultados y Discusión

Los Kp-calibrados para la EELB (Cuadro 2), utilizados para la estimación de la ETo por el método 3, muestran una marcada estacionalidad, con valores más bajos en el período de mayo a setiembre.

Dado que en el período entre octubre y abril los coeficientes calibrados presentaron diferencias menores al 5 % respecto a su media (Cuadro 2), se promedió un

**Cuadro 1.** Coeficientes de tanque calibrados por Corsi para la Estación Experimental Las Brujas.

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
0,7	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,7

**Cuadro 2.** Coeficientes de tanque (Kp, calibrados) para la Estación Experimental Las Brujas.

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
0,71	0,72	0,71	0,73	0,65	0,62	0,58	0,63	0,65	0,68	0,72	0,71

único coeficiente para esta etapa ( $\overline{Kp}$ ), su valor fue 0,71, el que fue utilizado para la estimación de la ETo por el método 4. Este valor coincide con el coeficiente único calibrado por Sentelhas y Folegatti (2003) para el sur de Brasil. El coeficiente calibrado por estos investigadores fue determinado mediante la relación de la ETo medida en lisímetro con la Eo.

Los cuatro métodos evaluados tuvieron diferente desempeño como estimadores de la ETo PM-FAO.

El método 1 sobrestimó la ETo entre un 13 % y 45 %, en todos los meses del año (Cuadro 3). Sentelhas y Folegatti (2003) también reportaron una sobrestimación, pero sólo del 4 al 12 %, al utilizar el mismo método en la zona de San Pablo, Brasil. López y Dennett (2005) también encontraron que el método sobreestimó la ETo. Estos últimos autores utilizaron el Kp tabulado por Doorenbos y Pruitt (1977), por esta razón parte de la inexactitud del método la atribuyeron al amplio rango previsto en las variables tabuladas. El método 1 evaluado en el presente trabajo es el propuesto por Allen *et al.* (1998).

Cuando se analizó el desempeño del método 1 en el período de riego, octubre-abril, la sobrestimación de la ETo resultó del 18 % en promedio. Esto significaría una sobrestimación en la ETC de 1660 m<sup>3</sup> por cada hectárea de cultivo, si se considera un cultivo horti-frutícola hipotético con Kc máximo igual a 1,1. Esta sobrestimación de los requerimientos hídricos alcanzaría los 30 millones de m<sup>3</sup> si se tienen en cuenta las más de

18000 ha de producción horti-frutícola en la zona sur del país (DIEA-MGAP, 2006). Los meses con mayor valor de ETo (Cuadro 3) diciembre y enero resultaron en una sobrestimación del parámetro del 19 y 18 %, respectivamente. Dado que para la mayoría de los cultivos de la zona el consumo máximo se da en estos 2 meses, los equipos de riego resultarían sobredimensionados en ese mismo porcentaje.

El método 2 no fue un buen estimador del método patrón en la mitad de los meses del año. La ETo resultó sobrestimada en los meses de febrero y noviembre por un 9 y 14 %, respectivamente. Mientras que en los meses de marzo, abril, mayo y agosto fue subestimada entre un 4 y 12 % (Cuadro 3). Si se tiene en cuenta que estos meses son de moderada a baja demanda atmosférica, los resultados no coinciden con Allen *et al.* (1998) quienes expresaron que el método de Penman, utilizado para calibrar los Kp-Corsi, frecuentemente sobrestima la ETo en condiciones de baja demanda atmosférica. El mejor desempeño del método 2 en comparación al método 1 (Cuadro 3) se puede explicar porque los Kp-Corsi fueron calibrados localmente y lograron describir en forma más exacta la influencia de las características locales del clima sobre la ETo. Dado que este método es un buen estimador de la ETo en los meses de máximo consumo (diciembre y enero), su uso no produciría errores en el diseño de los equipos, pero el riego aplicado sería excesivo en los meses de noviembre y febrero.

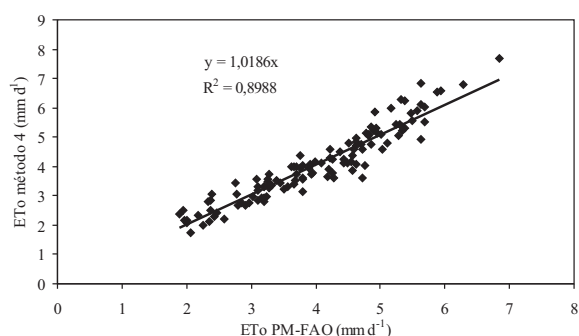
**Cuadro 3.** Comparación de medias (t de Student para datos apareados) de la ETo PM-FAO con la ETo estimada por el método alternativo.

Mes	ETo PM-FAO mm d <sup>-1</sup>	Diferencias de medias (†)				p t <   T   (‡)			
		mét. 1	mét. 2	mét. 3	mét. 4	mét. 1	mét. 2	mét. 3	mét. 4
Ene	5,42	0,96	0,08	0,16	0,16	<0,0001	n.s.	n.s.	n.s.
Feb	4,52	0,59	0,42	-0,07	-0,13	0,0004	0,0056	n.s.	n.s.
Mar	3,48	0,52	-0,13	-0,08	-0,08	<0,0001	0,04448	n.s.	n.s.
Abr	2,28	0,62	-0,22	0,23	0,16	<0,0001	0,0078	0,0136	n.s.
May	1,45	0,28	-0,17	-0,07		0,0161	0,0252	n.s.	
Jun	0,99	0,37	-0,02	0,01		<0,0001	n.s.	n.s.	
Jul	1,00	0,45	0,03	0,002		<0,0001	n.s.	n.s.	
Ago	1,47	0,42	-0,12	-0,05		<0,0001	0,0143	n.s.	
Set	2,20	0,51	0,11	-0,06		<0,0001	n.s.	n.s.	
Oct	3,14	0,62	0,06	-0,04	0,10	<0,0001	n.s.	n.s.	n.s.
Nov	4,21	0,70	0,59	0,12	0,05	<0,0001	<0,0001	n.s.	n.s.
Dic	5,08	0,97	0,13	0,20	0,20	<0,0001	n.s.	n.s.	n.s.

† Media método alternativo - Media PM-FAO.

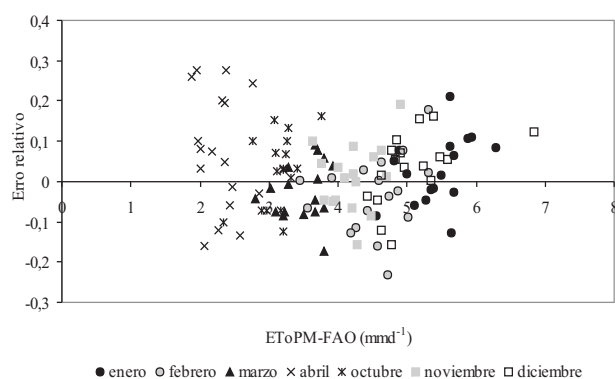
‡ Se consideran diferencias significativas valores de p<0,05, n.s. no significativo.

El método 3 fue un buen estimador del método patrón como era de esperar dado que los  $K_p$ -calibrados utilizados para la estimación de este método surgen de la ecuación (2) con la  $ET_o$  PM-FAO calculada a partir de una amplia serie climática local. Solo en el mes de abril existió diferencia estadísticamente significativa, con una sobrestimación de la  $ET_o$  de un 10 % (Cuadro 3).



**Figura 1.** Relación entre la  $ET_o$  estimada con el método 4 y la  $ET_o$  PM-FAO.

La relación de la  $ET_o$  estimada a partir del método 4 (con  $\overline{K_p}$ ) con la  $ET_o$  PM-FAO (Figura 1) muestra una leve sobrestimación del método para los valores altos de  $ET_o$ . Sin embargo cuando se graficaron los errores relativos en función de la  $ET_o$  PM-FAO este sesgo no se apreció (Figura 2).



**Figura 2.** Errores relativos del método 4 respecto a la  $ET_o$  PM-FAO para el período octubre-abril.

## Conclusiones

El uso de un coeficiente de tanque ( $\overline{K_p}$ ) único (0,71) durante toda la estación de riego tuvo un buen comportamiento en la estimación de la  $ET_o$  PM-FAO para la zona sur del país.

El empleo de este coeficiente único para corregir el dato de evaporación de tanque es una herramienta simple, fácil de adoptar por los productores y constituye una buena estimación de la  $ET_o$ .

Este valor deberá calibrarse para otras zonas del país.

## Agradecimientos

Al Ing. Agr. Andrés Beretta por su invaluable y desinteresado apoyo en el análisis estadístico de los datos.

## Bibliografía

- Allen, R.; Pereira, L. S.; Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO. Irrigation and Drainage Paper 56, Rome.
- Conceição, M. A. F. 2002. Reference evapotranspiration based on Class A pan evaporation. Scientia Agricola 59 (3): 417-420.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W. O. 1977. Las necesidades de agua de los cultivos. FAO. Riego y Drenaje Tomo 24 (4ª edición), Roma.
- Corsi, W. 1994. Programación del riego con informes de evaporación. En: Manejo de la información agroclimática para apoyo a la toma de decisiones en riego. Serie de actividades de difusión. INIA. Las Brujas N° 26: 1-16.
- López, J. y Dennett, M. 2005. Comparación de dos métodos para estimar la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) en una zona semárida de Venezuela. Bioagro 17(1): 41-46.
- MGAP-DIEA. 2006. Encuesta frutícola N° 263.
- MGAP-DIEA. 2006. Encuesta hortícola sur y litoral norte N° 254.
- Sentelhas, P. and Folegatti, M. 2003. Class A pan coefficients ( $K_p$ ) to estimate daily reference evapotranspiration ( $ET_o$ ). Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 7(1): 111-115.
- Stanhill, G. 2002. Is the Class A evaporation pan still the most practical and accurate meteorological method for determining irrigation water requirements? Agricultural and Forest Meteorology 112: 233-236.
- Strangeways, I. 2001. Back to basics: the «metenclosure». Part 7. Evaporation. Weather 56: 419-427.