

EVALUACIÓN DE ENFOQUES DE LA FAO PARA ESTIMACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE CEBOLLA (*Allium Cepa L.*) EN QUÍBOR, VENEZUELA *

FAO approaches evaluation for onion (*Allium Cepa L.*) crop evapotranspiration estimation in Quibor, Venezuela

Jorge Luis López Márquez¹ y Mike Dennett²

RESUMEN

El presente trabajo se llevó a cabo en Quíbor, Edo. Lara, durante el periodo mayo- noviembre de 2005. En condiciones semiáridas se compararon dos enfoques propuestos por la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) con el objetivo de estimar la evapotranspiración (ET_c) de un cultivar de cebolla (*Allium Cepa L.*) en la zona tropical. Los enfoques de uno y dos pasos permitieron la estimación directa e indirecta de la ET_c , utilizando ecuaciones matemáticas sencillas en las que se incluyen valores de variables climáticas en periodos determinados. Se estimó la ET_c de manera indirecta con base en la ecuación de Penman-Monteith (FAO-56) para el cálculo previo de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0). En cuanto a la estimación directa, el valor de ET_c se obtuvo con base en los valores medidos de resistencia estomática y aerodinámica, los cuales se introdujeron junto con los valores de variables climáticas en la ecuación original de Penman Monteith. Las estimaciones obtenidas en periodos variables correspondientes a las etapas de crecimiento de la cebolla, según FAO-24, fueron comparados con mediciones directas de evapotranspiración real (E_{Tr}), efectuadas mediante el uso de sonda de neutrones. Los valores obtenidos para la ET_c utilizando los enfoques de la FAO (I y II pasos) y para la E_{Tr} diaria fueron similares y oscilaron entre 0,5 y 4,5 mm d⁻¹, así mismo, los valores de coeficiente de cultivo (K_c) con estimaciones y medidas directas del ET_c se ajustaron a la curva FAO-24 con valores sugeridos de K_c para la cebolla.

Palabras clave: evapotranspiración, coeficiente de cultivo, enfoques, cebolla.

ABSTRACT

This work was held in Quíbor, Lara State, during May-November 2005. Under semiarid conditions two approaches from Food and Agricultural Organization (FAO) for getting crop evapotranspiration (ET_c), were compared using onion (*Allium Cepa L.*) in tropical climate. The one and two step approaches allows indirect and direct ET_c estimation by using simple mathematic equations which it is include climatic

(*) Recibido: 15-01-2009

Aceptado: 20-04-2009

¹ Dpto Ing. Agrícola, Decanato de Agronomía, Universidad Centrooccidental Lisandro Alvarado. Apdo 400, Cabudare-Lara. email: jorliam2001@yahoo.es.

² Universidad de Reading, Uk. email:m.d.dennett@reading.ac.uk.

variables data from specific periods. The indirect ET_c estimation was on the basis of Penman Monteith equation (FAO-56) for previous ET_0 calculation. With respect of direct estimation, the ET value was obtained from the measure values for stomatic and aerodynamic resistances, which were included with the rest of climatic variable data into the original Penman Monteith equation. The obtained estimations in variable periods corresponding to onion growth stages, from FAO-24, were compared with direct measurements of real evapotranspiration (E_{Tr}) from neutron probe. The values obtained for ET_c from FAO approaches (I and II step) and daily E_{Tr} were similar and oscillated between 0.5 and 4.5 mm, so the estimated K_c values from ET_c measurements and estimations were fitted to the FAO-24 K_c curve with suggested K_c onion values.

Key words: Evapotranspiration, crop coefficient, approaches, onion.

INTRODUCCIÓN

Existen investigaciones (Allen 2000; Katerji y Rana 2006; López-Urrea *et al.* 2006) relacionadas con la verificación de la ecuación de Penman Monteith, como parte del enfoque de uno y dos pasos, propuesto por FAO, para la estimación de la evapotranspiración (ET_c) de los cultivos. La evaluación de la mencionada ecuación, se ha realizado con base en la comparación de sus resultados con aquellos obtenidos por métodos directos de medición (lisímetros, sonda de neutrones, cociente de Bowen), lo que constituye un paso importante para validar científicamente uno de los métodos más usados en el mundo para obtener el valor de la evapotranspiración como factor primordial para el diseño y manejo de sistemas de riego.

En lo que respecta a la evapotranspiración, la metodología de dos pasos ($ET_0 * K_c$) es la más utilizada. En el caso específico de Venezuela, la aplicación de este método no cuenta con una base científica sólida que incluya datos climáticos confiables y métodos directos que permitan una

comparación y verificación de resultados a nivel local.

En Quíbor, importante zona productora de hortalizas a nivel nacional, las condiciones semiáridas y el desarrollo futuro del sistema Hidráulico Yacambu-Quíbor, determinan la necesidad de planificar el uso de los recursos hídricos utilizados para el riego, por lo que el conocimiento de la demanda de agua por parte de los cultivos es relevante. En este trabajo se busca constatar la validez de los enfoques de la FAO para estimar la ET_c . Así mismo se plantea validar los valores de coeficiente de cultivo K_c propuestos por FAO para el cultivo de cebolla bajo las condiciones de Quíbor Venezuela.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se realizó en Quíbor, hacienda el Caujaral durante el ciclo mayo-noviembre 2005. Se estimaron y midieron respectivamente los valores de evapotranspiración en el cultivo de cebolla, variedad Americana, usando los enfoques de uno

y dos pasos de la FAO (1990), mediante la ecuación de Penman Monteith y mediciones directas con sonda de neutrones.

Para las estimaciones de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) se utilizó la ecuación de Penman Monteith FAO-56. Esta ecuación incluye datos climáticos promedio de temperatura, humedad relativa, insolación y velocidad del viento a 2 metros de altura. Así mismo, se estimaron datos de radiación neta y déficit de vapor de agua según métodos propuestos por la FAO (1990). Se utilizó además un valor de coeficiente de reflexión de 0,23 y valores fijos de resistencia de cultivo y aerodinámica propuestos por Allen *et al.* (1998).

Para el enfoque de un paso, la evapotranspiración del cultivo se estimó con la ecuación original de Penman Monteith:

$$e = \frac{(Rn - G) + c_p(e_a - e_d)/r_a}{(1 + r_c/r_a)}$$

(Allen 2000), directamente sin el uso del coeficiente de cultivo (K_c), incluyendo mediciones de los valores de resistencias para diferentes etapas de crecimiento propuestos por FAO (Inicial, desarrollo, media y tardía) (Allen *et al.* 1998). En esta ecuación se incluye λe como flujo de calor latente de evaporación ($\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$), Rn es el flujo de radiación neta en superficie ($\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$), G el flujo de calor al suelo ($\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$), P la densidad atmosférica (kg m^{-3}), C_p el calor específico del aire húmedo ($\text{kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$), $(e_a - e_d)$ el déficit de vapor de agua (kPa), r_c la resistencia de cultivo (s m^{-1}), r_a la resistencia aerodinámica (s m^{-1}), Δ la pendiente de la curva presión del vapor

(kPa °C^{-1}) y γ la constante psicrométrica (kPa °C^{-1}).

Los valores de resistencia estomática r se midieron con un sistema portátil de intercambio de gases modelo LCA-4 (Adc. Ltd. England). Para calcular la resistencia de cultivo se tomó en cuenta la fórmula propuesta por FAO :

$$r_c = \frac{r_e}{0,5 * IAF}$$

donde, IAF es el índice de área foliar y r_e es el valor de la resistencia estomática. Los valores de la resistencia aerodinámica fueron estimados a partir de un perfil aerodinámico que incluyó registros de velocidad de viento (u) a alturas (z) de 0,65; 2 y 3 m utilizando anemómetros Met one (Campbell Scinetific LTd). Con este perfil, definido por:

$$u = u_* / k \ln \left(\frac{z - d}{z_0} \right)$$

se estimaron las variables aerodinámicas d (altura de desplazamiento), U^* (rugosidad) y z_0 (velocidad de fricción), que permitieron la estimación de la resistencia aerodinámica entre una altura determinada, en la cual la velocidad del viento es $u(z)$ y la altura $d+z_0$, donde el valor de u tiende a 0. Según la fórmula:

$$r_a = \frac{\ln \left(\frac{z - d}{z_0} \right)}{k u_*}$$

k representa la constante de Von Karman igual a 0,41 y z la altura en metros, se calculó el valor de r_a (Monteith y Unsworth 1990).

El inicio de la fase de bulbificación fue estimado mediante el índice de bulbificación

propuesto por Clark y Heath (1962). El cociente de ambas mediciones indica el inicio de la fase cuando su valor es mayor a 2. La maduración comienza en el momento en que la cubierta del suelo es mayor de 80 %. El índice de área foliar (IAF) se obtuvo con la metodología propuesta por Mondal et al. (1986), con base en mediciones semanales de longitud y ancho de las hojas de cinco plantas muestreadas en cada parcela experimental.

Para la medición de estas variables se establecieron 30 parcelas con un área de 38,5 m² cada una, con surcos de 8 m de largo, 30 cm de ancho y 30 cm de profundidad. La densidad fue 250000 plantas/ha con separación de trasplante de 6 cm. Para estimar el índice de bulbificación, se muestreó de manera destructiva en 3 plantas al azar por parcela, en las cuales se midió diámetro de bulbo y cuello.

Las ecuaciones para la estimación de la ETC y la ET₀ fueron resueltas mediante el uso del software SAS (8.0) en periodos diarios y en promedios decadales en diferentes etapas de crecimiento (inicial, desarrollo, media y tardía).

Las mediciones de evapotranspiración de la cebolla (E_{Tr}) se llevaron a cabo con sonda de neutrones 4300 (Troxler, Electronic laboratories, Inc), dos veces por semana entre aplicaciones de riego sucesivas. La variación del contenido de agua en el suelo en la zona radical de la cebolla y la evapotranspiración fueron estimadas mediante el balance de humedad expresado por $ds = (P+I) - (Et+D)$, donde ds es la cantidad de agua contenida en la zona radicular, P la precipitación, I el riego y

D el drenaje, considerado como despreciable en este caso.

Para estas mediciones, se colocaron 12 tubos de aluminio en 6 parcelas (2 por parcela) en surcos y camellones. Se midió a diferentes profundidades (40; 50 y 70 cm), después de cada riego, cada dos días durante el ciclo del cultivo. También, se tomaron muestras de suelo a 10 cm de profundidad para muestreo gravimétrico en las mismas fechas de muestreo de la sonda, con el fin de complementar la medición de sonda, ya que la misma es poco efectiva a esa profundidad.

Las lecturas diarias a partir de sonda fueron divididas por una lectura estándar interna efectuada al inicio de cada ciclo de medición para calibrar las mediciones. Los resultados fueron usados para obtener los valores promedio diarios. Al mismo tiempo, se calculó una curva de calibración diaria de las mediciones con sonda y su respectivo contenido volumétrico a 40 cm de profundidad.

La densidad aparente fue estimada a partir de las muestras tomadas a 30 cm de profundidad en tres parcelas usando anillos con volumen conocido. Las muestras fueron pesadas antes y después de secadas a 100 ° C. El agua de riego fue medida durante el periodo entre el 14 y 15 de junio de 2005 usando aforador tipo Baloffett.

Los valores de coeficiente de cultivo se estimaron para las diferentes etapas propuestas tomando en consideración el cociente entre la evapotranspiración de la cebolla y la ET₀. Los valores de ETC de los dos enfoques y la E_{Tr}

fueron analizados mediante regresión simple e índice de concordancia propuesto por López Urrea *et al.* (2006).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores totales de ET_c obtenidos oscilaron entre 220 y 228 mm, ligeramente mayores para las estimaciones con el enfoque de dos pasos; mientras que hubo asociación entre los valores de ET_c se obtuvo una ecuación:

$$Y=0.86X+0.45 \quad (r=0,90; P \ 0,0001)$$

El rango de las estimaciones diarias usando ambos enfoques varió entre 5 y 0,5 mm. En la Fig. 1 se muestra el resultado de la regresión lineal para el cultivar usando los dos enfoques. El ajuste entre valores respectivos de ET_c muestra valores dispersos durante la etapa media y tardía, con buena correspondencia durante la etapa inicial y de desarrollo.

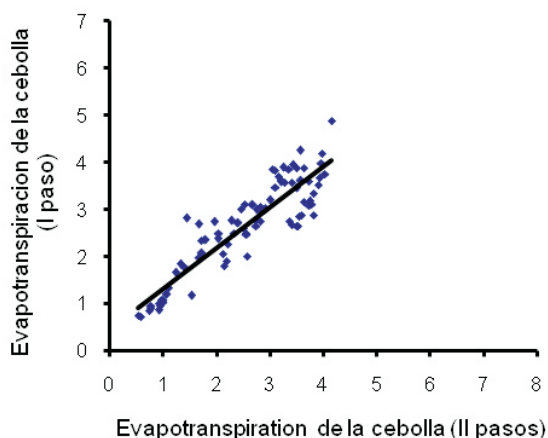


Figura 1. Correlación entre valores de evapotranspiración en $mm \ d^{-1}$ obtenidos con la ecuación de Penman Monteith y con el enfoque de uno y dos pasos.

En la Tabla 1 se muestran las estimaciones de ET_c y las mediciones de ETr durante diferentes periodos (2 ó 3 días) en el lapso de aplicación de riego. Los valores fueron similares entre si y menores a $4,5 \ mm \ d^{-1}$, que denotan baja evapotranspiración durante este periodo. Las diferencias máximas diarias se registraron entre 29 y 47 días después de trasplante. Durante este periodo la ET_c de los métodos FAO varió desde 1,4 hasta 2,0 y entre 0,9 y 2,8 $mm \ d^{-1}$; mientras que las mediciones de ETr estuvieron entre 0,71 y 2,4 $mm \ d^{-1}$.

En términos de la estimación de los valores diarios de ET_c para la cebolla, usando el enfoque de un paso (ecuación de Penman Monteith) (FAO 1990), la mayor demanda de agua durante el ciclo de crecimiento se observó en la fase de bulbificación, cuando el cultivo alcanzó los mayores valores de IAF. Esto coincide con los resultados obtenidos por Pfulb y Zengerle (1990), Prashar *et al.* (1994) y sugerencias indicadas por Doorenbos y Kassam (1979).

La comparación entre valores de ET_c de los métodos FAO y la ETr obtenida con sonda de neutrón es mostrada en la Tabla 2 mediante los coeficientes de correlación, determinación y el índice de concordancia (D).

El coeficiente de determinación fue mayor para la asociación ET_r-ET_c (un paso). El valor de r fue 0,82, lo que representa un valor mayor con respecto al de ET_r-ET_c (dos pasos). El valor de D fue también mayor para la relación entre ET_r y ET_c del enfoque de un paso.

Tabla 1. Evapotranspiración real y del cultivo estimada con enfoques FAO y mediciones de sonda de neutrón durante (mayo – agosto 2005) y valores de índice de área foliar.

Periodo	Días después de trasplante	ET _C (I paso)	ET _C (II paso)	ET _r	IAF
31-01/05	27-28	2,73	1,85	1,43	0,12
02-03/06	29-30	3,62	1,82	4,81	0,14
18-19-20/06	44-46	6,87	8,87	5,83	0,47
21/06	47	2,47	2,25	3,62	0,60
24/06	50	1,54	3,10	1,32	0,76
29-30/06	55-56	5,30	4,87	4,55	0,99
01-02/07	57	5,21	6,81	5,26	1,15
14-15/07	70-71	7,35	5,99	6,67	1,74
27-28-29/07	84-86	10,34	11,43	12,21	1,75
Total		45.49	46.99	45.52	

ET_C: Evapotranspiración del cultivo; ET_r: Evapotranspiración real; IAF: Índice de área foliar

Tabla 2. Relación entre ET_r y ET_C (uno y dos pasos) en cultivo de cebolla.

Ciclo	Pendiente	Intercepto	r	R ²	D
III ET _r / ET _C un paso	0,62	0,84	0,82	0,91	0,90
III ET _r / ET _C dos pasos	0,64	0,70	0,61	0,78	0,80

En ambos métodos no se observó tendencia única con relación a los valores de ET_r; mientras que los valores totales estimados por ciclo fueron similares a la ET_r total medida en este periodo. En la Fig. 2 se aprecia la regresión entre los valores diarios de ET_C por ambos métodos y la ET_r medida en campo.

La regresión entre la ET_C con el enfoque de un paso y los valores de ET_r mostró similitud para valores medidos entre 2 y 4 mm d⁻¹; mientras que con mediciones mayores a 4,5 mm d⁻¹, en ambos enfoques se sobreestimó la ET_C.

El mejor ajuste entre los dos enfoques fue para el método de un paso. La diferencia total entre la ET_C usando ambos métodos y las mediciones de ET_r fue similar; sin embargo, el coeficiente de determinación y el índice de

concordancia fueron mayores para el método de un paso, esto responde a un mejor ajuste de la regresión con este método.

Valores de coeficiente de cultivo (K_C) para cebolla en cuatro diferentes etapas de crecimiento.

Los valores de K_C fueron estimados a partir del cociente entre el valor de evapotranspiración de la cebolla (ET_C) (obtenido con el método de un paso y sonda de neutrones) y el valor de ET₀. Al final de la etapa inicial, los valores de K_C estimados con el método de un paso fueron similares a los informados por FAO (Doorenbos y Pruitt 1977). Para el resto del ciclo las estimaciones diarias y los valores K_C FAO-24 (Doorenbos y Pruitt 1977) siguieron similares

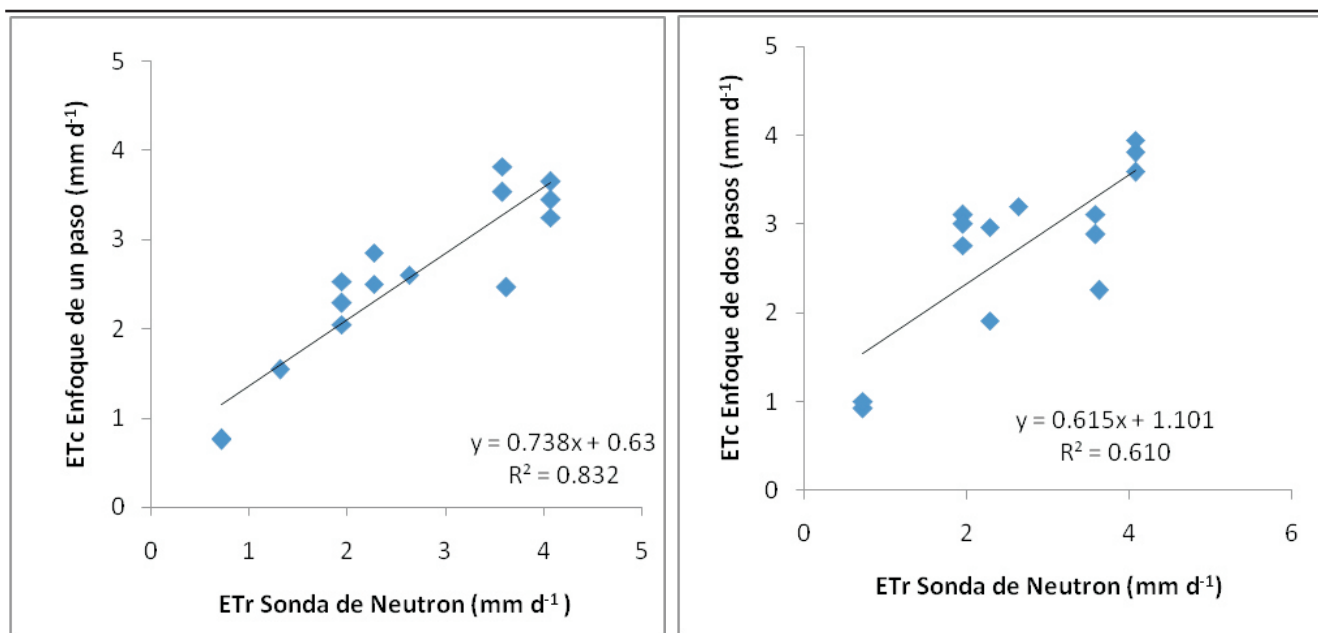


Figura 2. Comparación entre la ET, medida con sonda de neutrones y ET_c estimada con enfoques de uno y dos pasos (mayo- agosto 2005).

tendencias con menores valores para las estimaciones de K_c . El valor máximo estimado de K_c ocurrió a los 75 días después de trasplante (DDT), y coincide con el mayor valor (1,09) propuesto por FAO para la cebolla en toda la etapa media de crecimiento. A partir del máximo mencionado, en la etapa tardía las estimaciones de K_c tuvieron un valor relativamente constante alrededor de 0,75.

Las mediciones de ET_r , permitieron estimar el valor de K_c entre 27 (etapa inicial) y 93 DDT (etapa media). Inicialmente, los valores estimados de K_c fueron similares a los informados por FAO (Doorenbos y Pruitt 1977) al final de la etapa inicial y durante la etapa de desarrollo (Figura 3). Las estimaciones durante la etapa media alrededor de los 67 DDT también fueron similares a los valores propuestos FAO-24 (Doorenbos y Pruitt 1977).

Es importante resaltar que durante la etapa de máximo desarrollo, que coincide con la fase de bulbificación, se obtuvo el mejor ajuste entre los valores de K_c estimados y sugeridos por FAO-24 (Doorenbos y Pruitt 1977). Valores similares para las etapas media y tardía han sido determinados con lisímetros por García (2002). Así mismo, el K_c estimado para la etapa media (1,09), es coincidente con el valor reportado por *Al-Jamal et al.* (2001) para la cebolla en condiciones normales de humedad.

La medición de K_c utilizando la ET_r a partir de la sonda de neutrones presentó similitud con los valores de la FAO (FAO-24) para el cultivo de cebolla en las etapas inicial, desarrollo y media, por lo que se ajusta a la tendencia normal de la curva FAO-24.

Los valores totales máximos de ET_c fueron

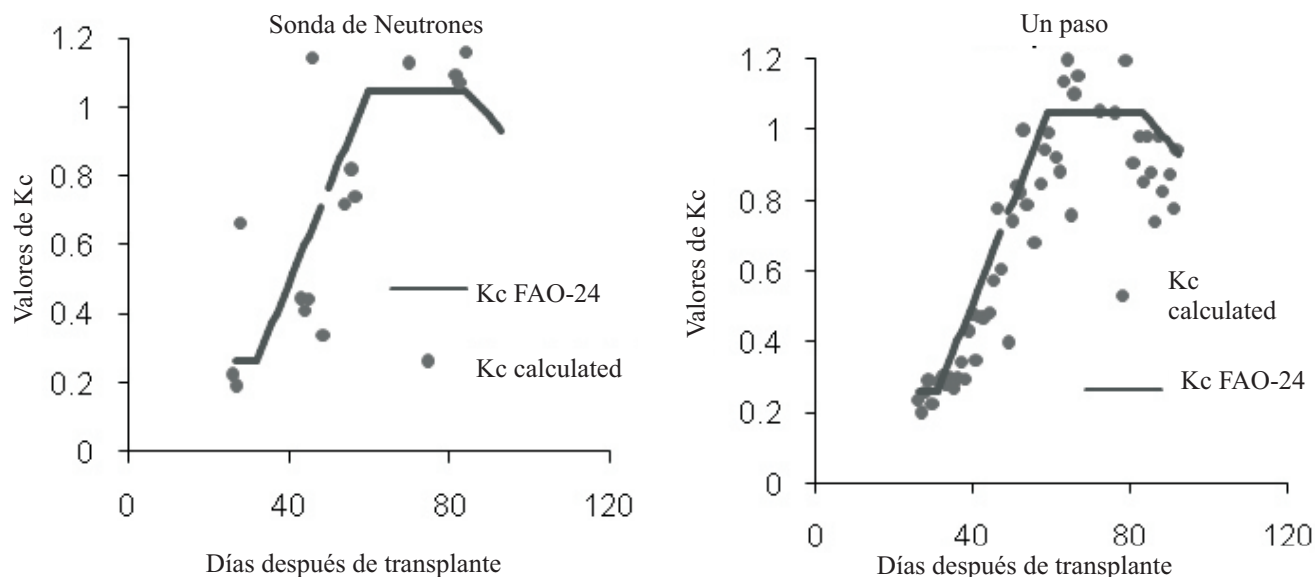


Figura 3. Valores de K_c estimados con base en el uso del enfoque de un paso y mediciones con sonda de neutrones.

de 220 mm para estimaciones con el enfoque de un paso. Este valor es coincidente con los valores de ET_c por ciclo para cebollas mostrados por Kruse *et al.* (1987), Doorenbos y Kassan (1979) y Bandyopadhyay *et al.* (2003). Sin embargo, estos valores de ET_c muestran subestimación con relación a la ET_c reportada por Prashar *et al.* (1994) bajo condiciones cálidas y secas.

Finalmente, el factor más importante para la medición de la evolución de la evapotranspiración y el K_c en el ciclo de vida del cultivo de cebolla es el índice de área foliar, lo cual coincide con las afirmaciones de Alves *et al.* (1998) y Sepaskhah y Andam (2001).

CONCLUSIONES

- El uso del enfoque de un paso y de las resistencias de cultivo y aerodinámica para la

estimación de la ET_c en diferentes etapas del cultivo, permitió la verificación de la influencia de la cubierta vegetal del suelo sobre la evapotranspiración, ya que los menores valores de ambas resistencias y las mayores tasas de evapotranspiración fueron encontrados durante el periodo de máximo desarrollo del cultivo en la fase de bulbificación, equivalente a la etapa media reseñada en FAO-24.

- Los valores de ET_c estimados con los enfoques de uno y dos pasos fueron similares entre sí; sin embargo, el enfoque de un paso permitió el mejor ajuste con relación a la ET_r medida con sonda de neutrones. No obstante, tomando en cuenta las dificultades para obtener las resistencias de cultivo y aerodinámica, en países como Venezuela, con limitantes económicas y técnicas, el uso del enfoque de dos pasos es de utilidad en la planificación del riego.

- Los valores de ET_c estimados con los enfoques de uno y dos pasos fueron similares entre sí; sin embargo, el enfoque de un paso permitió el mejor ajuste con relación a la ETr medida con sonda de neutrones. No obstante, tomando en cuenta las dificultades para obtener las resistencias de cultivo y aerodinámica, en países como Venezuela, con limitantes económicas y técnicas, el uso del enfoque de dos pasos es de utilidad en la planificación del riego. Los valores de K_c propuestos por FAO para el cultivo de cebolla en diferentes etapas de crecimiento, son válidos para su uso en Quíbor bajo condiciones normales de humedad del suelo (sin estrés hídrico).

REFERENCIAS

- Al-Jamal, M., Ball, S. and Sammis, T.W. 2001. Comparison of sprinkler, trickle and furrow irrigation efficiencies for onion production. *Agricultural Water Management* 46: 253-266.
- Allen, R. G. 2000. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *Journal of Hydrology* 229: 27-41.
- Allen, R.G., Pereira, L., Raes, D. and Smith, M. 1998. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements*. Irrigation and Drainage paper No. 56, FAO, Rome, Italy. 300 p.
- Alves, L., Perrier, A. and Pereira, L. 1998. Aerodynamic and Surface resistances of complete cover crops: How good is the big leaf. *American Society of Agricultural Engineers* 41, 345-351.
- Bandyopadhyay, P., Mallik, S. and Rana, S. 2003. Actual evapotranspiration and crop coefficients of onion (*Allium cepa* L) under varying soil moisture levels in the humid tropics of India. *Tropical Agriculture* 80 (2):83-90.
- Clark, J. and Heath, O. 1962. Studies in the physiology of the onion plant. An investigation into the growth substance content of bulbing onions. *Journal of Experimental Botany* 38: 227-249.
- Doorenbos, J and Pruitt, W. 1977. *Crop water requirements*. Irrigation and drainage paper number 24. Rome. 194 p.
- Doorenbos, J. and Kassam, A. 1979. *Yield response to water*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 206 p.
- FAO. 1990. *Report on the Expert Consultation of FAO guidelines for prediction of crop water requirements*. Land and Water Development Division. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 30 p.
- García, Y. 2002. *Determinación del requerimiento hídrico de la cebolla (Allium Cepa L) en condiciones edafoclimáticas del valle de Quíbor*. Edo Lara. Tesis CIDIAT. Mérida Venezuela 67 p.
- Katerji, N. and Rana, G. 2006. Modelling evapotranspiration of six irrigated crops under Mediterranean conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 138: 142-155.
- Kruse, E.G., Ellis, J.E. and Mcsay, A.E. 1987.

Comparison of two onion irrigation scheduling programs. *Journal of the American Society of Horticultural Science* 112: 738-742.

López-Urrea, F., de Santa Olalla, F., Fabeiro, C. and Moratalla, A. 2006. Testing evapotranspiration equations using lysimeters observations in a semiarid climate. *Agricultural Water Magment* 85: 15-26.

Mondal, M., Brewster, J., Morris, G. and Butler, H. 1986. Bulb development in onion (*Allium cepa* L) III. Effects of the size of the adjacent plants, shading by neutral and leaf filters, irrigation and nitrogen regime and the relationship between the red:far-red spectral ratio in the canopy and leaf area index. *Annals of Botany* 58: 207-219.

Monteith, J. L. and Unsworth, M. 1990. *Principles of Environmental Physics*. 2nd Edition. Edward, London. 286 p.

Pfulb, E. and Zengerle, K. 1990. Wasserverbrauch und bewässerung von sommerzwiebeln. *Gemuse* 26: 435-439.

Prashar, C., Govind, C. and Mohamadou, G. 1994. Evapotranspiration of onion in Sahelian Niger. *Expl. Agric* 30: 473-476.

Sepaskhah, A. and Andam, M. 2001. Crop coefficient of sesame in a semi-arid region of I.R. Iran. *Agricultural Water Management* 49: 51-63.