

Respuesta de los cultivos al déficit hídrico *Crop response to the water deficit*

Felicita González Robaina¹, Julián Herrera Puebla², Teresa López Seijas² y Greco Cid Lazo²

RESUMEN. La disponibilidad del recurso agua es cada día menor, por lo que la agricultura se enfrenta a un nuevo reto de producir más alimento con menos agua. En estas condiciones el conocimiento de las funciones agua/rendimiento juega un papel importante en la planificación y distribución del agua disponible entre un grupo de cultivos. El objetivo de este trabajo fue determinar las funciones de producción y la relación entre la disminución relativa del rendimiento y el déficit relativo de evapotranspiración como indicador de sensibilidad de los cultivos al déficit hídrico. Se utilizó la información sobre los consumos de agua y los rendimientos de 16 cultivos de la base de datos de los resultados experimentales en régimen hídrico disponible en la página WEB del IAgriC. Para los 16 cultivos analizados se encontró al modelo lineal como el de mejor ajuste para describir la relación entre la ET y el rendimiento. Los valores de eficiencias del agua consumida para cada cultivo variaron en dependencia de la época y tipo de cultivo. En el caso de los granos las eficiencias variaron entre 3,2 y 17 kg/ha de grano por cada milímetro adicional de agua consumida. Por su parte las hortalizas presentaron eficiencias entre 14,9 y 23,4 kg/ha. Mientras que en los tubérculos la papa fue el cultivo más eficiente con 8,62 kg/ha en la variedad Spunta. En los frutales el de mayor respuesta al agua fue el banano con una eficiencia de 40 kg/ha por cada milímetro adicional de agua consumida. Se obtuvieron además diferencias entre los valores del factor de sensibilidad al déficit hídrico (K_y) reportados en el boletín FAO 33 y los resultados de este trabajo. Para los cultivos frijol, sorgo, todas las hortalizas, naranja y papa los valores del factor de sensibilidad fueron inferiores a los reportados, mientras que para el maíz, la soya y plátano fueron superiores. Lo que confirma la necesidad del cálculo del K_y para cada área geográfica. Se presenta un agrupamiento de los cultivos según los valores del K_y para las condiciones cubanas.

Palabras clave: evapotranspiración, rendimiento, eficiencia del agua.

ABSTRACT. The availability of water resources is becoming smaller, so that agriculture is facing a new challenge to produce more food with less water. At these conditions the knowledge of crop production functions plays an important role in planning and distribution of available water between a crops group. The main objective of this work was to determine the crop production functions and the relationship between relative yield decrease and relative evapotranspiration deficit, expressed it like sensibility crop factor capable of water deficit. It was used information about water consumes and crops yields from 16 crops taking from the data base of experimental results in crop water requirement available in the institution. For the 16 analyzed crops, a linear model was proposed to describe the relation between evapotranspiration and yield. The values of consumed water efficiency for each crop were changing according to the crop type and season. In the case of the grains the efficiency values were in a range of 3,2 y 17 kg/ha of grain yield for each additional mm of consumed water. In the other hand the vegetables showed efficiency values between 14,9 y 23,4 kg/ha, while potato crop was the more efficient with a value of 8,62 kg/ha when the spunta variety was planted. In the fruit crops, banana showed the higher response, with an efficiency value of 40 kg/ha for each additional mm of consumed water. Some differences were obtained when the sensibility factor of water deficit (K_y) reported by FAO 33 publication were compared with the results obtained in this work. For bean, sorgum, all vegetables, orange and potato crops the K_y factor values obtained in this work were lower than FAO 33 reported values, while for maize, soybean, and plantain were higher. This result confirms the need to quantify the K_y for each geographic area.

Keywords: evapotranspiration, yield, water efficiency.

¹M.Sc., Investigador Auxiliar, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgriC), Carretera de Fontanar, km 2½, Reparto Abel Santamaría, Boyeros, La Habana, Cuba, Teléf.: (53) (7) 691-1038, 691-2665, 691 2533, e-mail: felicita@iagric.cu

²Dr. C., Investigador Titular, IAgriC.

Recibido 11/12/10, aprobado 25/11/11, trabajo 00/11, investigación.

INTRODUCCIÓN

La agricultura consume anualmente el 70 % del agua total utilizada para todos los usos y la disponibilidad de este recurso es cada día menor, por lo que este sector se enfrenta a un nuevo reto de producir más alimento con menos agua (WMO-UNEP, 2007; Walker, 2011)

En Cuba, una parte importante de la producción agrícola se obtiene durante el período invernal, que coincide con la época más seca del año; adicional a esto, los cultivos permanentes (caña de azúcar, pastos, frutales) para suplir su demanda requieren en dos y de cada cinco años, de un suministro extra de agua durante el período poco lluvioso. Ante estas condiciones es imprescindible conocer no solo las necesidades netas de cada cultivo, sino también la respuesta de cada cultivo al déficit hídrico y cuales cultivos responden mejor al agua aplicada, para una correcta planificación de los recursos hídricos disponibles. Muchos autores coinciden en proponer como estrategia para enfrentar la escasez de agua, el estudio de las funciones agua rendimiento, por el papel esencial que juegan en la planificación y distribución del agua disponible entre un grupo de cultivos en condiciones de déficit hídrico (Ortega *et al.*, 1999; Molden *et al.*, 2003; Dehghanisaniy *et al.*, 2009).

Stewart *et al.* (1977) desarrollaron un modelo multiplicativo para relacionar la producción con la evapotranspiración. Posteriormente Doorenbos y Kassam (1986) y más recientemente Al-Jamal *et al.* (2000), Kipkorir *et al.* (2002), Molden *et al.* (2003) y Dehghanisaniy *et al.* (2009) utilizaron este modelo y cuantificaron la respuesta al déficit hídrico para casi todos los cultivos agrícolas, mediante un factor de respuesta o sensibilidad que denominaron K_y . Sin embargo los valores de K_y en estos trabajos, han sido obtenidos de la evaluación de numerosos experimentos en Europa, Estados Unidos y el Medio Oriente y no incluyen resultados más cercanos al área del Caribe.

En todos estos casos y con el fin de lograr una relativa independencia de factores ambientales y con ello una aplicación más extensa de las funciones agua rendimiento, se ha preferido presentar la misma en escala relativa, asumiendo con ello además, al desarrollar esta función, que el único factor crítico para maximizar el rendimiento es el agua.

El factor de respuesta K_y permite explicar de modo cuantitativo la respuesta de los cultivos al déficit y por ello ha resultado efectivo en el planeamiento y operación de los proyectos de riego a fin de maximizar la producción o la ganancia económica en condiciones de escasez hídrica, cuando se tiene que escoger entre un grupo de cultivos (Shanan, 1992; Ortega *et al.*, 1999; Dehghanisaniy *et al.*, 2009).

Cuando están involucrados cultivos con diferentes valores de K_y , bajo condiciones limitadas de agua, un cultivo con un factor de respuesta K_y superior a 1, exigirá una mayor disponibilidad de este recurso y será difícil la implementación de estrategias de manejo sin importantes pérdidas en el rendimiento.

En razón a lo anterior, este trabajo se trazó como objetivo determinar las funciones: rendimiento- evapotranspiración y la relación entre la disminución relativa del rendimiento ($1-R/R_{\max}$) y el déficit relativo de evapotranspiración ($1-ET/ET_{\max}$) como indicador de sensibilidad de los diferentes cultivos al déficit hídrico en las condiciones del clima cubano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó la información sobre los consumos de agua y los rendimientos de 16 cultivos obtenidos en experimentos de campo y disponibles en la base de datos de los resultados experimentales en régimen hídrico del IAgric (González *et al.*, 2012).

Para el procesamiento de la información se utilizó el paquete estadístico STATGRAPHICS Plus versión 5 (2000). A través del análisis de correlación y regresión se seleccionaron los modelos de mejor ajuste; se tuvo en cuenta la calidad y significación de los coeficientes de regresión (95% de confiabilidad) así como el comportamiento de los residuos.

Primeramente se determinaron las posibles relaciones entre los valores absolutos del rendimiento (R) y la evapotranspiración (ET); relaciones que permiten calcular la eficiencia del agua evapotranspirada así como los requerimientos mínimos de evapotranspiración total antes de que se alcance rendimiento alguno.

Para la determinación del factor de sensibilidad de cada cultivo al déficit hídrico (K_y) se utilizó la expresión empírica descrita por Doorenbos y Kassam, (1986) que cuantifica la relación entre la disminución relativa del rendimiento ($1-R/R_{\max}$) y el déficit relativo de evapotranspiración ($1-ET/ET_{\max}$):

$$\left(1 - \frac{R}{R_{\max}}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_{\max}}\right) \quad (1)$$

donde:

R -rendimiento real del cultivo, t/ha;

ET -evapotranspiración real, mm;

ET_{\max} -evapotranspiración máxima obtenida en el mejor tratamiento, mm;

R_{\max} -rendimiento máximo obtenido en el mejor tratamiento, t/ha;

K_y - factor de sensibilidad del cultivo al déficit hídrico.

Según Kipkorir et al. (2002) esta función será lineal siempre que se cumpla que la función de producción calculada en base a la evapotranspiración sea lineal.

Un factor de sensibilidad superior a 1, indica que el cultivo tendrá grandes pérdidas en el rendimiento cuando no se satisfacen sus requerimientos hídricos. En este estudio la magnitud del déficit hídrico se refiere al déficit acumulado durante todo el ciclo vegetativo de los cultivos.

Se comparan los valores de K_y obtenidos en este trabajo con los reportados en el Boletín FAO 33

(Doorembos y Kassam, 1986) y se resume un agrupamiento de los cultivos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para los 16 cultivos analizados se encontró al modelo lineal como el de mejor ajuste para describir la relación entre la ET y el rendimiento, ecuaciones válidas solamente para los rangos de consumo de agua estudiados (Tabla 1). Para la selección de los modelos se tuvo en cuenta la calidad y significación de los coeficientes de regresión, así como los altos valores del coeficiente de determinación, capaces de explicar en la mayoría de los casos en más del 80% la variabilidad total.

TABLA 1. Rangos de consumo de agua, modelos consumo de agua–rendimiento y coeficiente de determinación de los modelos propuestos para los 16 cultivos estudiados en las diferentes épocas

Cultivos	ET (mm)	Modelo $R = a ET + b$	R^2	
Granos	Maíz (<i>Zea Mays</i>) invierno	190-400	$R = 0,0172 ET$	0,96
	Maíz primavera	300-420	$R = 0,0139 ET$	0,98
	Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	45-380	$R = 0,0071 ET$	0,96
	Soya (<i>Glycine max</i>) invierno	130-400	$R = 0,0065 ET$	0,91
	Soya primavera	200-450	$R = 0,0102 ET$	0,93
	Soya verano	150-305	$R = 0,0103 ET$	0,98
	Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>) invierno	200-420	$R = 0,0061 ET+1,89$	0,78
	Sorgo verano	370-490	$R = 0,004 ET+2,83$	0,45
	Garbanzo (<i>Cicer arietinum</i>)	150-300	$R = 0,0032 ET$	0,97
Hortalizas	Pimiento (<i>Capsicum annuum</i>) invierno	200-360	$R = 0,149 ET-23,04$	0,98
	Pimiento verano	300-370	$R = 0,174 ET-44,5$	0,82
	Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	66-350	$R = 0,203 ET$	0,95
	Cebolla (<i>Allium cepa</i>)	250-450	$R = 0,021 ET+ 9,5$	0,93
	Ajo (<i>Allium sativum</i>)	200-360	$R = 0,0234 ET+2,21$	0,96
	Viandas	Papa (<i>Solanum tuberosum</i>) Spunta	170-380	$R = 0,084 ET$
Baraka		178-377	$R = 0,0862 ET$	0,99
Kondor		189-334	$R = 0,0841 ET$	0,97
Desireé		191-290	$R = 0,0858 ET$	0,99
Boniato (<i>Ipomoea batatas</i>)		189-376	$R = 0,0809 ET$	0,98
Malanga (<i>Xanthosoma sp.</i>)		130-370	$R = 0,081 ET$	0,97
Plátano (<i>Musa spp.</i>) fomento		460-760	$R = 0,0375 ET$	0,93
Plátano producción		1200-1630	$R = 0,0168 ET$	0,97
Yuca (<i>Manihot esculenta</i>)		600-1020	$R = 0,0294 ET$	0,98
Frutales		Banano (<i>Musa spp.</i>) fomento	590-840	$R = 0,05 ET$
	Banano producción	800-1470	$R = 0,025 ET$	0,96
	Piña (<i>Ananas comosus</i>)	600-1100	$R = 0,040 ET$	0,97
		230-325	$R = 0,018 ET+44,18$	0,97

a y b coeficientes de regresión, a pendiente de la recta, b intercepto.

R rendimiento (t/ha)

ET evapotranspiración (mm)

El valor de la pendiente de la recta obtenida en cada caso permitió conocer las eficiencias del agua consumida para cada cultivo, valores que variaron en dependencia de la época y tipo de cultivo.

Según el modelo lineal, presentado en la tabla 1 para cada cultivo estudiado, se encontró que en los granos las eficiencias variaron entre 3,2 y 17 kg/ha por cada milímetro adicional de agua consumida. Por su parte, las hortalizas presentaron eficiencias entre 14,9 y 23, 4 kg/ha. Mientras que en las viandas la papa fue el cultivo más eficiente con 8,62 kg/ha en la variedad Spunta. En los frutales el banano fue el de mayor respuesta al

agua con una eficiencia de 40 kg/ha por cada milímetro adicional de agua consumida

En la Tabla 2 se muestra una comparación entre los valores obtenidos en este estudio del factor de sensibilidad al déficit hídrico con los reportados en el boletín FAO 33. Los valores de K_y se han deducido bajo el supuesto de que todas las relaciones entre el rendimiento y la ET para los 16 cultivos resultaron lineales (Tabla1), y son válidas para un déficit de agua hasta el 50% aproximadamente en la mayoría de los cultivos.

Como se puede apreciar en la tabla 2 existen diferencias entre los valores reportados en el boletín FAO 33 y los resultados de este trabajo. Para los cultivos frijol, sorgo, todas las hortalizas, naranja y papa los valores del factor de sensibilidad fueron inferiores a los reportados, mientras que para el maíz, la soya fueron superiores. Lo que enfatiza la necesidad del cálculo de los K_y para cada área geográfica.

En el caso de las hortalizas, con excepción del ajo, el resto de los K_y estuvieron muy por debajo de

los reportados (0,57 como promedio), lo que se asocia fundamentalmente a las diferencias en los valores medios de rendimientos para Cuba, que están entre un 17% y un 38% por debajo de los reportados en el mundo. Esto podría explicarse si se tiene en cuenta que las variedades estudiadas son cultivos originales de clima frío y seco, sin embargo en Cuba aunque se cultivan en la época seca donde disminuyen las temperaturas, éstas aún se mantienen muy por encima de las óptimas y la humedad relativa se mantiene alta, lo que conlleva a que no se alcancen los rendimientos potenciales de estos cultivos.

En la tabla 2 se muestran además las posibles pérdidas relativas de rendimiento para los cultivos estudiados si el déficit hídrico alcanzara el 25%. El maíz, boniato y el plátano son los cultivos con pérdidas superiores al 40%. Mientras que el sorgo, las hortalizas, piña, naranja y la yuca muestran pérdidas inferiores al 20%. El cultivo con mayores pérdidas es el maíz sembrado en primavera.

TABLA 2. Factor de sensibilidad al déficit hídrico (K_y) de los cultivos para Cuba, intervalo de déficit de agua estudiados, coeficiente de determinación, en comparación con lo reportado por el Boletín FAO 33 y pérdida relativa de rendimiento para un déficit hídrico planificado de un 25%

Cultivos	Boletín FAO 33 K_y	Déficit de agua	Cuba			
			K_y	R^2	Pérdida relativa rendimiento%	
Cereales y granos	Maíz invierno	1,25	0-0,4	1,67	0,89	41,8
	Maíz primavera		0-0,3	2,31	0,49	57,8
	Fríjol	1,15	0-0,3	1,07	0,82	26,8
	Soya invierno	0,85	0-0,58	1,14	0,84	28,5
	Soya primavera		0-0,3	0,79	0,87	19,9
	Soya verano		0-0,47	1,34	0,88	33,5
	Sorgo invierno	0,9	0-0,48	0,67	0,90	16,8
	Sorgo verano		0-0,25	0,56	0,84	14,0
Hortalizas	Garbanzo	-	0-0,46	1,04	0,73	26,0
	Pimiento invierno	1,1	0-0,4	0,59	0,84	14,8
	Tomate	1,05	0-0,8	0,57	0,87	14,2
	Cebolla	1,1	0-0,4	0,54	0,89	13,5
Frutales	Ajo	0,8*	0-0,4	0,78	0,96	19,5
	Plátano fruta fomento	1,2-1,35	0-0,4	1,33	0,76	33,3
	Plátano fruta producción		0-0,4	1,07	0,71	26,8
	Plátano vianda fomento		0-0,22	1,86	0,93	46,5
	Plátano vianda producción		0-0,36	0,73	0,91	18,3
	Piña	-	0-0,27	0,54	0,97	13,6
Tubérculos	Naranja	0,8-1,1	0-0,65	0,36	0,99	9,0
	Papa	1,1	0-0,73	0,98	0,83	24,5
	Boniato invierno	-	0-0,63	0,85	0,81	21,3
	Boniato verano	-	0-0,44	1,67	0,88	41,8
	Malanga	-	0-0,39	1,59	0,88	39,8
	Yuca	-	0-0,29	0,79	0,85	19,8

*según lo reportado por Fabeiro *et al.* 2003

Al calcular los K_y , Doorenbos y Kassam (1986) trabajaron con promedios de muchos

experimentos donde tal vez incluían diferentes variedades, épocas de siembra y estado de

plantación, por lo que en su reporte muestran un promedio de estas condiciones que permite enmarcar al cultivo en un patrón general de consumo de agua.

De esta manera, al separar los bananos y los plátanos en dos diferentes condiciones de la plantación (fomento y producción) cada una de ellas se coloca en un grupo de Ky diferente, en correspondencia también con los patrones de consumo de agua y la producción. Sin embargo, al considerar, en este mismo cultivo ambos estadios como promedio, tanto el banano como el plátano se ubican en el grupo IV de altos consumidores de agua, en concordancia con Doorenbos y Kassam (1986) (Tabla 2).

Lo anterior indica la respuesta diferenciada al agua de los cultivos en dependencia de factores propios del cultivo, de su agrotécnica y momento.

Sin embargo, a los efectos de la planificación, como se trata de asignar una dotación de agua o de definir para una determinada cantidad de agua el tipo de cultivo a sembrar, es muy sensato guiarse por el valor máximo como garantía de que se dispondrá de la cantidad necesaria de agua para maximizar el rendimiento.

Teniendo en cuenta lo anterior en la tabla 3 se establece un agrupamiento y se comparan los resultados de este trabajo con el propuesto por Doorenbos y Kassam (1986); los cultivos se ubican en dependencia del valor del factor de sensibilidad (Ky) que se muestran en la tabla 2. Solamente los cultivos frijol, maíz, banano y plátano coinciden con los resultados de estos autores. En el caso del boniato, malanga y yuca, al no existir referencias anteriores, estos valores constituyen los primeros resultados encontrados.

TABLA 3. Agrupamiento obtenido en comparación con lo reportado por Doorenbos y Kassam (1986) en el boletín FAO 33

Grupo	Boletín FAO 33	Cuba
Grupo I Ky < 0,85	alfalfa, cacahuete, remolacha	soya primavera, sorgo, tomate, cebolla, ajo, pimiento invierno, plátano vianda producción, piña, yuca
Grupo II 0,85 ≤ Ky ≤ 1,00	sorgo, soya, trigo, col, cítricos	papa, boniato invierno
Grupo III 1,00 < Ky ≤ 1,15	frijol , cebolla, papa, tomate, pimiento,	frijol , garbanzo, soya invierno, plátano fruta producción
Grupo IV Ky > 1,15	plátano, maíz , caña de azúcar	maíz , soya verano, plátano fruta fomento, plátano vianda fomento , boniato verano, malanga

Según Cordeiro *et al.* (1998) las diferencias encontradas con relación a los reportados por Doorenbos y Kassam (1986) pueden estar dadas por las variaciones en las condiciones climáticas, de suelo, nivel de ET y experimentales.

Con relación a este último, la literatura internacional y nacional, recoge una gran cantidad de trabajos que demuestran que el uso de balances simplificados en el cálculo del consumo de agua de las plantas, como los que han dado lugar al cálculo de los Ky en este artículo, pueden llevar a una subestimación o sobrestimación de las necesidades de agua de las plantas y a serios errores en el manejo del riego (Ahuja y Nielsen, 1990; Hillel, 1990; Andreu *et al.*, 1997; Maraux *et al.*, 1998; Franco *et al.*, 2000; Takashi y Tzi Tziboy, 2000).

Esto ha sido demostrado por López *et al.* (2001) en estudios de balance hídrico en las condiciones del sur de La Habana, donde se comprueba que los balances simplificados introducen errores en la determinación de la ET ya que en los egresos solo

se considera la evapotranspiración y se desprecian los flujos reales en la zona radical del cultivo, que pueden constituir aportes o pérdidas al balance según los potenciales hídricos que se establezcan.

En la figura 1 se muestra el agrupamiento obtenido en este trabajo. En general, como puede observarse en la figura 1 (Tabla 3), para los cultivos de sorgo, tomate, cebolla, ajo, pimiento, piña, naranja, yuca y papa la disminución del rendimiento se hace proporcionalmente menor al aumentar el déficit hídrico (Ky < 1), mientras que aumenta proporcionalmente (Ky > 1) para cultivos como frijol, garbanzo, soya, maíz, banano, plátano, boniato y malanga.

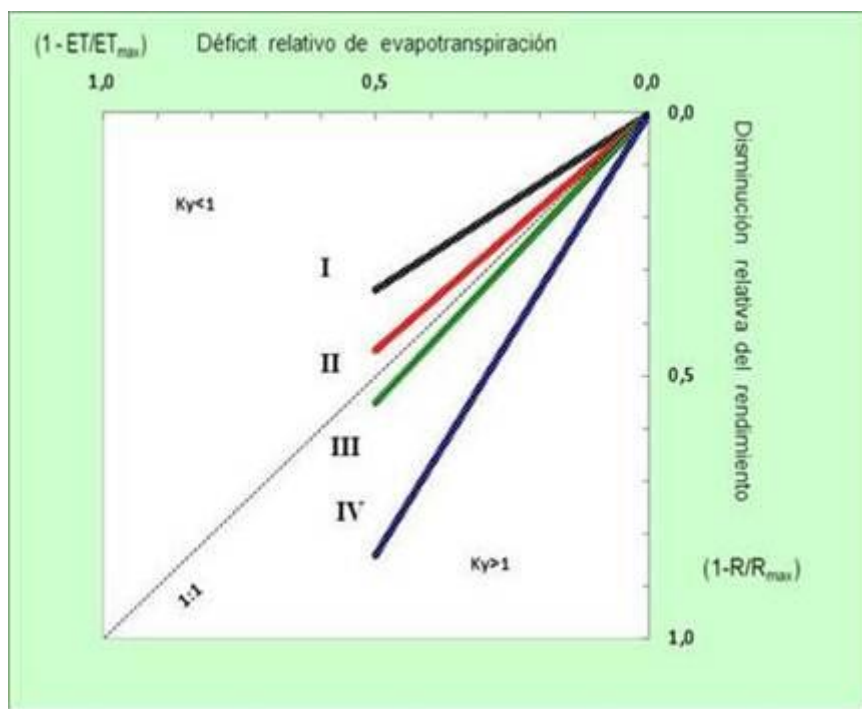
Para los cultivos del grupo IV la pérdida relativa de rendimiento será proporcionalmente superior que el decrecimiento relativo en evapotranspiración, y el maíz es el cultivo con mayor factor de sensibilidad al déficit hídrico, lo que confirma la baja tolerancia de este cultivo a la escasez de agua. La alta sensibilidad de estos cultivos al estrés hídrico sugiere que bajo

condiciones limitadas de agua se hace difícil la implementación de estrategias de manejo sin importantes pérdidas de rendimiento.

déficit hídrico ($K_y < 1$), mientras que aumenta proporcionalmente ($K_y > 1$) para cultivos como frijol, garbanzo, soya, maíz, plátano fruta y plátano vianda en fomento, boniato verano y

Para los cultivos del grupo IV la pérdida relativa de rendimiento será proporcionalmente superior

que el decrecimiento relativo en evapotranspiración, y el maíz es el cultivo con mayor factor de sensibilidad al déficit hídrico, lo que confirma la baja tolerancia de este cultivo a la escasez de agua. La alta sensibilidad de estos cultivos al estrés hídrico sugiere que bajo condiciones limitadas de agua se hace difícil la implementación de estrategias de manejo sin importantes pérdidas de rendimiento.



Grupo I: $K_y < 0,85$

- Sorgo
- Tomate
- Cebolla
- Ajo
- Pimiento
- Piña
- Naranja
- Yuca

Grupo II: $0,85 < K_y < 1,00$

- Papa

Grupo III: $1,00 < K_y < 1,15$

- Frijol
- Garbanzo
- Soya

Grupo IV: $K_y > 1,15$

- Maíz
- Banano
- Plátano
- Boniato
- Malanga

FIGURA 1. Relación generalizada entre la disminución relativa del rendimiento y el déficit relativo de evapotranspiración y agrupamiento de los cultivos según su factor de sensibilidad al déficit hídrico para este estudio.

CONCLUSIONES

Para los 16 cultivos analizados se encontró que un modelo lineal explica bien la relación entre la ET y el rendimiento. Los valores de eficiencias del agua consumida para cada cultivo variaron en dependencia de la época y del tipo de cultivo.

Para los cultivos frijol, sorgo, todas las hortalizas, naranja y papa los valores del factor de sensibilidad fueron inferiores a los reportados por

FAO 33, mientras que para el maíz, la soya fueron superiores.

Existen diferencias entre los valores del factor de sensibilidad reportados en el boletín FAO 33 y los encontrados en este trabajo. Solamente los cultivos frijol, maíz, banano y plátano coinciden con en el agrupamiento propuesto en el Boletín 33 de FAO.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AL-JAMAL, M.S.; SAMMIS, T.W.; BALL, S.; SMEAL, D.: "Computing the crop water production function for onion", *Agricultural Water Management*, vol. 46: 29-41, 2000.
2. AHUJA, L. R. y NIELSEN, D. R. Field soil-water relations. In "Irrigation of Agricultural Crop". Edited by B. A. Stewart and D.R. Nielsen. *Agronomy*, No. 30: 143-190, 1990.
3. ANDREU L.; HOPMANS, J.W. y SCHWANKL, L.J.: "Spatial and temporal distribution of soil water balance for a drip-irrigated almond tree". *Agricultural Water Management*, vol. 35: 123-146, 1997.

4. CORDEIRO, L. G.; LIMA, F. M.; ANSELMO, J. J. y PACELI M. E.: "Fator de sensibilidade ao déficit hídrico da cultura do feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) walp)", *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 2 (2): 153-157, 1998.
5. DEHGHANISANI, H.; NAKHJAVANI, M.; TAHIRI, A. Z. y ANYOJI, H.: "Assessment of wheat and maize water productivities and production function for cropping system decisions in arid and semiarid regions", *Irrig. And Drain*, vol. 58: 105-115, 2009.
6. DOORENBOS, J. y KASSAM, A. H.: Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper N° 33. FAO: Rome; 193 pp, 1986.
7. FABEIRO, C. C.; SANTA OLALLA, M. F. y LÓPEZ-UREA, R.: "Production of garlic under controlled deficit irrigation in a semi-arid climate", *Agricultural Water Management*, vol. 59 (2): 155-167, 2003.
8. FRANCO, J.A.; ABRISQUETA, J.M.; HERNANSÁEZ, A. y MORENO, F.: "Water balance in a young almond orchard under drip irrigation with water of low quality". *Agricultural Water Management*, vol. 43: 75-98, 2000.
9. GONZÁLEZ, R. F.; HERRERA, P.J.; HERNÁNDEZ, B. O.; LÓPEZ, S.T. y CID, L.G.: "Base de datos sobre necesidades hídricas", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 21(2), 2012.
10. HILLEL, D.: Role of irrigation in agricultural systems. In "Irrigation of Agricultural Crop". Edited by B. A. Stewart and D. R Nielsen. Agronomy, No. 30: 6-29, 1990.
11. KIPKORIR, E.C; RAES, D. y MASSAWE B.: "Seasonal water production function and yield response factors for maize and onion in Perkerra, Kenya", *Agricultural Water Management*, vol. 56 (3): 229-240, 2002.
12. LÓPEZ, T.; CID, G.; ZAMORA, E.; GONZÁLEZ, F. y MARTÍNEZ, R.: "Caracterización del proceso de redistribución de la humedad del suelo para la determinación de la evapotranspiración de los cultivos agrícolas". *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 10 (2): 81-85, 2001.
13. MARAUX, F.; LAFOLIE, F. y BRUCKLER, L.: "Comparison between mechanistics and functional models for estimating soil water balance: deterministic and stochastic approaches". *Agricultural Water Management*, vol. 38: 1-20, 1998.
14. MOLDEN, D.: Accounting for water use and productivity. SWIM Paper 1. International Irrigation Management Institute: Colombo, Sri Lanka; 16pp, 1997.
15. ORTEGA, J. F.; DE JUAN, J.A.; TARJUELO, J.M.; MERINO, R. y VALIENTE M.: "Modelo de optimización económica del manejo del agua de riego en las explotaciones agrícolas: Aplicación a la agricultura de regadío de la provincia de Toledo", *Invest. Agr.: Prot. Veg.*, vol. 14 (3): 325-354, 1999.
16. SHANAN, L.: Cropping systems and water demand. Chapter 5. In: Planning and Management of Irrigation Systems in Developing Countries. Part II Guidelines for planning and operating structured irrigation systems, *Agricultural Water Management*, vol. 22(1+2): 81-104, 1992.
17. STEWART, J. I.; DANIELSON, R. E.; HANKS, R. J.; JACKSON, E. B.; HAGAN, R. M.; PRUITT, W. O.; FRANKLIN, W. T. y RILEY, J. P.: *Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil*. Utah Water Res. Lab., Logan, Utah, PRS 151-1, 1977.
18. TAKASHI M. y E. A. TZI TZIBOY. Mejoramiento del uso del agua en la agricultura: el papel de las técnicas nucleares. CENA. Univ. São Paulo. Piracicaba. Brasil, 2000.
19. WALKER, W. R. Lessons for the Last Half Century of Irrigation Engineering. Research-Where to Now. IV Congreso Iberoamericano de Riego y Drenaje, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, septiembre 2011.
20. WMO-UNEP-World Meteorological Organization and United Nations Environment Programme. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and vulnerability. 8th Session of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Brussels, April, 2007.