

PROGRAMACIÓN DEL RIEGO EN CAÑA DE AZÚCAR EN UNA ZONA SEMIÁRIDA DEL ESTADO LARA, VENEZUELA, UTILIZANDO LA METODOLOGÍA FAO-56

Ricardo Trezza¹, Yelitza Pacheco¹, Yamileth Suárez¹, Aixa Nuñez¹ e Igle Umbría¹

RESUMEN

Con el objeto de maximizar la eficiencia de uso del agua en la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) cultivada bajo riego por aspersión en la zona semiárida del estado Lara, Venezuela, se realizó la programación del riego mediante la aplicación del balance hídrico en el suelo. Se utilizó la metodología propuesta en la publicación FAO-56 para determinar la evapotranspiración del cultivo y el balance diario de la humedad en el suelo. Los resultados señalan que la operación actual del sistema de riego bajo la modalidad de frecuencia y lámina de riego fijas, genera pérdidas excesivas de agua por percolación profunda en las primeras etapas de desarrollo del cultivo, así como situaciones de déficit hídrico en las etapas de máxima demanda, lo que traería consigo una reducción del rendimiento de la caña de azúcar. En el estudio se propone manejar el calendario de riego en la zona manteniendo la frecuencia de riego fija pero aplicando una lámina de riego variable definida según el agotamiento de humedad en la zona de las raíces del cultivo.

Palabras clave adicionales: Evapotranspiración, ecuación de Penman-Monteith, *Saccharum officinarum*

ABSTRACT

Daily water balance for sugarcane irrigation scheduling in a semiarid region in Venezuela by using the FAO-56 methodology
To optimize the water use efficiency of sugarcane (*Saccharum officinarum*) grown under sprinkle irrigation in the semiarid region of Lara State, Venezuela, an irrigation program was scheduled based on the daily water balance in the root zone. The FAO-56 methodology was applied for the determination of the crop evapotranspiration and daily water balance. The results showed that the current operation of the irrigation system in the area, which consists in water application by using a fixed irrigation interval and a fixed irrigation depth, generates deep percolation losses in the early growing stages, as well as irrigation deficits in the crop maximum demand periods that would produce a reduction on the crop yields. In this study an alternative management of the irrigation scheduling is proposed considering the same fixed irrigation interval but a variable irrigation depth defined as the water depletion in the root zone.

Additional key words: Evapotranspiration, Penman-Monteith equation, *Saccharum officinarum*

INTRODUCCIÓN

La agricultura bajo riego se ha constituido en uno de los mayores consumidores de agua dulce proveniente de fuentes superficiales y subterráneas. Esto ha generado, en situaciones de limitación de recursos hídricos, severos conflictos de uso al entrar en juego las demandas de agua para abastecimiento humano, hidroelectricidad e industrial, las cuales se han incrementado constantemente. Además, la creciente contaminación de los recursos hídricos hace cada vez más limitado el recurso agua.

Por otra parte, el aumento de la población hace necesario incrementar la producción agrícola, para lo cual se requiere del uso de riego para satisfacer las demandas de agua de los cultivos. En general, la agricultura bajo riego ha permitido la mejora de la calidad de vida de los usuarios de los sistemas de riego al poner a disposición mayor cantidad de alimentos y otros beneficios económicos y sociales.

La necesidad de mantener una agricultura bajo riego aunado al compromiso de hacer un mejor uso de los cada vez más escasos recursos hídricos, hacen necesario la conducción de

Recibido: Junio 29, 2007

Aceptado: Febrero 25, 2008

¹ Dpto. de Ingeniería, Núcleo Universitario Rafael Rangel, Universidad de los Andes. Trujillo. Venezuela.
e-mail: rtrezza@ula.ve

investigaciones que tiendan a la optimización del uso del agua de riego.

En Venezuela, el cultivo de caña de azúcar representa una importante actividad agrícola. En general los cultivos de caña de azúcar localizados en la zona de influencia del Central La Pastora en el estado Lara han logrado producciones de caña de azúcar que se ubican entre las mejores a nivel nacional utilizando métodos de riego por goteo y aspersión. Sin embargo, las características semiáridas de las áreas mencionadas hacen al cultivo fuertemente dependiente de la aplicación del riego. Según Doorenbos y Kassam (1979) los efectos negativos de la falta de riego sobre el rendimiento de la caña de azúcar son mayores durante el periodo de crecimiento vegetativo y el comienzo de formación de la cosecha.

Ojeda-Bustamante et al. (2006) señalan que la programación del riego para grandes zonas de riego requiere modelos de fácil implementación en sistemas computarizados; una programación efectiva debe permitir el ajuste de la frecuencia y cantidad del riego basada en factores del suelo, ambiente, planta y manejo del riego. Por otra parte, si el calendario de riego se programa a nivel diario, se puede predecir la dinámica de la humedad del suelo al considerar las entradas y salidas de agua diarias en la zona radical.

La determinación del requerimiento de agua del cultivo y el régimen de riego más adecuado permiten conocer las necesidades hídricas reales de la planta, con el objeto de mantener altos niveles de productividad evitando los excesos de agua y logrando a su vez un desarrollo sustentable del cultivo bajo riego.

Bajo este enfoque, el objetivo de este trabajo fue proponer una programación sencilla del riego utilizando información meteorológica, del cultivo y suelos, así como una comparación de los métodos de la estimación de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) con base en los procedimientos señalados en la publicación FAO-56 (Allen et al., 1998).

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio pertenece a la hacienda La Pastoreña localizada en el municipio Torres, estado Lara (9° 49' N). En esta zona se practica una agricultura extensiva del cultivo de la caña de

azúcar y las características semiáridas de la región hacen que la producción agrícola sea fuertemente dependiente del riego.

El sistema de riego en un área aproximada de 240 ha utiliza aspersores tipo cañón con un radio de mojado de 60 m y un caudal de operación de $29 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. La separación entre laterales y aspersores es de 60 y 48 m, respectivamente, lo que resulta en una intensidad de aplicación de $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ y un tiempo de riego fijo de 5 h (50 mm por día). Se utiliza una frecuencia de riego fija de 11 días, independientemente de la etapa de desarrollo del cultivo.

Información meteorológica y edafológica

La información meteorológica fue obtenida a través de los registros de la estación meteorológica ubicada dentro de la hacienda La Pastora. La estación registra datos diarios de temperatura del aire, insolación, radiación solar, viento, humedad y evaporación, lo cual permite la aplicación del balance de humedad a nivel diario a través de la metodología de la publicación de la FAO-56 (Allen et al., 1998).

Los suelos son de textura franca, pH neutro, conductividad eléctrica relativamente baja y niveles aceptables de nitrógeno, potasio y fósforo (Laboratorio de Suelos, Núcleo Universitario Rafael Rangel, Universidad de los Andes, ULA-Trujillo) que indican que no deben existir limitaciones de fertilidad o salinidad que afecten el rendimiento de la caña de azúcar en el área de estudio. En promedio, la capacidad de campo del suelo es 22,5 % y el punto de marchitez permanente 12,0 % (Laboratorio de Suelos, Escuela de Geografía, ULA-Mérida). La densidad aparente es 1,46 y la infiltración básica es alta (alrededor de $4 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$), cuyo valor fue obtenido utilizando el método del cilindro infiltrómetro (Grassi, 1993).

Determinación de la evapotranspiración del cultivo (ET_c)

Para la determinación de la ET_c se consideró la metodología del coeficiente único, que considera un coeficiente de cultivo integrado introducido por Doorenbos y Pruitt (1977) en la publicación de la FAO-24. La metodología presentada en FAO-56 es básicamente la misma donde se toman en consideración diferentes valores de K_c

dependiendo de la etapa de desarrollo del cultivo estudiado. La metodología se basa en la ecuación $ET_c = K_c \cdot ET_o$, donde ET_c es la evapotranspiración del cultivo, K_c es el coeficiente de cultivo y ET_o es la evapotranspiración del cultivo de referencia.

El valor de K_c , que integra los efectos de la transpiración de las plantas y la evaporación que ocurre a partir de las superficies húmedas del suelo, fue obtenido para cada una de las etapas de desarrollo en la publicación FAO-56 (Allen et al., 1998) y corregido por efecto del clima predominante en el área de estudio utilizando las ecuaciones que consideran la velocidad del viento y humedad del aire, así como la altura del cultivo, y correspondió a 0,50 (etapa inicial de desarrollo); 1,25 (etapa de mediados de temporada) y 0,74 (etapa final, antes de la suspensión del riego).

La ET_o , que incorpora el efecto de las condiciones meteorológicas del área al proceso de evapotranspiración fue calculada de acuerdo a los tres métodos indicados en FAO-56, es decir, FAO Penman-Monteith (P-M), Hargreaves y tina de evaporación, según los registros meteorológicos existentes. Considerando que el método P-M proporciona los valores más aceptados de ET_o (EWRI-ASCE, 2005) se tomó como referencia para comparar con los otros métodos utilizando datos de los años 2002 y 2003.

Disponibilidad de agua en el suelo y reducción de la ET_c debido al estrés hídrico

La lámina de agua disponible total (ADT) se obtuvo a partir de la fórmula: $ADT = \frac{CC - PMP}{100} Da \cdot Pr$

donde ADT es el total de agua disponible para las plantas en la zona radical del suelo, CC el contenido de humedad a capacidad de campo, PMP el contenido de humedad en el punto de marchitamiento permanente, Da la densidad aparente del suelo y Pr la profundidad de las raíces. Las profundidades utilizadas variaron según el estado de desarrollo del cultivo, desde una profundidad mínima de 20 cm hasta una máxima de 60 cm.

A partir de la información anterior se calculó la lámina fácilmente aprovechable (AFA), es decir, la fracción de ADT que un cultivo puede extraer de la zona radical sin experimentar estrés hídrico, mediante la fórmula $AFA = UR \cdot ADT$, donde UR

es la fracción promedio del total de agua disponible en el suelo que puede ser agotada de la zona radical antes de presentarse estrés hídrico. El valor de UR para la caña de azúcar fue obtenido a partir de las tablas de la publicación FAO-56.

Dado que cuando el agotamiento de la humedad en la zona radical es mayor que la AFA, el cultivo comienza a sufrir estrés hídrico y la evapotranspiración disminuye por debajo de la ET_c , se calculó el efecto del nivel de humedad en el suelo sobre la ET_c mediante la ecuación $ET_{caj} = K_s \cdot K_c \cdot ET_o$, donde ET_{caj} es el valor de evapotranspiración ajustado por efecto del estrés hídrico y K_s es un factor adimensional de reducción de la transpiración que depende de la cantidad de agua disponible en el suelo.

Cuando el agotamiento calculado (A) fue mayor que AFA, el valor de K_s se obtuvo mediante la fórmula: $K_s = \frac{ADT - A}{ADT - AFA}$. Si el agotamiento fue menor que AFA, se consideró $K_s = 1$.

Reducción del rendimiento debido al estrés hídrico

Para determinar el efecto que tuvo el suministro de agua sobre el rendimiento de la caña de azúcar se cuantificó la posible reducción del rendimiento, es decir, la reducción en la productividad del cultivo debido a las faltas temporales de agua fácilmente aprovechable en el suelo. El cálculo se realizó a partir de la fórmula:

$$\text{Reducción del rendimiento} = K_y \left(1 - \frac{ET_{caj}}{ET_c} \right)$$

donde ET_{caj} es la evapotranspiración ajustada (real) del cultivo, ET_c es la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar (sin estrés hídrico) y K_y es el factor de respuesta de la productividad específico para la caña de azúcar, cuyo valor tabulado se obtuvo en la publicación FAO-56.

Balance diario de humedad en la zona radical

El balance se definió en términos de agotamiento al final del día, a través de la ecuación $A = A_1 - (P - ES) - R - Ac + ET_{caj} + PP$, donde A es el agotamiento de humedad en la zona radical del suelo al final del día, A_1 agotamiento de humedad en la zona radical al final del día

anterior, P la precipitación, ES el escurrimiento superficial, R la lámina de riego aplicada, AC el aporte por ascenso capilar, PP la pérdida de agua que ocurre por percolación profunda y $ET_{c_{aj}}$ la ET ajustada del cultivo.

La determinación se realizó a través de una hoja de Excel, que permitió el cálculo del agotamiento diario de humedad en el suelo (A) a través de la ecuación de balance hídrico, en la que se partió de un agotamiento inicial de humedad en el suelo, asumido como el agotamiento final del día precedente (A_1). Los valores de precipitación (P) fueron tomados de los registros de la estación meteorológica. El escurrimiento superficial (Es) fue considerado muy bajo debido a la alta velocidad de infiltración del suelo. También el aporte capilar (AC) se consideró como insignificante, comparado con los otros términos del balance, por lo que fue asumido como igual a cero. Los valores diarios de ET_0 fueron obtenidos a través de la fórmula P-M (Allen et al., 1998). En los cálculos se utilizaron los datos correspondientes a la temporada productiva del año 2002.

Para la selección de los calendarios de riego se consideraron las siguientes dos alternativas:

a) Lámina variable y frecuencia de riego fija. La lámina R fue asumida como igual al agotamiento de humedad del suelo al final de los 11 días de la frecuencia de riego y fue calculada a través de la ecuación de balance hídrico. Es decir, en cada riego se aplicó la lámina de agua necesaria para llevar el suelo a capacidad de campo.

b) Lámina fija y frecuencia de riego fija. Se utilizó una lámina de riego fija de 50 mm con una frecuencia fija de 11 días. Es decir, esta alternativa consideró el mismo calendario de operación del sistema de riego de la finca objeto de estudio.

Las pérdidas de agua por percolación profunda (PP) fueron consideradas como igual a cero en el caso del escenario de lámina variable, debido a que sólo se aplicó el agua necesaria para llevar al suelo a capacidad de campo. En el caso de lámina fija se consideraron pérdidas por percolación ($PP > 0$) cuando se calcularon excesos de agua por encima de capacidad de campo, una vez satisfecho el agotamiento de humedad del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comparación entre los métodos para la estimación de ET_0

La comparación entre los métodos P-M vs. Hargreaves se puede observar en la Figura 1 para los años 2002 y 2003. El método de Hargreaves tendió a sobreestimar sistemáticamente los valores diarios de ET_0 , atribuido a las condiciones de vientos débiles ($< 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) y la alta humedad relativa ($> 70 \%$), presentes en la zona en estudio.

La comparación entre los métodos P-M vs. tina de evaporación se presenta en la Figura 2. En este caso se puede notar que, a pesar de existir diferencias entre los valores estimados por ambos métodos, los errores son aparentemente aleatorios y no sistemáticos como en el caso anterior.

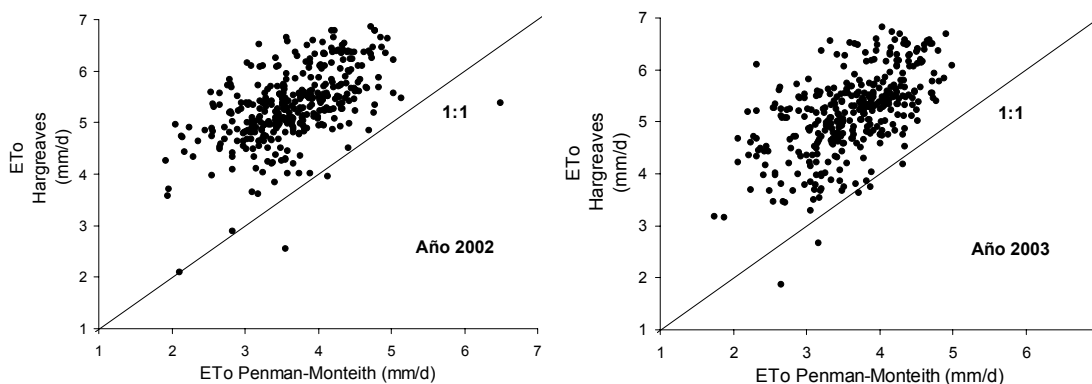


Figura 1. Comparación de los valores de ET_0 obtenidos a través de los métodos de FAO Penman-Monteith y Hargreaves para los años 2002 y 2003

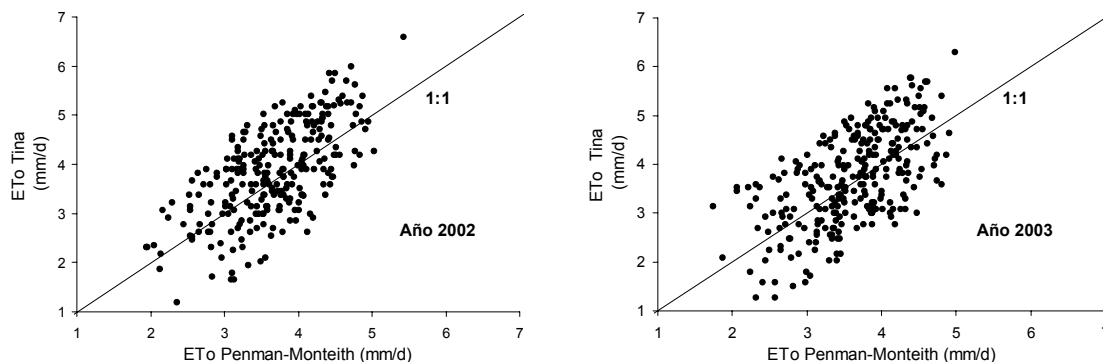


Figura 2. Comparación de los valores de ETo obtenidos a través de los métodos de FAO Penman-Monteith y la tina de evaporación para los años 2002 y 2003

En la Figura 3 se puede observar una comparación entre los valores totales anuales de ETo estimados por los distintos métodos. Como puede observarse, el método de Hargreaves produjo los valores más altos, lo cual representa una diferencia de 45,3 y 43,0 % para los años 2002 y 2003 con respecto a los obtenidos a través de P-M. Por su parte, los totales de la tina de evaporación presentan una diferencia de sólo 10,3 y 5,8 % para los mismos años, lo que permite considerar a este método como alternativa para la estimación de ETo en el área de estudio.

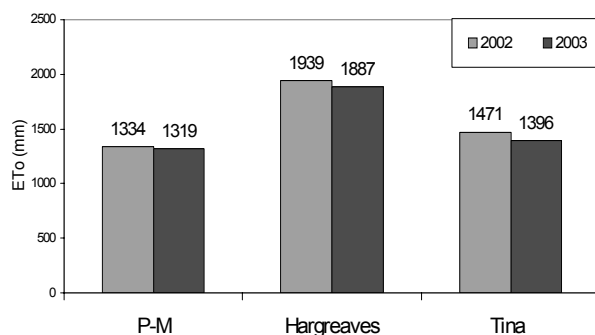


Figura 3. Comparación entre los valores totales anuales de ETo , obtenidos a través de los métodos de FAO Penman-Monteith (P-M), Hargreaves y tina de evaporación para los años 2002 y 2003

Balance diario de humedad y calendario de riego

En la Figura 4 se puede observar la variación del agotamiento de humedad durante el año 2002 considerando la alternativa de regar con una

frecuencia fija de 11 días, aplicando una lámina de riego variable (alternativa 1). Se puede ver que el agotamiento real (A) se mantiene por debajo del agotamiento máximo permisible (AFA) hasta el día 305, condición que evita situaciones de estrés hídrico en el cultivo y la consecuente reducción del rendimiento. A partir del día 305 del año (11 de Noviembre) se dejó de aplicar riego intencionalmente, lo cual constituye una práctica de manejo en la caña de azúcar para acelerar la maduración, deshidratando la caña y forzando a la transformación de los azúcares completos en sacarosa recuperable.

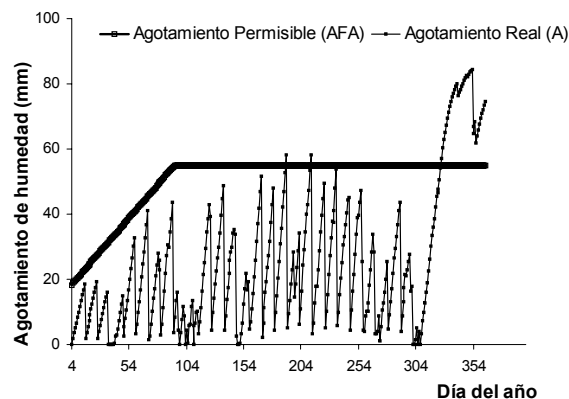


Figura 4. Variación del agotamiento de humedad en el suelo, utilizando una lámina de riego variable, en el cultivo de caña de azúcar en una zona semiárida del estado Lara, Venezuela

Por otra parte, en la Figura 5 se puede observar la variación del agotamiento de humedad durante el año 2002, considerando la alternativa de regar

con una frecuencia fija de 11 días y aplicando una lámina bruta fija de riego de 50 mm (alternativa 2, equivalente a la operación actual del sistema de riego en el área en estudio). Se observa que esta alternativa de riego produjo situaciones severas de estrés hídrico entre los días 186 al 256 del año, período en que el agotamiento real (A) superó sensiblemente al agotamiento máximo permisible (AFA). Estas situaciones de estrés hídrico producen la reducción de la ET_c y la consiguiente reducción de la producción del cultivo, la cual se calculó en 8,9 % considerando un K_y de 1,2 (Allen et al., 1998).

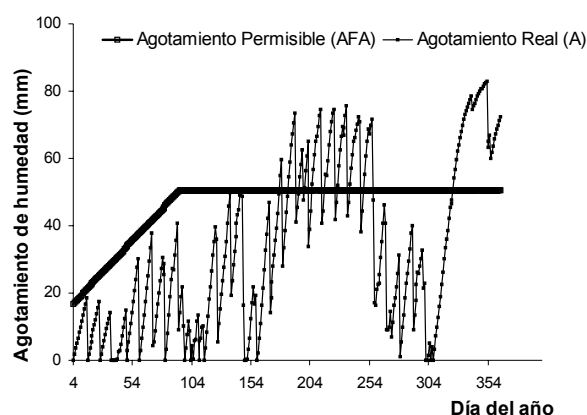


Figura 5. Variación del agotamiento de humedad en el suelo, utilizando una lámina de riego fija en el cultivo de caña de azúcar en una zona semiárida del estado Lara, Venezuela

El Cuadro 1 presenta los totales anuales obtenidos sumando los valores diarios de ET_c , ET_{caj} y lámina neta de riego (R), resultantes del balance diario de humedad en el suelo. En el caso de la lámina fija, la lámina bruta de riego total fue 1250 mm y en la lámina variable, 1264,4 mm (en los 25 riegos aplicados). Para ambas alternativas de riego la eficiencia fue estimada en 70 % (30 % de pérdidas de agua debidas al riego). La precipitación efectiva fue estimada substrayendo las pérdidas por escurrimiento de la precipitación total, utilizando el método del número de la curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (Grassi, 1993).

Se puede observar que en ambas alternativas existe una reducción de la evapotranspiración, ya que los totales anuales ET_{caj} son menores a ET_c . En el caso de la lámina de riego variable esta reducción es debida al corte de riego intencional a

partir del 11 de noviembre. En el caso de lámina de riego fija la reducción es mayor debido a la existencia de los períodos de déficit hídrico mostrados en la Figura 5. Así mismo, las pérdidas totales de agua, expresadas como la diferencia entre los aportes de precipitación y riego y el consumo de agua del cultivo (ET_{caj}), son mayores en el caso de lámina fija, debido a que en las primeras etapas de desarrollo del cultivo se producen excesos de agua y pérdidas por percolación, ya que los aportes son mayores que los requerimientos de agua del cultivo.

Cuadro 1. Valores anuales derivados del calendario de riego. Año 2002

	Lámina de riego	
	Fija	Variable
ET_c (mm)	1418,0	1418,0
ET_{caj} (mm)	1272,1	1361,9
Precipitación efectiva (mm)	496,0	496,0
Número de riegos	25	25
Lámina neta de riego (mm)	875,0	885,1
Lámina bruta de riego (mm)	1250,0	1264,4
Pérdidas debidas al riego (mm)	375,0	379,3
Aportes Pe+R - ET_{caj} (mm)	473,9	398,5
Reducción del rendimiento (%)	8,9	0

CONCLUSIONES

Al utilizar la ecuación de FAO Penman-Monteith como método básico de comparación, se encontró que la ecuación de Hargreaves tiende a sobreestimar los valores de ET_o en el área de estudio. Hubo mejor correspondencia con el método de la tina de evaporación, indicando que es una técnica sencilla que puede representar una alternativa al uso de la ecuación de FAO Penman-Monteith.

La operación de riego en la zona que considera una frecuencia fija de 11 días y una lámina bruta fija de 50 mm, produce situaciones de exceso de agua y pérdidas por percolación durante las primeras etapas de desarrollo del cultivo, a la vez que provoca situaciones de déficit hídrico en las etapas de máxima demanda. Esto genera estrés hídrico en el cultivo y la consecuente reducción del rendimiento del mismo, estimada en un 8,9 % para el año 2002.

La alternativa de lámina riego variable, la cual depende del agotamiento de humedad en el suelo y mantiene fija la frecuencia de riego en 11 días, representaría un manejo más adecuado de los

escasos recursos hídricos de la zona. Esta alternativa puede complicar levemente la operación del sistema de riego debido a que el tiempo de riego sería variable en cada aplicación, aunque esto no debería representar un problema grave en los sistemas de riegos presurizados.

LITERATURA CITADA

1. Allen R.G., L. Pereira, D. Raes y M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. FAO, Irrigation and Drainage Paper 56. Roma. 301 p.
2. Doorenbos J. y A. Kassam. 1979. Yield response to water. FAO, Irrigation and Drainage Paper 33. Roma. 139 p.
3. Doorenbos J. y Pruitt J. 1977. Crop water requirements. FAO, Irrigation and Drainage Paper 24. Roma. 144 p.
4. EWRI-ASCE (Environmental and Water Institute of the American Society of Civil Engineers). 2005. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. ASCE. 216 p.
5. Grassi, C.J. 1993. Fundamentos de riego. CIDIAT. Mérida, Venezuela. 325 p.
6. Ojeda-Bustamante, W., E. Sifuentes-Ibarra y H. Unland-Weiss. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. Agrociencia 40: 13-25.