

# IRRIGACION INTERNACIONAL

REVISTA INTERNACIONAL DE AGUA E IRRIGACION

## Balance hídrico y energético de maíz regado por goteo superficial y subterráneo

**Steven R. Evett, Terry A. Howell  
y Arland D. Schneider**  
USDA-ARS, Conservation Laboratory  
Bushland, Texas, EE.UU.

### SINOPSIS

El riego por goteo con emisores subterráneos puede ahorrar agua, al reducir el área humedecida en la superficie del suelo y por ende la evaporación (E). Sin embargo, la determinación de la evapotranspiración (ET) en distintas combinaciones de profundidad del emisor y métodos de cultivo puede ser una tarea engorrosa. Modificamos un modelo de ET mecánico, el ENWATBAL, para simular el riego con goteros a cualquier profundidad y modelizamos los componentes del balance hídrico y

energético de maíz (*Zea mays L.*, cv. PIO 3245) cultivado en suelo franco arcilloso Pullman en la localidad de Bushland, Texas, instalando goteros en la superficie y a profundidades de 0,15 y 0,30 m. Se aplicó riego a diario para reemplazar el agua consumida por la planta, según se determinó en el campo por dispersión de neutrones. La transpiración modelada resultó ser prácticamente igual para todas las profundidades de los goteros (428 mm en 114 días, desde la germinación hasta bien pasado el máximo del índice de área foliar [LAI = leaf area index]), pero con goteros a 15 y 30 cm de profundidad, la evaporación fue menor en 55 mm y 81 mm respectivamente que con goteros en la superficie. El drenaje previsto era reducido (6, 8 y 12 mm con goteros en la superficie y a 0,15 y 0,30 m de profundidad respectivamente), pero la comparación al final de la temporada de los perfiles de humedad previstos con los

observados mostró que quizás se alcanzara un drenaje profundo de más de 150 mm. Hubo pequeñas diferencias en el flujo térmico del suelo entre los distintos tratamientos, porque este parámetro era un componente relativamente pequeño del balance energético. Con goteros en la superficie, la radiación neta fue mucho mayor y el flujo de calor sensible, menor que con goteros subterráneos, hasta que el LAI superó el valor de 4,2 a mediados de temporada. De ahí que casi toda la diferencia en ET se registró en el período de cobertura de follaje parcial. Las diferencias en los componentes del balance energético entre los distintos tratamientos fueron pequeñas después del día 220 del año. El estudio mostró que podía ahorrarse hasta el 10% de la precipitación estacional más riego instalando los goteros a 30 cm. de profundidad.

### INTRODUCCIÓN

El rendimiento de cultivos regados con goteo subterráneo puede superar el de los regados con goteo superficial (Phene et al., 1987) o su consumo de agua puede ser menor a igualdad de rendimiento (Camp et al., 1989). La variación puede deberse a diferencias en el agua disponible para la planta, debido a una mayor evaporación en la superficie del suelo con riego superficial. Sin embargo, con maíz (*Zea mays*) cultivado en 1993 en suelo franco arcilloso Pullman en la localidad de Bushland, Texas, no se anotó una diferencia de rendimiento significativa entre tratamientos regados con agua suficiente (Howell et al., 1994). Tarantino et al. (1982) compararon el microclima y la evapotranspiración (ET) de tomates regados por goteo y por surcos en lisímetros gravimétricos y no hallaron diferencias en la ET estacional a igualdad de desarrollo del follaje. En su estudio, el riego por goteo se aplicó diariamente y el riego por surcos a intervalos de unos 10 días. La mayor ET en el riego por surcos en los 3 días siguientes al riego se compensó con la ET generalmente mayor en el riego por goteo, debido a la superficie constantemente mojada del suelo con este método. Aunque la superficie del suelo franco estaba sólo parcialmente humedecida, la advección de las áreas secas y calientes entre las hileras contribuyó a la energía disponible

<sup>1</sup>Pedólogo, Jefe de Investigación (Ing. Agrónomo) e Ingeniero Agrónomo respectivamente. USDA-ARS Conservation and Production Research Laboratory, P.O. Drawer 10, Bushland, TX 79012. Contribución con apoyo parcial del Convenio USDA-OICD No. 03T594 60-7D15-4-023 en colaboración con el National Agricultural Research Project (NARP), Ministry of Agriculture, Agricultural Research Center, Soils and Water Research Institute, Giza, Egipto.

para inducir la evaporación de la superficie mojada. Si se hubiera podido reducir la humedad de la superficie del suelo mediante el goteo subterráneo, la ET del riego por goteo quizás habría sido menor que la del riego por surcos. En suelo arenoso, la radiación neta y la ET fueron mayores con riego por aspersión que con riego por goteo en tomates, con aplicaciones diarias de riego (Ben-Asher et al., 1978).

El flujo del agua durante el microrriego ha sido simulado con distintos modelos: básicamente unidimensional (Van Bavel et al., 1973), bidimensional axisimétrico (Brandt et al., 1971; Nassehzadeh-Tabrizi et al., 1977), y bidimensional rectilíneo (Gahli y Svehlik, 1988; Oron, 1981). Lafolie et al. (1989) introdujeron soluciones por diferencias finitas tanto axisimétricas como rectilíneas. Aunque algunos de esos estudios incluían la absorción por las raíces, ninguno intentó modelizar los balances hídrico y energético del follaje del cultivo y de la superficie del suelo.

El ENWATBAL (ENergy and WATER BALance), es un modelo mecanístico de ET que fue descrito por Evett y Lascano (1993) y Van Bavel y Lascano (1987). Se utilizó para prever la ET de algodón (Lascano et al., 1987) y de sorgo (Van Bavel y Lascano, 1987) en Lubbock, Texas. Más recientemente, Ritchie y Johnson (1990) compararon el ENWATBAL con el modelo funcional CERES-Maíz para la predicción de la ET de algodón. Krieg y Lascano (1990) utilizaron el ENWATBAL para pronosticar la ET de sorgo en Brownfield, Texas, y Lascano (1991) utilizó el modelo para predecir los efectos de N en el uso de agua del sorgo en regadío y en secano en Lubbock, Texas. El ENWATBAL ha calculado correctamente la ET diaria de maíz ( $r^2 = 0,85$  a  $0,96$ ) y la radiación neta ( $r^2 = 0,97$ ) a lo largo de toda una temporada en el sitio de estudio (Evett et al., 1991). También la evaporación de un suelo desnudo ha sido correctamente determinada por el ENWATBAL en tres experimentos ( $r^2 = 0,84, 0,94$  y  $0,99$ ) (Evett et al., 1992). En el presente estudio hemos investigado los balances

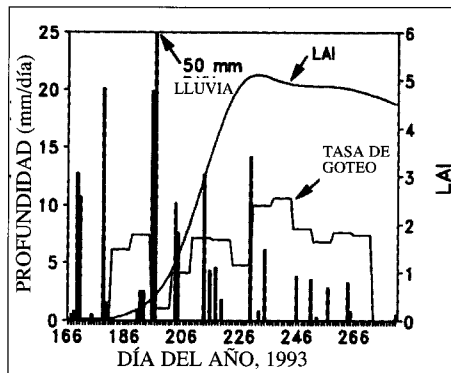


Figura 1. Precipitación (barras verticales), tasa de riego por goteo e índice de área foliar (LAI)

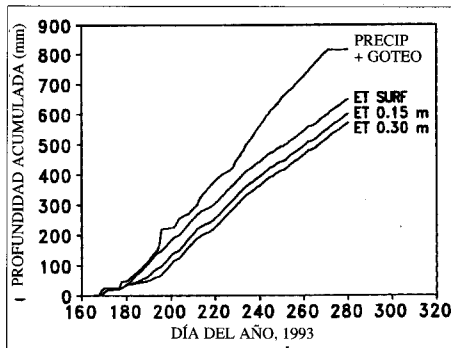


Figura 2. Valores acumulados de precipitación más riego y ET acumulada para riego por goteo en la superficie (SURF) y con goteros a profundidades de 0,15 cm y 0,30 cm

energéticos e hídricos del cultivo de maíz, utilizando el ENWATBAL para comprender mejor las diferencias físicas entre el maíz regado por goteo superficial y subterráneo. Modificamos el ENWATBAL incluyendo en las fuentes un término de aplicación de agua a la profundidad elegida por el usuario. Se efectuaron simulaciones de toda la temporada con riego por goteo en la superficie y a 0,15 y 0,30 m bajo la superficie.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El maíz (*Zea mays* L. cv PIO 3245) se plantó en hileras trazadas a una distancia de 0,76 m, el día 147 del año, como un mes más tarde de la fecha corriente en la región, en un suelo franco arcilloso Pullman (Torreptic Paleustoll térmico fino, mezclado), que se caracteriza por un horizonte B denso a unos 20 cm de profundidad y un horizonte cálcico que se inicia a unos 110 cm de profundidad. Los datos de fertilización y cosecha y otras consideraciones agronómicas, así como el tamaño de las parcelas y los métodos de riego, comunicados por Howell et al. (1994), aparecen en otro lugar de estas actas. La separación entre

goteros era de 0,45 m a lo largo de la tubería, y de 1,52 m. entre tuberías. El contenido de humedad del suelo se determinó semanalmente por dispersión de neutrones, a profundidades de 0,1 a 2,30 m, de 20 en 20 cm, con un medidor de humedad Campbell Pacific Nuclear Inc. modelo 503DR<sup>2</sup> (1 tubo de acceso por parcela, conteos de 32 s a cada profundidad. El medidor se calibró previamente en el campo para los horizontes A, B y cálcico con coeficientes de determinación de 0,90, 0,96 y 0,97 respectivamente. Se aplicaron tres niveles de riego (33%, 67% y 100% del uso de agua del cultivo), pero el presente artículo se refiere sólo al nivel del 100%. A fin de calcular la dosis de riego necesaria para reemplazar el agua utilizada por el cultivo se utilizó un nivel de control de 0,333 m<sup>3</sup> de contenido promedio de agua en la capa superior de 1,5 m del suelo. Se utilizaron tratamientos de aplicación diaria y semanal del riego, pero consideramos aquí sólo la aplicación diaria. La investigación abarcó tres parcelas con 100% de riego por goteo en la superficie y otras tres con 100% de riego por goteo subterráneo a 0,3 m de profundidad. El modelo ENWATBAL se inicializó con el contenido de agua promedio medido en las parcelas a 100% el día 167 y con temperaturas medidas en un lisímetro gravimétrico cercano, que presentó condiciones de superficie similares en los meses previos al experimento. Las relaciones entre el contenido de agua del suelo y el potencial de agua del suelo y entre la conductividad hidráulica del suelo y el contenido de agua del suelo fueron las utilizadas por Steiner et al. (1989). La relación entre el albedo del suelo y el contenido de agua de la superficie del suelo (en los 0,008 m superiores) se desarrolló a partir de mediciones del albedo de suelo Pullman recién regado y secado al aire, respectivamente. En el modelo se describió el albedo como 0,11 del contenido de agua de 0,49 (saturado) a 0,25, y variando linealmente en proporción al contenido de agua desde 0,11 a 0,20 al bajar el contenido de agua de 0,25 a 0. La modelización se inició el día 166 y continuó hasta el día 246.

El modelo se modificó de modo que incluyera una fuente de goteo a una profundidad definida por el usuario. La descarga del emisor, de 2,27 l/h se convirtió a una lámina de agua

<sup>2</sup>Las marcas o nombres de fabricantes se mencionan sólo a título informativo, sin que ello implique aprobación, recomendación o exclusión alguna por parte del Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los EE.UU.

equivalente aplicada al área cubierta por un emisor (0,00362 m<sup>2</sup>). El riego se iniciaba diariamente a las 8:00, y el número de horas de aplicación de cada día era el necesario para suministrar 1/7 de la cantidad semanal requerida para llenar de nuevo la zona radicular hasta un contenido de agua de 0,333 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Ejecutamos el modelo para riego superficial y para riego subterráneo a 0,15 m y 0,30 m de profundidad.

Aunque el ENWATBAL es un modelo unidimensional, consideramos que podía aplicarse a nuestro problema debido a la baja conductividad hidráulica del suelo Pullman.

Los suelos de baja conductividad tienden a exhibir una mayor dispersión y un menor desplazamiento a profundidad del frente húmedo que los suelos más permeables, lo que es causa de que los frentes húmedos de goteros contiguos tiendan a unirse y conferir al volumen de suelo humedecido un carácter más unidimensional. Este enfoque es un tanto similar al modelo unidimensional de Van Bavel et al. (1973).

Los datos atmosféricos para el modelo se obtuvieron de una estación meteorológica situada inmediatamente al norte de las parcelas y comprendían promedios semihorarios de datos de radiación solar, velocidad del viento,

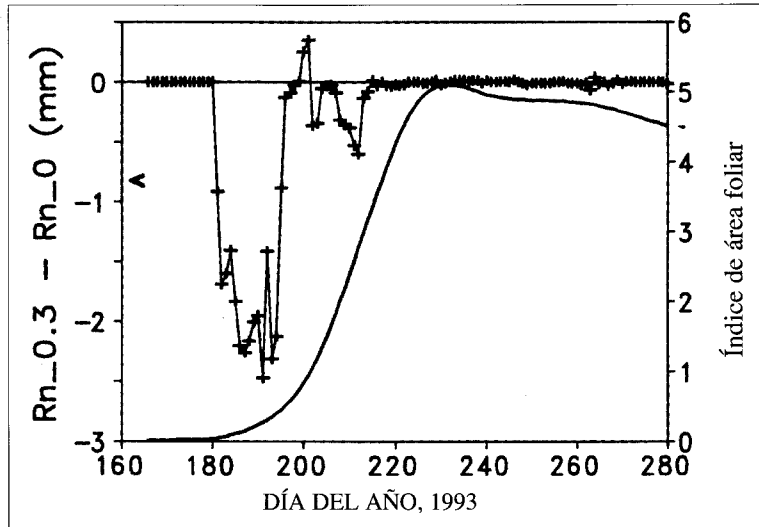


Figura 3. Radiación neta con goteo a 0,30 m de profundidad menos radiación neta con goteo superficial. La curva de LAI muestra que las diferencias en radiación se minimizaron al aproximarse el LAI a 3.

temperatura ambiente y temperatura del punto de rocío, medidos todos ellos a 2 m de altura sobre césped cortado. La precipitación se midió con un pluviómetro de cubeta basculante, con totalización semihoraria. El índice de área foliar (LAI) se determinó (3 repeticiones) en un maizal regado por máquina regadora de pivote tipo LEPA (Low Energy Precision Application [aplicación precisa a baja energía]), situada inmediatamente al norte de las parcelas de goteo. El campo regado por pivote se plantó un mes antes que las parcelas de goteo, de modo que la curva de LAI se ajustó a lo requerido por el ENWATBAL desfasándola en 30 días. Como profundidad de la zona radicular

se tomó la de plantación, incrementándola en 0.01 m d<sup>-1</sup> durante 100 días. Las simulaciones se iniciaron en el día 166, poco después de la germinación, y terminaron el día 280, bien pasado el máximo del LAI, de modo que las condiciones superficiales incluyeron básicamente suelo desnudo y cobertura foliar completa.

## RESULTADOS Y DISCUSION

El balance hídrico estacional puede expresarse como:

$$[1] \quad 0 = P - ET - D - R - \Delta S - \epsilon_w$$

donde P es el total de precipitación más riego, ET es la evapotranspiración (evaporación, E, más transpiración, T), D es el drenaje profundo, R es la escorrentía,  $\Delta S$  es la reducción del agua en el perfil y  $\epsilon_w$  es el error del balance (todo en mm). El riego y la precipitación sumaron 617 mm y 199 mm respectivamente. Las tasas de aplicación del riego se ajustaron de modo que se repusiese la humedad del suelo según lo necesario y que reflejaran los principales eventos de lluvia y el aumento del uso consuntivo en función del LAI (Fig. 1). Debido a que el cultivo estaba bien regado, la transpiración estacional (T) fue casi idéntica independientemente de la profundidad

This space left blank on purpose.

del emisor, con valores de T de 427 mm, 428 mm y 428 mm a profundidades de 0 m, 0,15 m y 0,30 m respectivamente (Cuadro 1). En cambio, la evaporación (E) con goteo en la superficie fue 81 mm mayor que con goteo a 0,30 m de profundidad y con goteo a 0,15 m de profundidad fue 30 mm mayor que con goteo a 0,30 m. Los distintos valores se reflejan en diferencias en la ET acumulada (Fig.2). Dado que el drenaje estimado era bajo, las diferencias en E dieron lugar a distintos perfiles de humedad del suelo, de modo que al final de la estación el perfil es más húmedo con goteo profundo que con goteo en la superficie (Cuadro 1). El agua almacenada al final de la temporada fue mayor en 69 mm y 48 mm con goteros a profundidades de 0,30 m y 0,15 m respectivamente que con goteo superficial. El drenaje, aunque limitado, fue mayor con goteros subterráneos que con los instalados en la superficie (12 mm y 8 mm con goteros a 0,30 y 0,15 m de profundidad respectivamente, frente a 0,6 con goteo superficial).

**Cuadro 1. Balance hídrico, días 166-280, 1993**

	Profundidad (m)		
	0	0.15	0.30
Pa	815.7b	815.7	815.7
ET	649.5	600.1	570.0
T	426.6	428.1	427.9
E	222.9	172	142.1
D	6.3	8.3	12.2
R	0	0	0
PETDR	159.9	207.3	233.5
ΔS	157.8	205.6	227.1
€w	-2.1	-1.7	-6.4
ΔS ref 0c	0	47.8	69.3
E ref 0	0	50.9	80.8
D ref 0	0	2	5.9

- a La ecuación 1 define P, ET, etc.  
 b Profundidad acumulada en mm.  
 c Referido a 0 m restando el valor correspondiente a la profundidad de 0 m.

La ET acumulada de 650 mm en 114 días para goteo en la superficie fue netamente mayor que la ET acumulada media de 591 mm registrada en 1989 (123 días) y de 610 mm registrada en 1990 (110 días) en mediciones en Bushand con dos lisímetros gravimétricos. Ello no es sorprendente,

ya que los riegos diarios mantenían la superficie del suelo constantemente húmeda. Es más, el total acumulado de 818 mm de riego más precipitación fue considerablemente mayor que los promedios de 632 mm y 634 mm anotados en 1989 y 1990 respectivamente. Al final de la temporada, la discrepancia entre los valores del contenido de agua del perfil medido y modelado era considerable. El modelo indicaba un drenaje reducido pero grandes aumentos del agua almacenada en el perfil el día 280: 158 mm, 206 mm y 227 mm para riego por goteo en la superficie y a profundidades de 15 y 30 cm respectivamente (profundidad del perfil: 2,1 m). La reducción medida del agua en el perfil fue de 2 mm y 6 mm en las parcelas de goteo superficial y subterráneo para la misma profundidad de perfil de 2,1 m (días 167 a 278). Esto significa que la ET o el drenaje fueron mayores que lo previsto. No es probable que la ET fuera mucho mayor que la prevista. Sin embargo, supusimos que los datos de LAI para el maíz regado por LEPA podían ajustarse para aplicarlos a nuestro maíz regado por goteo y ello pudo ser causa de errores en la estimación de la ET. Es posible que las características hidráulicas del suelo utilizadas fueran inexactas y causaran una subestimación del drenaje previsto. También es posible que se produjera un flujo importante por macroporos, que el ENWATBAL no modelizó correctamente. Los sistemas de drenaje en nuestros lisímetros gravimétricos han registrado fuertes impulsos de caudal en asociación con las copiosas lluvias producidas cuando el perfil del suelo estaba húmedo.

El balance energético de la superficie se modela por separado con el ENWATBAL para el suelo y para el follaje. En el presente estudio consideramos los términos del balance energético combinado de ambas superficies. La ecuación del balance energético es:

$$[2] \quad 0 = R_n + H + E + T + G + \epsilon E$$

donde  $R_n$  es la radiación neta,  $H$  es el flujo de calor sensible,  $E$  y  $T$  son las definidas más arriba,  $G$  es el flujo térmico del suelo y  $\epsilon E$  es un término de error. Todos los términos han sido convertidos a alturas de agua equivalentes en mm. En la ecuación 2, los flujos hacia la superficie son

positivos y los flujos desde la superficie, negativos.

Debido a que ET,  $R_n$  y  $G$  no se midieron en las parcelas de goteo, no es posible comparar directamente los valores medidos con los modelados. Restando la radiación diaria neta con goteo en la superficie de la radiación neta con el goteo a 0,30 cm se obtiene que las diferencias en la radiación modelada neta (convertida a altura de agua equivalente en mm) se dieron sólo antes de que el LAI superara el valor 3 (Fig. 3). Por tanto, la mayor parte de la diferencia en la ET estacional se anotó en el período de cobertura foliar parcial. Los gráficos correspondientes para E y H son muy similares y difieren sólo en la magnitud de las diferencias. Exceptuando pequeñas diferencias en  $G$ , la suma de  $H$  y  $R_n$  fue igual a  $E$ . Las diferencias diarias en  $G$  fueron siempre menores de 1 mm y las diferencias en  $T$  fueron siempre menores de 0,2 mm. Para todos los términos del balance energético, la diferencia entre el goteo superficial y el subterráneo siempre fueron menores de 0,1 mm después del día 220, cuando el LAI había aumentado a 4,2. Los valores de  $\epsilon E$  fueron insignificantes.

En resumen, el modelo ENWATBAL predijo una evaporación mucho mayor pero diferencias insignificantes en la transpiración en la comparación entre el riego por goteo superficial y subterráneo. Las diferencias se desarrollaron plenamente durante el período de cobertura foliar parcial y se relacionaron con la mayor humedad de la superficie del suelo en el riego de superficie. Se anotaron diferencias significativas previstas en la evaporación incluso entre el riego a 0,15 y a 0,30 cm de profundidad. El modelo preveía un drenaje escaso, pero el contenido de agua del perfil aumentó en 158 mm, 206 mm y 227 mm con el goteo en la superficie y a 0,15 cm y 0,30 cm de profundidad respectivamente. Como el cambio medido en el agua almacenada era de sólo algunos milímetros, es probable que se produjera una pérdida considerable por drenaje profundo durante el experimento. El estudio indica que en nuestras condiciones es posible ahorrar hasta el 10% del agua aplicada por estación instalando los goteros a 0,30 cm de profundidad en lugar de hacerlo en la superficie mediante el goteo subterráneo, la ET del riego por goteo quizás habría sido menor que la del riego por surco