

PROGRAMACIÓN AUTOMATIZADA EN TIEMPO REAL DEL RIEGO LOCALIZADO

Ignacio Llanos Triviño¹

RESUMEN: Se describen dos opciones de automatización del riego localizado mediante el control en tiempo real de dos variables operativas. La primera, utiliza la demanda evaporativa acumulada del aire medida en un evaporímetro clase A con sistema de recarga automática. La segunda, el potencial matricial del suelo medido con un tensiómetro convencional de cápsula cerámica porosa con indicador por columna de mercurio. Como sensores de control, para la E_o se han utilizado dos tipos, uno mecánico ($R^2 = 0.943$) y otro electrónico de capacitancia variable, con rango de 2 a 12 mm e histéresis del 10% de la distancia ajustada de captación ($R^2 = 0.949$). Para el control del potencial matricial, se ha utilizado un sensor electrónico inductivo como lector de la columna de mercurio. Se describe también, para controles multipunto del potencial del suelo, un tensiómetro multicapsular que estima el valor medio ($R^2 = 0.971$), y un sistema de registro continuo.

INTRODUCCIÓN

El riego proporciona a la planta el agua necesaria para su crecimiento y desarrollo. Por su escasez, por conveniencia para la planta y como protección del medio ambiente, el riego ha de aplicarse con la mayor eficiencia posible. Una de las alternativas para conseguirlo consiste en utilizar sistemas de riego con programación automática. Son sistemas que establecen el calendario de riegos de forma autónoma mediante la valoración continua de uno o varios parámetros o variables de control. Factores edáficos, como la humedad del suelo, meteorológicos, como la demanda evaporativa del aire, humedad relativa, temperatura, radiación, o agronómicos, como la temperatura de la masa vegetal, tamaño o color del fruto, flujo de savia, perímetro de tronco, pueden ser utilizados como indicadores para generar sistemas de riego por autocontrol.

Por la forma de gestionar el programa de riego, estos sistemas pueden clasificarse como:

1. *Sistemas de restitución o compensación*

2. *Sistemas de mantenimiento*

Los sistemas de restitución actúan compensando pérdidas prefijadas de agua en el suelo. Cuanto mayores sean esas pérdidas, mayores serán los intervalos entre riegos y la cantidad de agua a aplicar en cada uno de ellos. Las pérdidas prefijadas dependerán de la capacidad de almacenamiento de agua del suelo y del nivel aceptado de su agotamiento. Los sistemas de mantenimiento, por el contrario, tratan de estabilizar el contenido de humedad del suelo dentro de un determinado valor. Con estos sistemas, los intervalos entre riegos son cortos, y los volúmenes de agua manejados, pequeños.

De entre las posibles variables de control que pueden ser utilizadas, la demanda evaporativa del aire (E_o) para los sistemas de compensación, y el nivel de humedad del suelo para los sistemas de mantenimiento, son las más utilizadas debido a su eficacia contrastada, la divulgación generalizada de los conceptos en que se fundamentan y la relativa facilidad de manipulación.

Sistemas de automatización por control de la demanda evaporativa del aire

Son sistemas que establecen el calendario de riegos por control en tiempo real de la demanda evaporativa del aire, E_o (Doorenbos y Pruitt, 1976), acumulada. La medida de la E_o se puede realizar por métodos empíricos o instrumentales. El presente trabajo se limita a esta segunda opción, utilizando para ello la cubeta clase A del National Weather Service de Estados Unidos, sistema utilizado en numerosos países como patrón para estimar la evapotranspiración potencial (Shuttleworth, 1993).

El control de la E_o se puede efectuar mediante sistemas mecánicos o electrónicos, siendo numerosos los métodos sugeridos para automatizar la medida de la E_o en cubeta. Los trabajos de Phene y Campbell (1975), Burgess y Hanson (1981), Asrar y col. (1982) Stange (1994), Hanson. (1997), son una mínima muestra de ellos. Un sistema de control mecánico de la E_o con rango de medida ajustable es el que se puede ver en la *Figura 1*. Consta de una varilla de acero inoxidable de 1.5 mm de diámetro que se apoya sobre un flotador alojado dentro de un pocilio tranquilizador. Cuando el flotador desciende como consecuencia de la evaporación del agua en el evaporímetro, la varilla lo hace también. Cuando el ni-

¹ Centro de Investigación y Formación Agraria. Córdoba, e-mail: Ignacio@cifa.org

Artículo publicado en *Ingeniería del Agua*. Vol. 6 Num.2 (junio 1999), páginas 179-184, recibido el 30 de noviembre de 1998 y aceptado para su publicación el 7 de abril de 1999. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

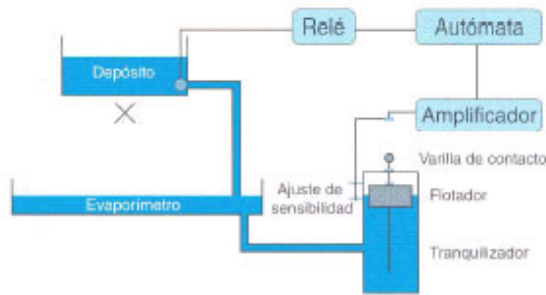


Figura 1. Componentes de un controlador de Eo por flotador y doble contacto para tanques de evaporación con recarga automática.

vel cae por debajo de un mínimo, se desconecta la varilla del flotador y se inicia la recarga. Al ascender el nivel, la varilla es empujada por el flotador y al contactar con el tope de máximo, y cesa el rellenado. Para minimizar la influencia del peso de la varilla sobre la línea de flotación del flotador, la masa de ésta debe ser muy pequeña en relación a la del flotador. En este diseño, con masas de 40 y 5 g respectivamente no se han observado desajustes. El ajuste de la sensibilidad (h) del control se realiza subiendo o bajando el tope de máximo. El calibrado en laboratorio para un ajuste de 1 mm, ha proporcionado una aceptable relación entre el valor teórico y el controlado ($R^2 = 0,943$).

Un equipo con control electrónico puede verse en la *Figura 2*. El elemento principal es un sensor capacitivo cuya distancia de detección en el modelo utilizado, puede ajustarse entre 2 y 12 mm, con una histéresis del 2 al 20% de la distancia de captación, que es el parámetro que se utiliza para la medición y que define la sensibilidad del equipo.

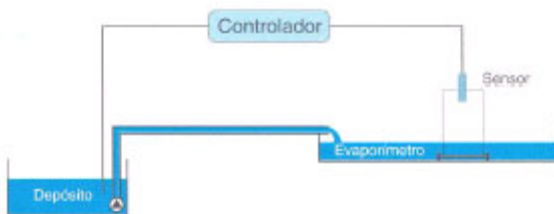


Figura 2. Componentes de un sistema de control de Eo por sensor capacitivo

El sensor está fijado por un soporte a un pocillo tranquilizador. Cuando el nivel desciende por debajo de la distancia de captación, se registra un pulso y se genera la recarga del tanque hasta alcanzar el nivel de referencia. La oscilación entre el máximo y mínimo nivel es del orden de 1 mm, y se controla por la histéresis del sensor que se varia modificando la distancia de captación. Por cada recarga se genera un pulso. Para aumentar la fiabilidad de la detección, el control de los pulsos se retarda durante un tiempo no crítico. Como normalmente se riega con un valor de Eo acumulada superior a la detectada

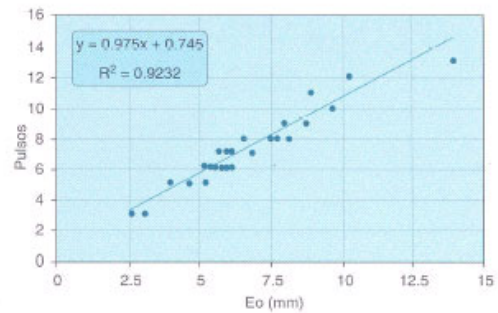


Figura 3. Comportamiento de un detector de nivel capacitivo con ajuste de sensibilidad de detección de Eo en mm en un tanque de evaporación con recarga automática. (Julio 1998. Chipiona. Cádiz)

por el sensor, es necesario acumular pulsos de Eo por medio de un contador antes de dar la orden de riego. En la *Figura 3* se puede ver el comportamiento del sistema.

Control del tiempo de riego

La duración del riego se puede controlar, *por medio del tiempo de recarga del evaporímetro, y utilizando controladores de tiempo.*

- El primer sistema (sistema solo utilizable en el control de tipo mecánico) consiste en hacer coincidir el tiempo de recarga del evaporímetro, una vez que se ha alcanzado la Eo (h) de ejecución, con el tiempo necesario de riego. El tiempo se ajusta por medio del caudal de recarga. Si se utiliza un microtubo, el caudal se ajusta, para una presión y diámetro interno determinado, variando su longitud. El organigrama de función puede verse en la *Figura 4*.

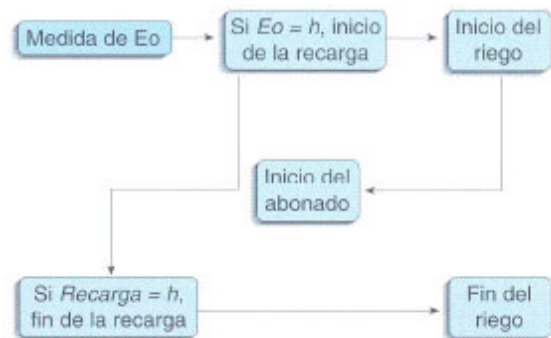


Figura 4. Automatismo de riego por control de la Eo , con temporización por recarga controlada

El caudal de recarga se determina mediante la *Ecuación 1* (Llanos y col, 1993):

$$Q = \frac{1.5nq}{k} \quad (1)$$

en donde: Q es el caudal de recarga en l/h; n, es el número de emisores por m²; q, el caudal por emisor

en 1/h; y k , un coeficiente que engloba a los distintos coeficientes que intervienen en el cálculo de las necesidades de riego.

Una ecuación bastante utilizada para el cálculo de la longitud del microtubo con sistemas bajo régimen laminar es la de Katri y col. (1979):

$$L = \frac{h \cdot d^{3,361}}{0,0074 \cdot Q^{1,253}} \quad (2)$$

en donde: L , es la longitud del microtubo en cm; Q , el caudal de recarga en 1/h; d , el diámetro interior en mm, y h , la presión de trabajo en m. Este sistema se puede utilizar como se ha indicado, solo en los controles de E_o de tipo mecánico. La exactitud de trabajo de este sistema de control de tiempo depende de la precisión del caudal de recarga. El factor más influyente en la precisión es la temperatura. Con diámetros de microtubo superiores a 0,9 mm la influencia es pequeña. Por ejemplo, con un diámetro interno de 1 mm, la variación del caudal es del 7% al pasar de 20 a 40°C. (Vermeiren y Jobling, 1986).

- b. Una forma más precisa de ajuste del tiempo de riego, válida para cualquier sistema de control de la E_o , consiste en utilizar un contador de tiempo con inicio por pulso externo (Figura 5). El pulso de inicio de temporización se produce cuando se alcanza la E_o de trabajo prefijada. El tiempo se ajusta en función de la E_o acumulada, de los coeficientes de corrección utilizados y del diseño de la instalación hidráulica según la Ecuación 3 (Llanos y col., 1993),

$$T = \frac{a \cdot b \cdot h \cdot K}{n \cdot q}$$

en donde: T , es el tiempo de riego en horas; a y b , se refiere al marco del cultivo en m; h , es el nivel de E_o acumulada para el riego en mm; K , coeficiente corrector función de los coeficientes generales de diseño; n , el número de emisores por planta, y q , el caudal del emisor en 1/h.

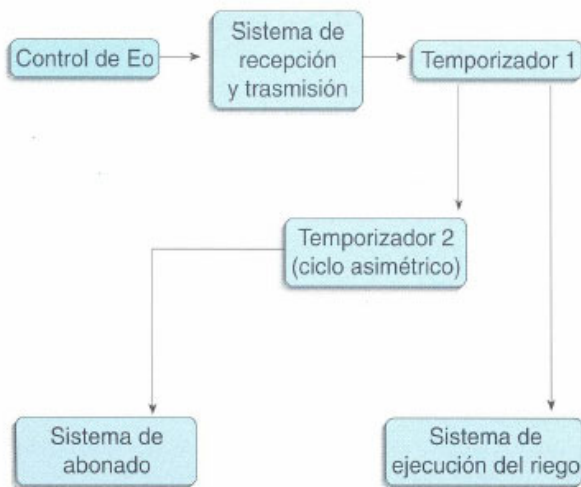


Figura 5. Automatismo por control de la E_o y temporización por reloj

La recarga del evaporímetro se realiza en este caso de forma directa e independiente de la duración del riego.

Sistemas de automatización por control del contenido de agua en el suelo.

Otro de los posibles sistemas de automatización es el que opera mediante el control directo del estado de energía del agua del suelo, tratando de mantener un valor estable. Richard, en 1928, desarrolló un sistema de valoración de este estado de energía basado en una cápsula cerámica porosa. Desde entonces, el tensiómetro basado en este método es el instrumento básico de control más generalizado, sin que equipos más modernos y complejos hayan conseguido desplazarlo. La causa de su permanencia y generalización de uso hay que buscarla en su simplicidad conceptual, sencillo funcionamiento, fácil instalación en campo y bajo precio. A estas cualidades habría que añadir su fácil adaptación a sistemas fiables de automatización y de medida continua de la evolución del potencial matricial del agua en el suelo. Un automatismo por control del potencial del suelo pretende mantener un valor constante de humedad en la zona de detección. El control se realiza de forma continua, y las órdenes de riego se generan cuando se detecta un valor inferior al determinado.

Un equipo de este tipo consta (Figura 6) de un tensiómetro al que se conecta un elemento lector y un controlador.

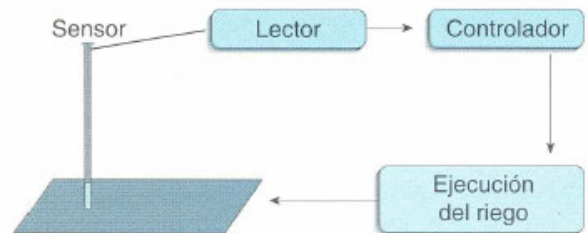


Figura 6. Componentes de un sistema de riego con programación por contenido de humedad en el suelo

Los lectores más utilizados son los de columna de mercurio y los transductores de vacío. En los primeros, el sistema se conecta en circuito cerrado por medio de un microtubo a un depósito que contiene mercurio. Al alcanzarse el equilibrio de potencial se produce, en condiciones normales, una depresión que obliga al mercurio a ascender por el microtubo. En los segundos, el tensiómetro se conecta a un transductor de vacío, el cual genera una señal eléctrica variable con el contenido de humedad. Tanto los lectores por columna de mercurio como por transductor pueden utilizarse para el control en tiempo real del potencial matricial, y con los componentes adecuados, generar sistemas de automatización.

De los posibles controladores del riego, se suelen utilizar dos dependiendo del elemento lector. Para los lectores de columna de mercurio, han dado muy buenos

resultados los controladores por sensor de *tipo inductivo*, que activan la salida operativa por medio de un relé amplificador cuando el sensor detecta la columna de mercurio. El ajuste del potencial de mantenimiento, se realiza situando el sensor a una altura determinada en el microtubo de succión, de acuerdo con la *Ecuación 4*:

$$H = \frac{h_1 - 10 \cdot T + 13,6 \cdot h_2}{12,6} \quad (4)$$

en donde, *H*, es la altura de colocación del sensor controlador de la columna de mercurio desde el suelo en cm; *T*, la tensión matricial de mantenimiento en kPa; *h*₁, la profundidad de la cápsula respecto a la superficie del suelo en cm, y *h*₂, la altura desde el suelo de la superficie libre del mercurio, en cm.

Cuando se utiliza el transductor de vacío como elemento lector, este genera una salida eléctrica de voltaje o intensidad, proporcional al estado del potencial, señal que es detectada por un relé amplificador que actúa de controlador. El ajuste del potencial de mantenimiento se realiza en el propio relé, iniciando el riego cuando la señal alcanza un valor establecido.

El tiempo de riego, que en este caso lo controla el propio sistema, será el necesario para restablecer el estado de humedad original en la zona de control.

Control multipunto del potencial de agua del suelo

El sistema de gestión del riego por tensiometría exige una crítica elección del punto de control de humedad ya que, si éste no es representativo, pueden producirse errores importantes de aplicación. En grandes áreas, o cuando el medio es heterogéneo, se suele compartimentar la zona de riego, instalando en cada uno de los sectores un punto de control de humedad para una gestión del riego independiente.

En pequeñas parcelas, una solución para minimizar los efectos de esta situación limitante puede consistir en operar con el valor medio de la lectura simultánea de una serie de puntos próximos representativos. Este control puede realizarse mediante un tensiómetro multicapsular (Llanos, 1987), que consiste en *n* cápsulas porosas conectadas entre sí por medio de un depósito de regulación, del que sale un único microtubo conectado al depósito de mercurio (*Figura 7*). La lectura que se obtiene puede considerarse el valor medio de los puntos controlados. En la *Figura 8* se muestran los resultados de un sistema con tres cápsulas y longitudes de microtubo entre los tensiómetros y el depósito de regulación de 2 m.

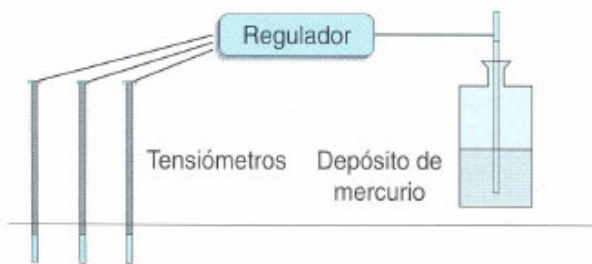


Figura 7. Esquema de un tensiómetro multicapsular

Cuando lo que se pretende es controlar de forma simultánea el potencial en puntos cuyas distancias al depósito regulador supera la distancia prudencial de dos o tres metros, se requieren unidades tensiométricas independientes. En este caso, para regar sobre la base del promedio de las lecturas, es necesario centralizar la información transmitiendo el estado de cada unidad a una estación central por medio de conexiones eléctricas, o por radio, si esto no fuese posible. Las órdenes de riego se pueden producir cuando el potencial medio de las estaciones o el de los valores individuales en cada una de ellas alcanzan un valor determinado.

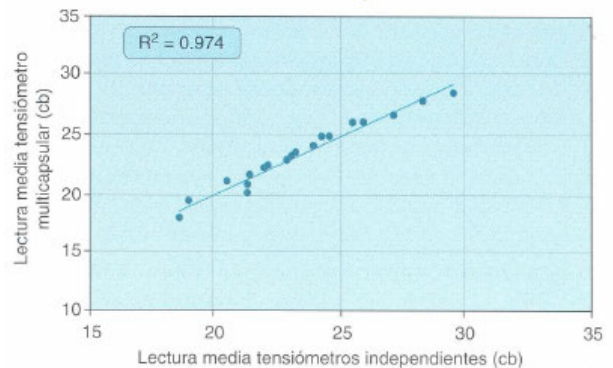


Figura 8. Resultados de un control de potencial matricial con tensiómetro tricapsular vs. media de tres tensiómetros convencionales

Si se desea conocer de forma continua la evolución en el tiempo del contenido de humedad en un punto, se puede utilizar el transductor de vacío, registrando periódicamente el valor de salida en un colector de datos.

A veces, es necesario conocer esta evolución en varios puntos de forma simultánea, por ejemplo, a distintas distancias de la planta, del emisor o profundidades, para medir el flujo del agua en el suelo (Atteia y col., 1993).

En estos casos, una alternativa a la instalación costosa y complicada de unidades repetitivas e independientes, consiste en un control de tipo secuencial del valor leído por *n* tensiómetros conectados a un único transductor.

En la *Figura 9* se detalla la organización de los componentes del sistema. Se puede ver como cada unidad tensiométrica se conecta a una electroválvula de vacío y las salidas de estas se unen entre sí por medio de un colector a un único transductor de vacío. La salida eléctrica del transductor se canaliza a las distintas entradas del colector de datos por medio de los relés correspondientes de comunicación.

La principal ventaja de este sistema es que permite, con un único transductor, controlar un número variable de puntos. El número máximo de puntos de control lo establece el número de entradas analógicas del registrador, su capacidad de memoria y la frecuencia de los registros

El sistema se puede controlar por un operador programable, cuya secuencia de trabajo para, por ejemplo, tres puntos sería la siguiente:

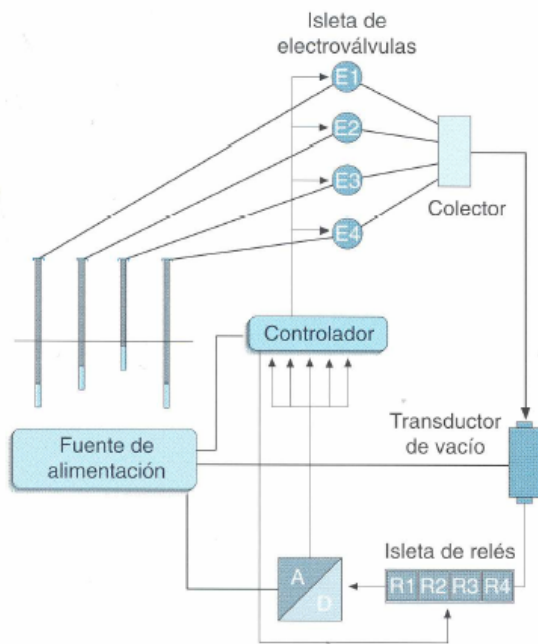


Figura 9. Sistema de control de humedad multipunto.

1. Se abre la electroválvula $E1$ y se activa el relé $R1$ para conectar la salida del transductor al colector de datos por el canal CI ;
2. Transcurrido un tiempo TE (tiempo de equilibrio), se toma lectura y se almacena en memoria;
3. Se cierra la electroválvula $E1$, se desactiva el relé $R1$, se abre la electroválvula $E2$ y se activa el relé $R2$;
4. Transcurrido un tiempo TE , se toma lectura y se almacena en memoria;
5. Se cierra la electroválvula $E2$, se desactiva el relé $R2$, se abre la electroválvula $E3$ y se activa el relé $R3$;
6. Transcurrido un tiempo TE , se toma lectura y se almacena en memoria;
7. Al cabo de un tiempo TI (tiempo de intervalo), se reinicia el ciclo.

El tiempo de operación TE debe ser tal que permita restablecer las situaciones originales de equilibrio tras la apertura de las electroválvulas. Estos tiempos dependerán principalmente del tipo de suelo y potencial matricial. La longitud del microtubo y su diámetro también son factores influyentes. Como valor orientativo, puede considerarse un tiempo de 40 minutos para un suelo franco y valores del potencial matricial entre 30-60 kPa. (Cresswell, 1993)

CONCLUSIONES

De entre las posibles opciones de automatización del riego, los sistemas que actúan por control en tiempo real de variables de suelo o clima son los que permiten establecer sistemas más precisos de planificación y control de las operaciones de riego y, por lo tanto, pueden permitir alcanzar mayores eficiencias de aplicación.

De entre las diversas opciones, los sistemas fundamentados en el control de la E_o , tanto de forma continua con sensores de tipo mecánico, como de forma discreta mediante acumulación de fracciones de E_o , con sensores electrónicos de tipo capacitivo, o del potencial matricial del suelo con sensores de tipo inductivo han demostrado un comportamiento fiable y preciso.

Al tensiómetro convencional se le ha achacado siempre la excesiva puntualización de la zona de control. Los sistemas de control por medio del tensiómetro multicapsular, o de barrido secuencial utilizando un único transductor de vacío para el control histórico y multipunto del potencial matricial del suelo, se presentan como alternativas a otros sistemas más costosos y limitados, o a la compleja instalación repetitiva de unidades tensiométricas independientes.

REFERENCIAS

- Asrar, G., R. J. Kunze y D. E. Linvill. (1982) *Automating a class A evaporation pan for semi-continuous recording*. Agrie. Meteorology, 25(4), 275-281.
- Atteia, O y J. P. Dubois. (1993) *Automatic acquisition of data from tensiometers with mercury manometers*. Soil. Sci. Soc. Am. J. 57:689-690.
- Burgess, M. D. y C. L. Hanson. (1981). *Automatic class A filling system*. J. Hydro. Eng., 50 (1/3), 389-392.
- Cresswell, H. P.. (1993) *Evaluation of the portable Pressure transducer technique for measuring field tensiometers*. Aust. J. Soil Res., 1993, (31), 397-406.
- Doorenbos, J. y W. O. Pruitt. (1976) *Las necesidades de agua de los cultivos*. Estudios FAO Riego y drenaje n° 24. Roma.
- Hanson, C. L.. (1997) *Time and level controlled filling system for class A evaporation pans*. J. Hydro. Eng., (2) 1,37-38.
- Katri, K. C., I-Pai Wu, M. ASCE, H. M. Gitlin y A. L. Phillips, (1979) *Hydraulics of microtube emitters*. J. Irrig. Drain. Div. ASCE, vol. 105: 163-173.
- Llanos, I.(1987) *Un tensiómetro multicapsular*. VI Jornadas Técnicas sobre Riegos. AERYD. Barcelona. España.
- Llanos, I, M. López y J. Mósig. (1993) *Comportamiento comparado de dos sistemas autoprogramados de riego*. 23 Conf. Int. Mecan. Agr. Zaragoza.
- Phene C. J. y C. R. B. Campbell. (1975) *Automating pan evaporation measurements for irrigation control*. Agrie. meteorology, 15(2), 181-191.
- Richards, L. A..(1928) *The usefulness of capillary potential to soil moisture and plant investigators*. J. Agrie. Res. 37, 719-42
- Stange, K. V.. (1994) *Automating evaporation pan readings using low-cost componenets*. ASAE Paper n° 94-2163, Am. Soc. of Agrie. Engrs., St. Joseph, Mich.

Shuttleworth, W. J.. (1993) Evaporation. Handbook of hydrology, D. R. Maidment, ed., McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, N.Y., 4.1-4.53.

Vermeiren, L. y G. A. Jobling. (1986) Riego localizado. Estudios FAO Riego y drenaje n° 36. Roma.