



Jornadas sobre "Ambiente y Riegos: Modernización y Ambientalidad"

Curso 5 - Manejo del riego: uso de instrumentos de medición de agua del suelo y del estado hídrico de los cultivos, presentación de casos de estudio incluso en riego deficitario

Manejo del riego: uso de instrumentos de medición de agua del suelo y del estado hídrico de los cultivos, presentación de casos de estudio incluso en riego deficitario

Mario García Petillo

*Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. mgarciap@fagro.edu.uy**

Resumen:

Se presentan los principales equipamientos disponibles actualmente para medir el contenido de agua del suelo y el estado hídrico de los cultivos, haciendo en cada caso una breve introducción de los principios de funcionamiento involucrados, una somera descripción de los aparatos, y un análisis de las ventajas y desventajas que presenta cada uno, buscando en todos los casos hacer un uso más eficiente del riego.

Palabras clave: automatización del riego, contenido de agua en el suelo, estado hídrico de los cultivos, fitomonitoreadores, programación del riego.

1. Introducción

La programación del riego se puede hacer basada en el balance hídrico del suelo realizado a partir de la estimación de la evapotranspiración (ETc) de los cultivos, o a partir de medidas del contenido de agua del suelo y/o del estado hídrico de las plantas. Estrictamente, esas dos metodologías no son contradictorias sino que, por el contrario, para una correcta programación del riego ambas deberían combinarse.

Los métodos para determinar el contenido hídrico de los suelos y los cultivos permiten ajustar tanto las dosis de riego como los momentos de aplicación, logrando de esa manera hacer un uso más eficiente del agua de riego, mejorando la respuesta de los cultivos, ahorrando agua y energía, y como consecuencia de lo anterior, mejorando la rentabilidad de los agricultores y aumentando la sustentabilidad ambiental de las prácticas de riego.

En este artículo se presenta primero una clasificación de las principales metodologías para medir el agua en el suelo y en las plantas. Luego, por cuestiones de extensión del mismo, sólo se desarrollarán aquellas que se considera que son las de mayor utilidad para la programación del riego.

2. Clasificación de las metodologías de monitoreo del agua

i. Medidas en el suelo

i.1. Medidas del contenido de agua

- a) Método gravimétrico
- b) Sonda de neutrones

* La realización de este trabajo está basada en los seminarios presentados por los estudiantes de los años 2006 y 2008 del curso "Sistemas de Riego", de la Maestría en Ciencias Agrarias de la Facultad de Agronomía, Uruguay

- c) Reflectometría en el dominio del tiempo (TDR)
- d) Reflectometría en el dominio de las frecuencias (FDR)
- e) Atenuación de rayos gamma

i.2. Medidas del potencial del agua

- a) Tensiómetros
- b) Psicrómetros de suelo
- c) Bloques de resistencia eléctrica
- d) Sensores de matriz granular

i.3. Determinaciones subjetivas

ii. Medidas en la planta

ii.1. Medidas del contenido de agua

- a) Contenido relativo de agua

ii.2. Medidas del potencial hídrico

- a) Potencial hídrico foliar
- b) Potencial xilemático
- c) Psicrometría de termocupla
- d) Método de coloración de Shardakov

ii.3. Medidas indirectas del estado hídrico

- a) Temperatura de la cubierta
- b) Conductancia estomática
- c) Flujo de savia
- d) Cavitación
- e) Efecto Doppler
- f) Dendrometría

ii.4. Apreciaciones visuales

3. Descripción de las principales metodologías de monitoreo del agua

Sonda de neutrones

Principios de funcionamiento - La sonda de neutrones opera con el principio de la termalización nuclear. Los neutrones emitidos a gran velocidad por una fuente radioactiva, al chocar con iones hidrógeno de similar masa que se encuentran en el suelo se termalizan, esto es, pierden energía cinética y se convierten en neutrones lentos. Éstos son detectados por un sensor, que sólo reconoce los neutrones lentos. Los neutrones termalizados se cuentan durante un periodo de tiempo predeterminado y dicha "cuenta" o lectura es proporcional al contenido de hidrógeno del suelo. En el suelo, la mayor fuente de hidrógeno es el agua, por lo que hay una estrecha relación entre la lectura de la sonda y el contenido de humedad del suelo. Sin embargo, el agua no es la única fuente de hidrógeno, especialmente en los suelos con un alto contenido de materia orgánica. También es afectada la lectura por altas concentraciones de Cl, B, Fe, Cd, Li y Mo. Por lo anterior, la sonda debe ser calibrada para cada suelo y horizonte. El radio de influencia de la sonda es inversamente proporcional al contenido de agua en el suelo. En suelos húmedos la esfera de influencia es de 10 cm de diámetro en cambio en suelos secos es de hasta 50 cm.

Descripción del equipo Está constituido por una fuente radioactiva generalmente de Americio-241:Berilio, un detector de neutrones lentos, un contador electrónico, un sensor que contiene la fuente radioactiva y el detector de neutrones y una batería que abastece de energía al sistema electrónico de la sonda. A su vez se requiere para la utilización de la sonda la instalación de tubos de acceso para bajar el sensor hasta las profundidades de interés para realizar las mediciones. Los tubos de acceso deben estar sellados en el fondo para evitar la entrada de agua y en su extremo superior deben estar protegidos por una tapa. El material más utilizado para los mismos es el aluminio, pero debido a su alto costo, también se utilizan tubos de PVC.

Operación en el campo

- 1) Antes de comenzar a tomarse las medidas en el campo siempre se debe hacer una lectura estándar, debido a que la emisión de neutrones puede ser afectada por las condiciones climáticas, principalmente la temperatura. La lectura estándar siempre debe hacerse con el sensor dentro de la carcasa de la sonda y ésta siempre debe estar dentro de la caja protectora o sobre la misma de acuerdo a la indicación del manual.
- 2) Una vez realizada la lectura estándar se procede a tomar las medidas de humedad para cada profundidad. Las unidades de medición se pueden modificar según el modelo y marca del aparato.
- 3) El tiempo de cada lectura se puede prefijar, en la medida que se utiliza un mayor tiempo la lectura es más precisa. Generalmente tiempos entre 8 a 30 segundos son utilizados en mediciones de rutina.
- 4) Se debe verificar previamente a tomar las medidas que el tubo de acceso esté sin agua. De lo contrario se debe evacuar la misma, para evitar dañar el sensor.

Calibración - La misma debe realizarse cubriendo un amplio rango de humedad, desde el suelo muy seco hasta condiciones de saturación. Se obtiene una relación lineal entre la relación de cuentas medida en la sonda y la humedad del suelo determinada gravimétricamente.

Ventajas

- Es un método no destructivo en comparación con el método gravimétrico.
- Se pueden tomar medidas en un mismo punto a lo largo del tiempo.
- Es un método preciso en la medida que sea correctamente calibrado.
- Permite tomar medidas por horizonte.
- El volumen de suelo muestreado es mayor en comparación con otros métodos de medición de la humedad.
- No es afectado por bolsas de aire alrededor de los tubos.
- Es portátil por lo que se presta para múltiples puntos de medición, abarcando grandes superficies.

Desventajas

- ◆ Las medidas realizadas a menos de 15 cm de profundidad no son fiables, ya que se produce una fuga de neutrones en la interfase suelo-aire.
- ◆ Debe ser calibrada para cada suelo y horizonte.
- ◆ El personal debe estar adecuadamente capacitado para su utilización, ya que se está manipulando material radioactivo.
- ◆ La lectura es manual. No puede utilizarse para automatizar el riego.

- ◆ Alto costo del aparato.

Caso de estudio - García Petillo y Castel (2007) utilizaron la sonda para realizar el Balance Hídrico, definir los patrones de mojado, medir la evapotranspiración y calcular los coeficientes de cultivo (Kc) de un huerto de cítricos.

Métodos basados en la medida de la constante dieléctrica

La constante dieléctrica de un material es una medida de la capacidad (o permeabilidad eléctrica) de un material no conductor de transmitir ondas o pulsos electromagnéticos de alta frecuencia. La constante dieléctrica de un suelo seco varía entre 2 y 5, mientras que la constante dieléctrica de agua es de 80. Cambios relativamente pequeños en la cantidad del agua libre en el suelo tienen grandes efectos sobre las propiedades electromagnéticas del medio suelo-agua. Por lo anterior, la medida de la constante dieléctrica del medio suelo-agua es una medida sensible del contenido de agua del suelo. Dos métodos han sido desarrollados para medir la constante dieléctrica del medio suelo agua y de esta manera el contenido volumétrico de agua. Estos son, reflectometría en el dominio tiempo (TDR) y reflectometría en el dominio de las frecuencias (FDR).

Reflectometría en el dominio del tiempo (TDR)

Principios de funcionamiento - Un sistema TDR consiste en un osciloscopio conectado a dos o tres varillas metálicas que se insertan paralelas en el suelo. Si se aplica una diferencia de potencia a un extremo de las varillas, la energía se trasmite a lo largo de las mismas hasta su extremo, donde son reflejadas hacia el osciloscopio. En el mismo se mide la evolución del potencial a lo largo del tiempo. La velocidad de transmisión de la onda en el viaje de ida y vuelta depende de la constante dieléctrica (K) del suelo que rodea las varillas, a través de la siguiente expresión:

$$K = \left(\frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (1)$$

c: velocidad de la luz

t: tiempo de la propagación de la onda

L: largo de las varillas

Descripción del equipo - Consta de dos partes principales: la unidad electrónica, y las guías de onda. La unidad electrónica contiene el osciloscopio y el procesador central, el cual controla todas las funciones de medición, visualización, y almacenaje. Las guías de onda pueden ser instaladas en forma horizontal o vertical y quedar permanentemente en el suelo para poder hacer medidas periódicas en la misma localización o utilizarse en forma portátil. Las barras pueden ser 2 o 3 con lo cual registra un mayor volumen de suelo y miden entre 10 cm hasta 2 m, aunque generalmente no pasan de 60-70 cm. El TDR utiliza una serie de tablas de conversión para convertir la constante dieléctrica a un porcentaje de humedad en el suelo. Hay diferentes tablas de conversión para ser usadas con los distintos tipos de guías de onda. No es necesario tener una tabla distinta para los diferentes tipos de suelos ya que la constante dieléctrica depende más de la cantidad de agua que de los otros componentes del suelo. El aparato calcula el valor promedio de la humedad sobre la longitud total de las guías de onda. Permite tomar medidas manuales, utilizando tanto sensores fijos como portátiles, o medidas continuas conectando sensores fijos a un data-logger.

Ventajas

- Es exacto en estimar el contenido de agua volumétrico (1% a 2% de error).
- Se pueden hacer medidas manuales o continuas, por lo que permitiría automatizar el riego.

- Es mínima la alteración del suelo.
- La lectura de humedad es independiente de la temperatura, densidad del suelo y composición mineral del mismo, por lo que no es necesario calibrarlo.
- Resistentes, estables y requieren poco mantenimiento.
- No son radiactivos, no requiere permiso de utilización
- Permite lecturas de horizontes superficiales

Desventajas

- ◆ Alto costo del instrumento.
- ◆ Disminuye su precisión en condiciones de salinidad o saturación de agua.
- ◆ La instalación debe realizarse cuidadosamente y es dificultosa a profundidades mayores de 30 cm.
- ◆ La medida es el promedio en toda la longitud de las varillas.

Caso de estudio - Carlesso *et al.* (2007) utilizaron el TDR para estimar las pérdidas de agua por evaporación directa desde el suelo, en un sistema en siembra directa, en función del nivel variable de rastrojo dejado por el cultivo sobre el suelo.

Reflectometría en el dominio de las frecuencias (FDR)

Principios de funcionamiento - El FDR también es conocido como sonda de capacitancia. Los electrodos y el suelo adyacente forman un condensador cuya capacidad es función de la constante dieléctrica del suelo. Ésta se relaciona empíricamente con el contenido volumétrico de agua. Un oscilador de alta frecuencia (>150 Mhz) opera con el suelo (dieléctrica) formando parte de un capacitor ideal, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$C = K \epsilon_0 A/s \quad (2)$$

La constante dieléctrica (K) se relaciona con la capacitancia (C) a través de la relación del área total del electrodo (A) y el espaciamiento de los electrodos (s), siendo que ϵ_0 , la permeabilidad del espacio libre, es constante.

Descripción del equipo - Un sensor de capacitancia está compuesto de electrodos enterrados en el suelo, un oscilador electrónico, un frecuencímetro, y cables conectores. Cada sensor de la sonda esta constituido por dos anillos metálicos que actúan como placas o armaduras de un condensador, cuyo campo electromagnético se extiende por el suelo que lo circunda. Existen varios diseños de estos equipos. Según su geometría, los electrodos pueden ser enterrados en el suelo, instalados en el extremo de una sonda y hundidos en el suelo, o insertados dentro de un tubo de acceso.

Equipos fijos (EnviroSCAN) - Permanecen todo el tiempo en el campo, dentro de tubos de acceso de PVC que son herméticamente sellados. La sonda es retirada del tubo de acceso únicamente para su mantenimiento o cambio de configuración de los sensores. Admiten varios sensores a diferentes profundidades, con una separación mínima de 10 cm entre ellos. Los datos son registrados a intervalos de tiempo fijados previamente y se almacenan en un datalogger del cual luego son transferidos a un procesador de datos. Este tipo de sondas es recomendado en el caso de monitoreo continuo de la humedad del suelo, cuando se quieren conocer los patrones de consumo de los cultivos o conocer la dinámica del agua en el suelo.

Equipos portátiles (Diviner 2000) - Es totalmente portátil y fácil de trasladar. Permite medidas en varios sitios sin restricción de distancia entre ellos. Deben instalarse tubos de acceso de PVC en cada sitio a evaluar. Poseen un sistema que permite al sensor de la sonda reconocer profundidades cada 10 cm. Los datos son visualizados en una pantalla o se

almacenan para luego transferirse a un procesador de datos. Se utiliza cuando se requiere monitorear mucha superficie y en el caso de brindar servicios a regantes.

Calibración - Se requiere la calibración de la sonda para cada suelo y horizonte para su uso en la programación del riego. El volumen de suelo medido no es dependiente del tipo de suelo o del contenido de agua y se aproxima a un cilindro 10 cm de alto con un diámetro de cerca de 25 cm, asumiendo que no hay espacios con aire. Correctamente calibrada y con una instalación cuidadosa del tubo del acceso, la exactitud de la sonda es buena.

Ventajas

- En las sondas fijas, medidas continuas y tiempos de respuesta rápida, lo que permite automatizar el riego.
- Repetibles en las mismas localizaciones y profundidades
- Medición de todo un volumen de suelo alrededor de cada sensor y no sólo del que esta en contacto con el sensor.
- Medidas a diferentes profundidades
- Permite monitorear la humedad del suelo, conocer patrones de consumo, zonas de mayor extracción radicular.
- Resistentes, estables y requieren poco mantenimiento.
- No son radiactivos, no requiere permiso de utilización
- Permite lecturas de horizontes superficiales

Desventajas

- ◆ Alto costo
- ◆ Dificultosa instalación del tubo de acceso de la sonda.
- ◆ Presencia de materiales extraños, piedras o grietas en el suelo dificultan las medidas
- ◆ Requieren calibración para cada suelo y horizonte.

Caso de estudio - Díez *et al.* (2005) utilizaron sondas FDR para optimizar el manejo del riego en un cultivo de maíz y disminuir la lixiviación de nitratos al acuífero.

Tensiómetros

Descripción del equipo y principios de funcionamiento - Consiste de una cápsula de cerámica porosa, en su extremo inferior, conectada a través de un tubo rígido, con un vacuómetro (manómetro de vacío). Todos estos componentes deben estar llenos con agua. La cápsula actúa como una membrana permeable al flujo del agua y los solutos y es construida generalmente de cerámica. El cuerpo del tubo es normalmente transparente lo que permite observar fácilmente las condiciones en las que se encuentra el agua dentro del tensiómetro. El registro de las lecturas de potencial del agua en el suelo pueden realizarse mediante vacuómetros en los tensiómetros manuales o mediante transductores de presión, en los tensiómetros electrónicos, que envían la señal a un data-logger en el cual las lecturas quedan almacenadas cada intervalos de tiempo definidos. Al instalar el tensiómetro en el campo, la cápsula (saturada de agua) debe quedar en contacto firme con el suelo a la profundidad a la que se desea obtener la medida, garantizando un buen contacto hidráulico entre la cápsula y el suelo. Si el suelo no está saturado, el menor potencial del suelo provocará una succión del agua situada en el cuerpo del tensiómetro, generando un vacío dentro del aparato, el cual es detectado en el vacuómetro. Cuando ese vacío producido se equilibra a la succión del suelo, el agua deja de fluir y el vacuómetro registra una medida directa de la fuerza requerida para remover el agua del suelo, o sea de la energía que debería ser ejercida por la planta para

extraer el agua desde el suelo. Si el suelo se seca más, más agua se moverá hacia afuera hasta que se alcance un nivel de vacío más alto. Si se humedece el suelo, se da el proceso opuesto. El agua es devuelta al tensiómetro a través de los poros de la punta de cerámica reduciendo el vacío hasta llegar al equilibrio, en este punto el movimiento de agua se detiene. Si el suelo llega a estar extremadamente seco, el aire entra al sistema provocando "cavitación" de la columna de agua en el tubo y el instrumento deja de funcionar. Este hecho se produce a tensiones de 70 – 80 kPa.

Instalación - Previo a la instalación, cada tensiómetro debe ser testeado para asegurar un funcionamiento correcto. Deben llenarse con agua limpia y permitir que permanezcan en posición vertical en un recipiente con agua algunas horas para que la copa de cerámica se sature. Se deben eliminar las burbujas de aire, pudiéndose utilizar para ello una bomba de vacío manual. La instalación en el campo requiere realizar perforaciones en el suelo hasta la profundidad deseada y de un diámetro similar al del cuerpo del tensiómetro. El vacuómetro debe quedar de 5 a 7 cm por encima de la superficie del terreno. El suelo alrededor del instrumento debe ser apisonado en la superficie para sellar el mismo, evitando el contacto del aire con la cápsula porosa y prevenir que el agua superficial escurra por los alrededores del tubo. Las lecturas deberán ser corregidas en función del largo del tensiómetro, restándole 1 kPa cada 10 cm de longitud.

Ventajas

- Precio reducido (es relativo dado que c/u cuesta más de U\$S 100 y se necesitan varios para que las medidas sean representativas)
- Medida directa del potencial del agua en el suelo con buena exactitud en el rango de alta humedad en el suelo. (0 – 80 kPa)
- No son afectados por el potencial osmótico de la solución del suelo.
- Su lectura se puede automatizar con transductores de presión y un equipo registrador.
- Fácil instalación

Desventajas

- ◆ Mantenimiento frecuente: reposición del agua luego de períodos secos, control de crecimiento de algas, controlar funcionamiento de los vacuómetros, etc
- ◆ Los vacuómetros no son muy precisos, sí lo son los transductores de presión
- ◆ Dan una lectura de potencial, no del contenido de humedad. Para tener esa información se debe construir la curva tensión-humedad del suelo.
- ◆ El fenómeno de histéresis puede producir errores en las lecturas según se hagan durante el secado o mojado del suelo.
- ◆ Trabajan sólo en el rango de 0-80 kPa, por lo que su uso se restringe a sistemas de riego de media a alta frecuencia.

Bloques de yeso

Descripción del equipo y principios de funcionamiento - Consiste en dos electrodos paralelos o concéntricos introducidos en un bloque de material poroso, generalmente yeso (CaSO_4) u otro material, por ej. fibra de vidrio. Cada electrodo está unido a un cable, cuyo extremo se deja por encima de la superficie del suelo. La resistencia entre los electrodos se mide con un ohmiómetro portátil. Ésta variará con el contenido de agua en el bloque de yeso, la cual dependerá directamente de la tensión de agua del suelo. El agua en los poros del bloque disuelve algo del yeso (suficiente para hacer una solución saturada de sulfato de calcio) lo que provee un ambiente fijo para los electrodos, independiente de la salinidad del suelo en el cual

el bloque esté instalado. El yeso tiene características similares a una arcilla muy pesada, con poros muy pequeños que no comienzan a perder agua hasta cerca de 30 KPa de tensión. Para suelos arenosos, más de la mitad del agua disponible para el cultivo ya ha sido agotada a esos niveles de tensión. Sin embargo estos dispositivos funcionan relativamente bien en suelos de texturas finas y pueden ser usados en un amplio rango de tensiones, desde cerca de 30 hasta 1500 kPa.

Ventajas

- Precio reducido, permitiendo muchas repeticiones
- Lecturas continuas y rápidas
- Permite automatización de los registros, almacenar lecturas continuas en un data-logger
- Medidas in situ, no destructivos
- No requieren mantenimiento en el corto plazo

Desventajas

- ◆ La salinidad del suelo (>2 dS/cm) introduce errores en las lecturas
- ◆ Valores confiables a partir de 80-100 kPa, no son buenos para rangos de humedad cercanos a capacidad de campo.
- ◆ Errores en lecturas consecuencia del efecto de histéresis
- ◆ Requieren calibración y ésta varía con el tiempo
- ◆ Corta vida útil (se disuelven en 1 a 3 años)
- ◆ Es difícil precisar la exactitud de las medidas debido a las muchas fuentes de error (calibración, materiales, instalación, etc.). Los errores varían de 2-100%

Sensores de matriz granular

Descripción del equipo y principios de funcionamiento - Han sido desarrollados más recientemente (fueron patentados en 1985 y fabricados comercialmente desde 1989) y operan con el mismo principio que un bloque de yeso, se mide la resistencia eléctrica entre dos electrodos introducidos en un pequeño cilindro compuesto de un material poroso. Cada dispositivo se encuentra recubierto por una membrana que consiste en un acoplamiento de acero inoxidable cubierto externamente por una goma que hacen al sensor más duradero que el bloque de yeso. Watermark es uno de los nombres comerciales de este tipo de sensores. Son sensores que miden valores de resistencia eléctrica. Sin embargo, el registrador viene calibrado para dar el valor en tensión de agua, mediante una ecuación que toma en cuenta la temperatura del suelo estimada o medida cerca del sensor. A pesar de lo anterior, para un óptimo uso de los sensores Watermark se recomienda que sean calibrados para el suelo en el cual serán usados. El tamaño de los poros en la matriz es mayor que la de los poros en los bloques de yeso, permitiendo mayor sensibilidad en el rango más húmedo de contenido de agua en el suelo. También son capaces de trabajar en un rango más amplio que los tensiómetros (desde 10 a 200 KPa) y no requieren mantenimiento.

Ventajas y desventajas - Siendo similares a los bloques de yeso, tienen la ventaja sobre aquellos que funcionan bien en contenidos mayores de humedad, y que no se disuelven en el suelo, por lo que su vida útil es mayor. En contraposición, son significativamente más caros.

Cámara de presión (cámara de Schölander)

Descripción del equipo y principios de funcionamiento - Los principales componentes de la cámara son: una cámara de acero donde es presurizada la muestra vegetal, un balón cargado con gas a presión, generalmente N₂, una llave de paso que permite la circulación de gas hacia

la cámara, un manómetro para hacer las lecturas y llave para despresurizar la cámara luego de realizada la medición. El valor del potencial hídrico foliar depende del balance entre las tasas de ganancia y pérdida de agua a través de la transpiración. El potencial se puede determinar antes del amanecer (pre dawn), y entonces este valor representa el equilibrio de la planta con el contenido de agua del suelo. También se puede determinar durante el día, y en este caso el potencial depende además del contenido hídrico del suelo, de los factores ambientales que regulan la transpiración. Otra técnica es determinar no el potencial foliar sino el potencial xilemático. Para ello se cubre la hoja con un film impermeable para evitar la transpiración, y por encima del mismo se envuelve con papel de aluminio, para reflejar la radiación solar. Se corta la hoja y se mide en forma similar, sin quitarle las dos envolturas. En este caso se mide el potencial en el xilema del brote y no en el xilema de la hoja. Por ello, estas determinaciones tienen menos variabilidad.

Procedimiento a campo

- 1) Se debe desprender la hoja de la planta a evaluar, una vez extraída la hoja se corta en forma recta el pecíolo con un instrumento muy filoso.
- 2) El pecíolo con su extremo cortado se inserta a través de la empaquetadura (tapón de goma), que está ubicado en el centro de la tapa de la cámara. El extremo del pecíolo debe quedar sobresaliendo unos pocos mm en el exterior de la tapa de la cámara, quedando el resto de la hoja en el interior de la cámara.
- 3) Se debe ajustar la empaquetadura (tapón de goma) cuidadosamente a efectos de evitar pérdidas de gas.
- 4) Una vez colocada la tapa con la muestra dentro de la cámara se procede a inyectar lentamente gas al interior de la misma. Se continúa hasta observar en el extremo del pecíolo una gota de agua, este momento corresponde al llamado "punto final". La lectura registrada en ese momento en el manómetro corresponde al potencial hídrico de la hoja. Es conveniente utilizar una lupa para observar la muestra.
- 5) Una vez obtenida la lectura se debe despresurizar la cámara para continuar con una nueva medición y repetir nuevamente el procedimiento.

Una vez que se extrae la hoja de la planta inmediatamente debe ser preparada y determinado su potencial, a efectos de evitar una deshidratación de la muestra y subestimar el valor de potencial hídrico. Nunca se debe recolectar todas las muestras de las plantas a evaluar y posteriormente determinar su potencial hídrico.

Ventajas

- Se tiene una medida del estado hídrico de la planta y no del suelo.
- Puede utilizarse para el monitoreo y manejo de riego.
- Es muy útil cuando se manejan estrategias de Riego Deficitario Controlado
- El equipamiento es muy robusto, exento de problemas de calibración o similares.

Desventajas

- ◆ La medida obtenida no es de interpretación directa, por representar un balance
- ◆ No permite la automatización del riego

Caso de estudio - García Petillo y Castel (2004) utilizaron la Cámara para evaluar la respuesta de naranjos "Valencia" a diferentes tratamientos de riego.

Temperatura del cultivo: termómetro infrarrojo

Principios de funcionamiento - En el balance energético diario de los cultivos, las ganancias de energía están dadas por la radiación procedente del sol y otros cuerpos cercanos, mientras que las pérdidas de energía se dan a través de la transpiración (λE), convección (G y H) y radiación por parte de la hoja, lo que se puede describir con la siguiente ecuación:

$$R_n = G + H + \lambda E + R_h \quad (3)$$

Donde:

R_n: radiación neta ($W m^{-2}$)

G: flujo de calor bajo la canopia ($W m^{-2}$)

H: flujo de calor sensible desde la canopia hacia el aire ($W m^{-2}$)

λE : flujo de calor latente ($W m^{-2}$)

R_h: energía radiada por la hoja ($W m^{-2}$)

La radiación emitida por la hoja se caracteriza por estar compuesta principalmente por la parte infrarroja del espectro, y su magnitud depende de la temperatura de la hoja. Esto se expresa en la ley de Stefan-Boltzmann, la cual postula que la cantidad de energía emitida por un cuerpo es función de la cuarta potencia de su temperatura absoluta:

$$Q = e \sigma T^4 \quad (4)$$

Donde:

Q : cantidad de energía radiada (cal)

e : emisividad (e=1, para un cuerpo negro; e = 0.95-0.98 para una superficie vegetal verde)

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($cal cm^{-2} min^{-1} \text{ } ^\circ K^{-4}$)

T : temperatura absoluta ($^\circ K$)

Es decir, cuando la temperatura de una hoja expuesta a la luz solar se eleva, la energía radiante que emite también se incrementa, pero en una mayor magnitud. La escasez de agua en el suelo, causa que las plantas transpiren a una tasa menor que la demanda evaporativa de la atmósfera, generando un calentamiento de la hoja, debido a que disminuye el efecto refrigerante de la transpiración. Basados en la ley de Stefan-Boltzmann, se desarrollaron sensores capaces de determinar a distancia la temperatura de los cuerpos, midiendo la cantidad de radiación infrarroja proveniente de ellos. El desarrollo de estos instrumentos de teledetección térmica llamados termómetros infrarrojos, permitió mejorar y fomentar el estudio de las relaciones temperatura foliar-estrés hídrico.

Descripción del equipo - La óptica del instrumento recoge la muestra de radiación infrarroja desde el objeto caliente a ser medido, la focaliza en el pequeño sensor de radiación infrarroja que la convierte en una señal eléctrica proporcional análoga a la radiación infrarroja entrante (por lo tanto de la temperatura del objeto). Esta señal es amplificada y linearizada cambiando la relación T⁴-radiación en una relación perfectamente lineal voltaje-temperatura. La temperatura aparece en el display. Los termómetros infrarrojos son precisos, la temperatura del aire no afecta las medidas y tienen un amplio rango de acción (de $-30^\circ C$ a $+100^\circ C$). Existen distintas relaciones distancia/tamaño del objeto de medición (ej 50:1; 60:1;12:1). En las mediciones con largas distancias se estará midiendo una superficie mayor. Esto es algo que a veces no se desea, de ahí que se prefiera una relación distancia/tamaño lo más alta posible. En algunos catálogos esta característica se expresa como campo de visión (FOV) y se mide con el ángulo del cono cuyo vértice coincide con el sensor. Los ángulos de campo de visión varían entre 0.1° y 50° para los distintos modelos. Para mediciones en plantas se usan

termómetros con campos de visión con ángulos entre 4° y 15°. Existen modelos con emisividad seleccionable y con emisividad fija (0.95).

CWSI (Crop Water Stress Index ó Índice de Estrés Hídrico de los Cultivos) - Las primeras aproximaciones para determinar un indicador del estado hídrico de la planta a partir de la temperatura de la canopia, resultaron tener una gran cantidad de factores ambientales y de la planta involucrados, de forma que se hacía muy difícil su interpretación y aplicación en terreno. Con el fin de solucionar este problema, muchos investigadores plantearon diferentes modelos, para poder utilizar la temperatura de la canopia con fines prácticos, como la programación de riego. Uno de los más reconocidos es el CWSI, el cual se define como:

$$CWSI = \frac{\Delta T - \Delta T_{\min}}{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}} \quad (5)$$

donde:

ΔT : diferencia de temperatura entre el cultivo y el aire.

ΔT_{\min} : diferencia de T cultivo recién regado y T del aire.

ΔT_{\max} : diferencia de T cultivo con máximo estrés (las plantas no transpiran) y T del aire.

Si $CWSI=0$ entonces no existe estrés hídrico, mientras que si $CWSI=1$, el grado de estrés alcanzado por el cultivo es el máximo posible. El CWSI se relaciona con la tasa de transpiración mediante la siguiente expresión:

$$CWSI = 1 - Tr/Tr_{\max} \quad (6)$$

Donde Tr y Tr_{\max} son las tasas real y máxima de transpiración, respectivamente.

En general el valor de CWSI para el que hay que regar está en torno a 0.25, dependiendo de la especie y su etapa de desarrollo. Para el cálculo del CWSI es necesario disponer de una porción del cultivo regada siempre en exceso para poder medir ΔT_{\min} y de otra porción donde la transpiración sea nula, para medir ΔT_{\max} . Un método alternativo consiste en calibrar localmente la relación entre ΔT_{\min} y el déficit de presión de vapor (dpv), y medir dpv cada vez que se desea calcular el CWSI. La relación $\Delta T_{\min} = f(\text{dpv})$ se denomina línea base y es de la forma:

$$\Delta T_{\min} = a + b * \text{dpv} \quad (7)$$

donde a y b son coeficientes de regresión obtenidos empíricamente. Por otra parte, el límite máximo puede obtenerse a partir de la expresión:

$$\Delta T_{\max} = a * (1 - b * s(T_a)) \quad (8)$$

donde $s(T_a)$ es la pendiente de la curva de presión de vapor en saturación para la temperatura del aire. De donde se desprende que la línea base superior es independiente del dpv, es decir, el valor de ΔT estaría dado por intercambios de energía por radiación y convección.

Procedimiento a campo

- Las medidas se tomarán apuntando el sensor con el sol a la espalda
- La temperatura y la humedad del aire deben ser medidas a 0.5 - 1m sobre la superficie del cultivo, evitando los bordes de la parcela
- La lente debe ser limpiada periódicamente.
- Se calibrará el aparato al menos una vez por año con un cuerpo negro estándar.
- La emisividad de la superficie vegetal verde se debe fijar entre 0,95 y 0,98.

- Se debe establecer la distancia y el ángulo al que se sostiene el sensor con respecto al objetivo, de manera de no medir parte del suelo, el horizonte u otro cultivo.
- Es recomendable tratar de medir hojas expuestas directamente al sol.

Ventajas

- Bajo costo
- Portátil y lecturas rápidas

Desventajas

- ◆ La medida obtenida no es de interpretación directa, debe calcularse el CWSI.
- ◆ No permite la automatización del riego

Porómetro

Principios de funcionamiento - El principio general de la porometría consiste en medir la resistencia que genera una superficie porosa al pasaje de gases. En este caso se trata de medir la resistencia que efectúan los estomas (a través de su grado de apertura) a la difusión de vapor de agua hacia la atmósfera. Cuanto mayor es la resistencia estomática, menor va a ser la conductividad, lo cual implica en todos los casos una relación inversa como forma de cálculo de la conductividad en términos absolutos.

Descripción del equipo - En general constan de un procesador, la memoria para almacenar los datos, la batería, la bomba de aire y la pinza con sensores que se prende a la hoja. Existen varios sistemas para medir la resistencia estomática dependiendo de la tecnología utilizada por el fabricante:

Cíclico o Dinámico (Delta-T AP4) - Este instrumento funciona midiendo el tiempo que le toma a la hoja en liberar suficiente vapor de agua para elevar el contenido de humedad relativo (a valores predeterminados) dentro de una cámara donde fue inyectado aire seco. Esta cámara o copa posee sensores de humedad y temperatura. Las mediciones de este instrumento son muy afectadas por las diferencias de temperatura que pueden existir entre la cámara y la superficie de la hoja, que a su vez puede ser modificada por la propia colocación del instrumento sobre la hoja en relación a su estado imperturbado.

Flujo continuo (PP Systems PMR-5; Li-Cor LI-1600) - Este equipo consiste en un sistema abierto para medir la transpiración de las hojas. Para ello la mordaza consta de una cámara donde ingresa un flujo de aire continuo cuya humedad relativa puede ser graduada a valores ambientales. A su vez la temperatura de la hoja dentro de la cámara puede ser equiparada también a valores ambientales ya que consta de ventiladores, fuente de calor y ventanilla para radiación solar. Sensores de humedad y temperatura miden estos parámetros en el aire que entra y sale de la cámara. A través de esta información, calcula y archiva los valores de conductancia estomática.

Flujo masal (CSIRO-Thermoline) - Este tipo de porómetro consiste en una mordaza con una cámara de un lado hacia donde se inyecta una cantidad fija de aire, a una presión prefijada, a un reservorio ubicado en dicha cámara. Luego al dar una orden este aire es liberado hacia la zona que encierra la superficie de la hoja y es medido el tiempo en que la presión cae entre dos valores predeterminados. De esta forma, la conductancia estomática sería inversamente proporcional al tiempo de caída de presión. Este método supone la difusión de aire a través de la hoja, lo cual lo hace mayormente adecuado para especies en las cuales la frecuencia estomática es similar en ambas caras de la hoja. Se destaca por su rápida operación.

Calibración - Se debe realizar la utilizando la placa de calibración que viene con el equipo, utilizando un papel de filtro humedecido. La placa tiene seis posiciones, cada una de ellas

consiste en orificios con resistencia conocida. Se mide en cada posición la resistencia y el equipo compara los valores obtenidos con los esperados, y realiza un análisis estadístico para determinar el error de la curva obtenida. Frente a un error mayor al 10% se debe volver a realizar la calibración. También se deberá calibrar nuevamente el equipo cada vez que existan cambios importantes en la presión atmosférica y de temperatura ambiente.

Ventajas

- Método muy práctico para el uso en el campo y de rápida operación.
- Su utilización aparece mayoritariamente dirigida a programas de investigación donde se evalúa el impacto de diferentes condiciones de stress hídrico.

Desventajas

- ◆ Alto costo del aparato
- ◆ Presenta dudas acerca de la veracidad de los datos obtenidos debido a cuestiones tecnológicas que pueden no estar reflejando el verdadero valor de la apertura estomática.
- ◆ Sus medidas no son de utilización directa para tomar decisiones acerca del riego
- ◆ No permite la automatización del riego

Dendrómetros

Principios de funcionamiento - Durante el día, cuando la transpiración supera la capacidad de las raíces de proporcionar agua a la planta, los tejidos se deshidratan y el tallo de las plantas se encoge. Durante la noche al cesar la transpiración se produce un gradual aumento del diámetro del tallo hasta que se alcanza un grado de hidratación máximo al amanecer. Estas variaciones son de tamaño micrométrico. Puesto que el diámetro de estos órganos depende de dos componentes, el propio crecimiento de éstos y la pérdida de agua, existen variaciones continuas a lo largo del día, encontrándonos cada 24 horas con un máximo y un mínimo de grosor. A esta variación se le llama contracción, y las contracciones anormales nos indican un estrés del árbol. A medida que disminuye la disponibilidad de agua del suelo como consecuencia de la extracción de la planta, la amplitud de la contracción diurna aumenta y la expansión nocturna decrece pudiendo llegar a ser nulo e incluso negativo. La utilización de dendrómetros para determinar el momento a partir del cual regar no utiliza un valor umbral definido. El diámetro del tronco oscila en ciclos de 24 h, alcanzando valores máximos (MXDT) antes del alba y mínimos (MNDT) durante la tarde. La diferencia entre estos valores extremos se conoce como máxima contracción diaria (MXC). La evolución de los valores del MXDT y MNDT también suministra información de utilidad. Concretamente, la diferencia entre dos valores consecutivos del MXDT informa de la tasa diaria de crecimiento del tronco (CMXDT), y la consideración de los valores del MXDT en un determinado período informa del crecimiento acumulado. El MNDT refleja el efecto combinado del suministro de agua desde el suelo y la demanda evaporativa sobre la máxima contracción, mientras que el MXDT resulta afectado por los procesos de rehidratación, los cuales dependen esencialmente del suministro de agua desde el suelo y sólo de manera indirecta de la demanda evaporativa del día precedente.

Descripción del equipo - Las medidas micrométricas de las variaciones del diámetro del tronco se realizan usando sensores de desplazamiento variable y respuesta lineal (LVDT - "Linear Variable Differential Transformer) de alta precisión, que transforman desplazamiento en voltaje. Los dendrómetros son unidos al tronco mediante unas abrazaderas de invar, una aleación de acero y níquel con un coeficiente de dilatación prácticamente nulo.

Ventajas

- Permiten medir en tiempo real y en forma automática.
- En muchos trabajos experimentales, la máxima contracción del tronco aparece como un indicador muy adecuado del estado hídrico de las plantas.
- Permite automatizar los riegos

Desventajas

- ◆ Alto costo
- ◆ No tiene un valor umbral a partir del cual regar, sino que es necesario una interpretación calificada de la información.

Caso de estudio - Vélez Sánchez (2004) evaluó dendrómetros para automatizar el riego en mandarinas "Clementina de Nules" con resultados muy promisorios.

Medición del flujo de savia

Existen diversos métodos para medir el flujo de savia.

Método del pulso de calor

Principios de funcionamiento y descripción del equipo - Esta técnica utiliza una sonda de calor, inserta en el tronco de la planta, que inyecta un pulso de calor por un corto período de tiempo (normalmente menor a 2 segundos) en el tejido conductor de la planta. Este pulso de calor puede luego ser utilizado para inferir la tasa de ascenso de agua mediante el uso de sondas de monitoreo de temperatura, insertadas de forma asimétrica en el tronco, una ubicada 5 mm por encima y la otra 10 mm por debajo de la sonda de calor. Esta distribución espacial de las sondas de monitoreo compensa por los procesos de difusión de calor y permite que la convección sea aislada y medida. Por esta razón a veces se refiere al método como "método de compensación". Las determinaciones que utilizan el pulso de calor como indicador del flujo de savia se basan en la conducción y convección de calor en un medio homogéneo e isotrópico. La solución analítica de la ecuación de variación de la temperatura en el tiempo tiene en cuenta las densidades de la madera fresca y la savia, el calor específico de ambas, la conductividad térmica en las direcciones axial y tangencial, el área de la sección del xilema ocupada por cursos de savia y la cantidad de calor interno liberada por la sonda de calor. También se ha desarrollado un método alterativo en el cual se mide el tiempo que transcurre para el aumento máximo de temperatura registrado por un solo sensor ubicado a 40 mm aguas abajo (más arriba en el tronco) de la sonda que emite el calor. En estos métodos se asume que no hay efecto de las sondas en la medida de flujo de calor. En realidad hay interferencia en la convección de calor por la presencia de la sonda de emisión de calor y de las que miden temperatura, y por la ruptura del tejido xilemático, produciendo una subestimación de la velocidad del flujo de calor. Estos métodos miden la velocidad del pulso de calor. Para relacionar esta medida con el flujo de savia, se utiliza la siguiente ecuación:

$$J_s = (kF_M + F_L) V \quad (9)$$

Donde:

J_s = densidad del flujo de savia

F_M es la fracción ocupada por madera

F_L es la fracción ocupada por agua.

El factor $k = 0.441$ está relacionado a las propiedades térmicas de la matriz de la madera con respecto al agua.

Instalación - Para instalar correctamente este equipo se deben tomar una serie de precauciones: determinar la profundidad del tejido de conducción para instalarlo en el xilema y no en la corteza, alinear bien las sondas, antes de insertarlas cubrirlas con fungicida, cambiarlas de lugar periódicamente por el efecto que puedan causar las heridas provocadas en las mediciones. No ubicarlas en madera muerta o nudos. Se deben instalar a primera hora, con flujo débil, para evitar embolias. Previa a la instalación testear las sondas de calor en un tronco seco (sin flujo de savia) y desechar las que dan resultados con diferencia mayor a 1,5 % del promedio.

Método de calor constante

Principios de funcionamiento y descripción del equipo - Se insertan dos sensores, cada uno con una resistencia y un termopar. Éstos se conectan en serie, por lo que se mide diferencia de temperatura entre ellos. Sólo se calienta la sonda superior, a potencia constante. Cuanto menor es la diferencia de temperatura entre ambas sondas, mayor es el flujo de savia.

Instalación - Se deben tomar las mismas precauciones que para el método anterior.

Método del balance de calor

Principios de funcionamiento y descripción del equipo - Este método fue propuesto para medir el flujo de savia en plantas herbáceas y se conoce como balance de calor del tallo (stem heat balance - SHB). Está basado en el balance de energía de un segmento del tallo al cual se le suministra energía calórica regulada por un calentador anular externo. El método SHB es más conocido por el nombre de la marca comercial "Dynagage". Éste consiste en un calentador flexible, un termopar que mide la pérdida de calor radial y pares de termocuplas que miden las diferencias axiales de temperatura. Los sensores y el calentador están montados sobre un substrato de corcho y ubicados dentro de un anillo de material aislante blanco. Una vez que el sensor es ubicado en la superficie del tallo, tanto el sensor como los sectores del tallo arriba y debajo del sensor se cubren con material aislante para minimizar la interferencia térmica que podría causar el ambiente. Se suministra constantemente energía al calefactor desde una fuente. Se mide la energía que entra y la que sale de una sección de tronco para determinar la cantidad de calor transportado por convección por el flujo ascendente de savia. El flujo de savia se calcula en base al transporte de calor radial y convectivo en el xilema y a la temperatura de la savia. Se trata pues, de un método absoluto que proporciona el flujo de savia en el xilema en términos de masa por unidad de tiempo. El sistema se conecta a un microprocesador digital que convierte automáticamente las señales de microvoltaje en medidas calibradas de flujo de savia. El microprocesador integrado guarda en la memoria la información para la calibración específica: tipo de tallo, tamaño, resistencia al calentamiento, frecuencia de medición y suministra un voltaje regulado al Dynagage. Se venden comercialmente sistemas para distintos diámetros de tallo.

Ventajas

- Las medidas se toman automáticamente y permitirían la automatización del riego
- Aunque no se conozcan los coeficientes para la especie se puede programar el riego a partir de variaciones en la velocidad del flujo de savia.

- Cuando se conocen los coeficientes de corrección de las lecturas de velocidad para la especie estudiada, se puede obtener directamente el valor del volumen de agua evapotranspirado por las plantas.

Desventajas

- ◆ El tejido conductor de la especie tiene que ser homogéneo para que los datos sean precisos.
- ◆ Deben conocerse los parámetros de la especie vegetal en cuanto a coeficientes de corrección de la velocidad
- ◆ Para los métodos de T-máx y compensación debe conocerse el tiempo de interferencia de las heridas provocadas por la inserción de sondas en el tejido de la planta en las medidas, para saber cuándo es necesario cambiar las sondas de lugar.
- ◆ La velocidad del flujo de savia no debe ser muy baja, pero tampoco mayor a 3 mL/h.
- ◆ En plantas leñosas, para conocer el radio del cambium y el radio de la zona no activa del xilema es necesario cortar un árbol, y hay variabilidad entre árboles.
- ◆ La cantidad de plantas monitoreadas es acotada a la cantidad de sondas disponibles.

Caso de estudio - Moreno *et al.* (2006) han medido la evapotranspiración en olivos utilizando medidas del flujo de savia, y han desarrollado un primer prototipo de controlador automático del riego basado en dichas medidas, que actualmente se encuentra en fase de prueba.

4. Conclusiones

La somera descripción de equipos y metodologías realizada permite tener una visión del futuro más o menos cercano, con sensores monitoreando permanentemente el estado hídrico de los cultivos y el nivel de humedad de los suelos, enviando la información recogida a un ordenador que la procesa y que le indica al equipo de riego cuándo regar cada sector y durante cuánto tiempo, de forma de lograr la respuesta óptima de los cultivos, ahorrando agua y energía, y conservando el ambiente libre de contaminación.

Sin embargo para que esta visión se concrete, aún faltan etapas que cumplir y dificultades que superar. Las lecturas de los sensores no son de utilización directa, sino que generalmente se precisa interpretarlas, y para hacerlo correctamente es que es necesario profundizar las investigaciones en estos temas. Otro problema es que los sensores en sí mismos son generalmente muy caros para estar al alcance de la mayoría de los agricultores, y que aún no tienen muchos de ellos la robustez necesaria para funcionar correctamente en situaciones de producción. Finalmente, existe el problema de la variabilidad espacial, tanto entre diferentes plantas como entre diferentes puntos del suelo, lo que obligaría a una multiplicación del número de sensores para tener medidas realmente representativas de toda la plantación.

5. Bibliografía

- Carlesso, R, Michelon, CJ, Petry, MT, Spohr, RB, Dalla Santa, C, De David, G, 2007. Perdas de água por evaporação no sistema de cultivo plantio direto com diferentes níveis de palha. III Congresso Internacional de Riego y Drenaje Cuba-Riego 2007.
- Creighton, J, Sleeper, D, Hubbard, C, 1989. Tensiometers for irrigation scheduling in a Florida Citrus Grove. Proc. Fla. State Hort. Soc. 102:69-72
- Daozhi Gong, Shaozhong Kang, Lu Zhang, Taisheng Du, Limin Yao, 2006. A two-dimensional model of root water uptake for single apple trees and its verification with sap flow and soil water content measurements. Agricultural Water Management 83:119–129.
- Díez, JA, Arauzo, M, Hernáiz, P, 2005. Optimización del riego mediante sondas de capacitancia y su efecto sobre la lixiviación de nitrato. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo, Vol. VII pp 9-14.

- Edwards, WRN, Warwick, NWM, 1984. Transpiration from a kiwifruit vine as estimated by the heat-pulse technique and the Penman-Monteith equation. *N.Z. J. Agric. Res.* 27:537-543.
- García Petillo, M, 2002. Respuesta a diferentes manejos del riego y balance hídrico de un huerto de cítricos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. 194 p.
- García Petillo, M, Castel, JR, 2004. The response of Valencia orange trees to irrigation in Uruguay. *Spanish Journal of Agricultural Research.* Vol. 2(3)429-443.
- García Petillo, M, Castel, JR, 2007. Water balance and crop coefficient (Kc) estimation of a citrus orchard in Uruguay. *Spanish Journal of Agricultural Research.* Vol. 5(2), 232-243.
- Ginestar, C, 1995. Efectos del estrés hídrico en distintos periodos fenológicos en plantaciones de cítricos jóvenes regadas por goteo. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior Ingenieros Agrónomos. 183 p.
- Goldhamer, DA, Fereres, E, 2004. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrigation Science* 23:11-19.
- Gratacos, E, Gurovich, L, 2003. Uso de la técnica del fitomonitor como indicador del estado hídrico del kiwi y su uso en riego programado. *Cien.Inv. Agr.* 30(2):113-137.
- Green, S, Clothier, B, Jardine, B, 2003. Theory and Practical Application of Heat Pulse to Measure Sap Flow. *Agron. J.* 95:1371-1379.
- Hatton, TJ, Catchpole, EA, Vertessy, RA, 1990. Integration of sapflow velocity to estimate plant water use, *Tree Physiology*, vol. 6, pp. 201-209.
- Hatton, TJ; Vertessy, RA, 1990. Transpiration of plantation *Pinus radiata* estimated by the heat pulse method and the Bowen ratio, *Hydrologic Processes*, vol. 4, pp. 289-298.
- Hoekstra, P, Delaney, A, 1974. Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. *Journal of Geophysical Research* 79:1699-1708.
- Kanemasu, ET, Thurtell, GW, Tanner CB, 1969. Design, Calibration and Field Use of a Stomatal Diffusion Porometer. *Plant Physiol.* 44:881-885
- Marshall, DC, 1958. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiol.* 33: 385-396.
- McJannet, D, Fitch, P, 2004. A flexible and easily constructed heat pulse system for monitoring sapflow in trees. CSIRO Land and Water Technical Report No. 39/04. ISSN 1446-6171.
- Moreno, F, Ortuño, MF, García-Orellana, Y, Conejero, W, Ruiz-Sánchez, MC, Alarcón, JJ, Fernández, JE, Martín-Palomo, MJ, Torrecillas, A, 2006. Investigaciones sobre programación del riego en limonero y olivo mediante medidas directas y continuas del estado hídrico. En: Taller "Políticas y estrategias para el uso del agua en la agricultura en Iberoamérica" Red de Riegos de CYTED, México.
- Noborio, K, 2001. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: A review. *Computers and Electronics in Agriculture* 31:213-237.
- Orta, AH, Erdem, Y, Erdem, T, 2003. Crop Water Stress Index for Watermelon. *Scientia Horticulturae* 98. 121-130
- Pérez-López, D, Moriana, A, Ribas, F, de Juan, A, Olmedilla, N, 2007. Efectos climáticos sobre el crecimiento y contracción del tronco del olivo. XI Congreso SECH. Albacete 2007. Actas de Horticultura N° 48. Sociedad Española de Ciencias Hortícolas. Pag 817-820.
- Pettinellia, E, Cereti, A, Galli, A, Bella, F, 2002. Time domain reflectometry: Calibration techniques for accurate measurement of the dielectric properties of various materials. *Review of Scientific Instruments* 73:3553-3562
- Rahkonen, J, Joketa, H, 2003. Infrared Radiometry for measuring Plant Leaf Temperature during Thermal Weed Control Treatment. *Biosystems Engineering* 86 (3), 257-266.
- Ramos, C, Castel JR, Gómez de Barreda, D, 1988. Some aspects on the use of the neutron probe in irrigation and evapotranspiration studies. *Acta Horticulturae* 228.
- Rebetzke, GJ, Read, JJ, Barbour, MM, Condon, AG, Rawson, HM, 2000. A hand-held porometer for rapid assessment of leaf conductance in wheat. *Crop Sci.* 40:277-280
- Reich, PB, Walters, MB, Tabone TJ, 1988. Variation in response of five identical steady-state porometers. *Plant, Cell & Environment* 11(8):785-786

- Rius García, X, 1996. La sonda de neutrones en la programación de riegos y el manejo de cultivos: Una experiencia australiana. *Fruticultura Profesional* N° 76.
- Robinson DA, Jones, SB, Wraith, JM, Or, D, Friedman, SP, 2003. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurements in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal* 2:444-475.
- Sánchez, R, Pezzola, N, 1996. Correlación entre las lecturas de humedad volumétrica del suelo utilizando tubos de acceso de aluminio y policloruro de vinilo, con sonda de neutrones. XV Congreso Argentino de la ciencia del suelo.
- Selles van Schouwen, G, Ferreira, R, Ahumada, R, 2008. Riego en uva de mesa. *Redagráfica Edición* N° 6.
- Smajstrla, AG, Koo, RC, 1986. Use of tensiometers for scheduling of citrus trickle irrigation. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 99:51-56.
- Tapias Pantebre, JC, Salgot de Marçay, M, Casas Ponsati, A, 2001. Utilidad de la técnica TDR para la medida de la variación espacial y temporal de la humedad del suelo en campos de golf. *Edafología*, Vol. 8(3), pp. 1-10.
- Topp GC, Reynolds, WD, 1998. Time domain reflectometry: a seminal technique for measuring mass and energy in soil. *Soil Tillage Research* 47:125-132.
- Topp GC, Davis JL, 1985. Time-Domain Reflectometry (TDR) and its application to irrigation scheduling. *Advances in Irrigation*, volume 3:107-127.
- Vélez Sánchez, J, 2004. Programación de riego en cítricos en base a sensores de medida del estado hídrico del suelo y de la planta. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Wanjura DF, Upchurc DR, Mahan JR, 1992. Automated Irrigation Based on Threshold Canopy Temperature. A Compilation of Published Articles from Applied Engineering in Agriculture and Transactions of the ASAE 1985-1994.