

VERIFICACIÓN DE UN EQUIPO FDR PARA LA MEDIDA DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO EN DOS SISTEMAS DE CULTIVO

M.F. Moreno-Pérez, F. Villalobos Martín y E. Fereres Castiel

Resumen:

Se ha estudiado el comportamiento de un equipo FDR (sonda multisensor EnviroSCAN, Sentek PTY LTD, Adelaide, South Australia) para su uso en la programación de riegos de dos sistemas de explotación diferentes (plantación de olivar regada por goteo y parcela de trigo regada por aspersión). En cada una de ellas se instaló un equipo EnviroSCAN con varias sondas de medida del contenido de agua en profundidad, y varios tubos de acceso de sonda de neutrones.

En primer lugar, se compararon los contenidos de agua calculados a partir de las medidas realizadas con ambos sistemas de medida. Se encontraron buenos ajustes lineales (R^2 mayores de 0.70), salvo para los sensores más profundos, es decir, con pequeñas variaciones de humedad (valores entre 0.043 a 0.054 cm^3/cm^3), y en las parcelas no regadas. Además, era apreciable la descalibración del sistema de medida EnviroSCAN, consecuencia de la utilización de la recta de calibración facilitada por el fabricante.

Por último, se calibró el sistema EnviroSCAN utilizando los datos del primer año de medida para corregir los del segundo. Así, se encontró que aunque no se mejoraron las regresiones realizadas, el RMSE se mejoró considerablemente tanto para las medidas superficiales, como para los contenidos de humedad medios del perfil de profundidad determinada.

Palabras clave: programación de riegos, Frequency Domain Reflectometry, medida del contenido de agua del suelo

INTRODUCCIÓN

La necesidad de mejorar el manejo del agua de riego es evidente en Andalucía, donde la superficie regada ha aumentado hasta alcanzar una cifra superior a las 800.000 ha, consumiendo más del 80 % de los recursos hídricos disponibles (MAPYA, 2002). La elevada demanda del regadío, unida a la desfavorable distribución estacional de las lluvias, con veranos extremadamente secos, y alta variabilidad interanual, obligan a adecuar el manejo del riego a las necesidades hídricas de los cultivos, mediante técnicas de programación de riegos (Villalobos, 1993).

La programación de riegos en finca podría realizarse midiendo directamente el contenido de agua en el suelo. En este sentido, la búsqueda de

sensores para determinar el contenido de agua del suelo ha sido ininterrumpida desde la aparición de los primeros tensiómetros y bloques de yeso a finales del año 1950 (Richards, 1949). En la década de los setenta, se propuso el uso de la sonda de neutrones para la programación de riegos ya que su aplicación para determinar el momento y dosis de riego es sencilla (Campbell y Campbell, 1982), pero la necesidad de personal especializado y los problemas de seguridad asociados al uso de un instrumento radiactivo, redujo su empleo a la investigación, aparte de la gran desventaja que supone proporcionar una medida puntual en tiempo y espacio (Green y Topp, 1992).

En algunos sistemas agrícolas intensivos, haría falta realizar medidas del contenido de agua del suelo con una frecuencia mayor a la diaria,

Universidad de Córdoba. Departamento de Agronomía . Avda. Menéndez Pidal, s/n. Apdo. 3048 – 14080 Córdoba (España).
Teléfono: 957 218514. e-mail:mfatima@uco.es, ag1vimaf@uco.es, ag1fecae@uco.es

Artículo recibido el 13 de abril de 2005, recibido en forma revisada el 30 de junio de 2005 y aceptado para su publicación el 7 de julio de 2005. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

para realizar un manejo del riego de forma útil (Goldhamer et al., 1999). Así, en los últimos años, se han desarrollado sistemas comerciales basados en las relaciones entre la constante dieléctrica del suelo y su contenido de agua que permiten una automatización para lecturas continuas. La aparición de sensores TDR (del inglés Time Domain Reflectometry) data de principios del año 1980 pero, por su coste y otras dificultades técnicas de instalación, apenas se han usado hasta ahora fuera del ámbito de la investigación (Campbell y Mulla, 1990). Recientemente, se ha desarrollado un sistema comercial de medida del contenido de agua del suelo basado en Reflectometría en el Dominio de Frecuencias (FDR) que determina de forma continua la constante dieléctrica del suelo, de la que se deduce su contenido de agua (Paltineanu y Starr, 1997). Estos sistemas comerciales, se han estudiado ampliamente y en profundidad por ser considerados la solución a los problemas radiactivos de la sonda de neutrones, y a los problemas técnicos de los sensores TDR.

El método FDR incluye el suelo como parte de un condensador, de tal forma que midiendo su capacitancia se obtiene la constante dieléctrica del suelo, y por tanto, su contenido de agua. El condensador usualmente tiene la forma de un cilindro que contiene además del circuito electrónico, dos bandas metálicas separadas una distancia de 5 a 8 cm. El campo eléctrico que se forma es aproximadamente un 50% más grande que la distancia entre electrodos (Kutílek y Nielsen, 1994). Estos sensores fueron diseñados para ser enterrados directamente a la profundidad deseada en el suelo, o insertados dentro de un tubo de PVC.

En los últimos 50 años, se diseñaron, calibraron y usaron en campo sondas de capacitancia portátiles y semipermanentes insertadas en tubos de PVC. Numerosos investigadores estudiaron en campo el comportamiento de las sondas portátiles, comparando las medidas obtenidas con diferentes sondas de neutrones; si, por un lado, Evett y Steiner (1995) trabajando con suelos de textura muy fina, concluyeron que el uso de la sonda era inaceptable para este tipo de suelos por dar errores de lectura muy importantes, por otro, Tomer y Anderson (1995) trabajando con suelos muy secos y con suelos de textura gruesa y heterogénea, observaron que la sonda no detectaba pequeños cambios de humedad, al variar ésta en el suelo. Además, comprobaron que en superficie la diferencia entre las humedades medidas por ambos métodos era más pronunciada como con-

secuencia de la pérdida de neutrones a la atmósfera de la sonda de neutrones, mayor cuanto más seco estaba el suelo. Más tarde, Ould Mohamed et al. (1997) vieron que el error cometido por la sonda de capacitancia en la medida del contenido de agua del suelo era menor al compararlos con los datos obtenidos con un sonda de neutrones, debido precisamente a las distintas esferas de influencia (la esfera de influencia de la sonda de neutrones es de 20 – 30 cm para suelo seco, según observaron Gardner et al, 1991). Esto aclaró lo observado por Evett y Steiner (1995), ya que una esfera de influencia más pequeña puede conllevar errores menores cuando el suelo no es homogéneo fuera de la esfera de influencia.

Para superar los problemas que acarreaban las sondas portátiles, se desarrolló un nuevo sistema de monitorización del contenido de agua del suelo en tiempo real, llamado EnviroSCAN (ES), desarrollado por Sentek Pty Ltd., South Australia, que usa sondas multisensores semipermanentes. Estas sondas, se basan en la monitorización de unos lugares fijos, seleccionados previamente mediante estudio o reconocimiento de los suelos que componen la unidad de riego. Así, este sistema se puede adaptar tanto a la heterogeneidad del suelo en el que está instalado (instalando más o menos "puntos" de medidas), como a la densidad radicular del cultivo (instalando más o menos sensores de medida en profundidad).

La calidad de los datos obtenidos por la sonda dependerá de la calidad de la calibración obtenida entre la señal de salida del sensor, esto es, la frecuencia medida (F_n), y el contenido de agua del suelo. Mead et al. (1995) trabajaron con los sensores ES, concluyendo que éstos eran sensibles a la salinidad del suelo, teniendo que realizar calibraciones independientes para las sondas instaladas en suelos con salinidad. Mead et al. (1996) estudiaron la influencia de la temperatura en las lecturas de humedad volumétrica para tres tipos de suelo, y concluyeron que al igual que habían observado Dean et al. (1987), existen fluctuaciones diurnas en las medidas del contenido de agua del suelo como consecuencia de las variaciones de temperatura ambiental, sobre todo en superficie, siendo además, mayores las fluctuaciones cuanto más húmedo está el suelo, y para texturas más finas. Más tarde Baumhardt et al. (2000), concluyeron que la variación de temperatura y de salinidad en el suelo, debían ser considerados cuando se interpretan los incremento de contenido de

VERIFICACIÓN DE UN EQUIPO FDR PARA LA MEDIDA DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO EN DOS SISTEMAS DE CULTIVO

agua del suelo, bajo condiciones variables de temperatura y de salinidad como consecuencia del riego. Además, habría que recalcular el contenido de agua tomando como base la variación de temperatura y de salinidad del suelo durante la calibración.

Paltineanu y Starr (1997) analizaron los sensores ES en laboratorio, desarrollando curvas de calibración universales e independientes de la temperatura del suelo, con esferas de influencia de 10 cm desde la pared del tubo de PVC (ya observado con anterioridad por Kuraz, 1982). Sin embargo, concluyeron que estos sensores debían ser estudiados para suelos especiales, como muy arcillosos o con alto contenido de materia orgánica, así como para suelos que soportan temperaturas extremas. Más tarde, los mismos investigadores utilizaron con éxito estos sensores bajo condiciones de campo para estudiar la dinámica del contenido de agua en el suelo (Starr y Paltineanu, 1998).

La necesidad de medir de manera continua y fiable el contenido de agua en suelos de textura arenosa, cuya característica más importante es la baja retención de agua del suelo, llevó a Morgan et al. (1999) a estudiar el comportamiento de la sonda ES en este tipo de suelos, concluyendo que es necesaria una calibración en campo, no aconsejándose utilizar la facilitada por el fabricante para este tipo de suelos.

En los últimos años, numerosos investigadores han utilizado la sonda ES como base para la mejora del manejo del riego en plantaciones frutales (Zekri et al., 1999; Fares y Alva, 2000; Girona et al., 2002). Hanson y Peters (2000) o Fernández et al. (2004) la estudiaron comparándola con otros métodos "capacitivos" existentes en el mercado, encontrando una sobreestimación del contenido de agua.

Cabe destacar el trabajo de Fares y Alva (2000), que realizaron una evaluación del comportamiento de la sonda ES para su uso en programación de riegos en cítricos, concluyendo que este método de lectura continua de agua en el suelo, es útil para estimar la ET en este tipo de cultivos, pero siempre y cuando sea usado en períodos de baja redistribución de agua en el suelo. Y más recientemente, Girona et al. (2002) utilizaron la sonda para determinar la profundidad máxima de extracción de agua por las raíces en una plantación de melocotoneros, comparando además las medi-

das realizadas por ésta (usándose como recta de calibración la facilitada por el fabricante) con una sonda de neutrones. Las lecturas realizadas con la sonda ES fueron corregidas usando la relación existente entre el contenido de agua del suelo de la sonda de neutrones y las lecturas obtenidas por la sonda ES.

En conclusión, a la hora de utilizar el sistema de medida en tiempo real ES, hay que tener en cuenta que se pueden producir dos tipos de errores los producidos como consecuencia de la utilización de una curva de calibración incorrecta para el tipo de suelo en el que se va a utilizar el equipo o los provocados por una incorrecta instalación en campo (tanto por ser un lugar no representativo del resto del suelo cultivado, como por alterar la estructura del suelo circundante a los tubos de PVC durante el proceso de instalación) y los producidos por variaciones en la temperatura y en la humedad del suelo.

Aunque el sistema de medida en tiempo real EnviroSCAN pudiera poseer un gran potencial para su utilización en programación de riegos (Starr y Paltineanu, 1998), el equipo tiene claras limitaciones. Una de las más importantes, a causa de la gran fuente de error que puede ocasionar, es su instalación en campo, ya que aunque tiene que realizarse por una persona especializada, no existe total seguridad de que ésta haya sido la correcta hasta que no se comparan las medidas realizadas por éste, con otro equipo cuyo funcionamiento sí sea seguro. Por otro lado, está clara la necesidad de calibrar en campo los equipos de medida a fin de evitar los errores derivados de usar la calibración facilitada por el fabricante para un suelo definido en laboratorio, y que difiere en gran medida del que realmente se tiene en parcela (Morgan et al., 1999).

El objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento de un equipo FDR (sonda multisensor EnviroSCAN, Sentek PTY LTD, Adelaide, South Australia) en la medida del contenido de agua del suelo en dos sistemas de explotación diferentes, como son una plantación de olivar y un cultivo de trigo, tanto en secano como en regadío. Además, se estudió cómo influyen los errores de instalación del equipo en las medidas del contenido de agua del suelo, y si con una nueva calibración *in situ*, se pueden corregir estos errores para seguir utilizando el equipo ya instalado.

MATERIAL Y MÉTODOS

Descripción de las parcelas del estudio

La evaluación de la sonda de capacitancia EnviroSCAN (Sentek PTY LTD, Adelaine, South Australia) se realizó durante los años 1998 a 2000 en dos parcelas situadas en la finca experimental del Centro de Investigación y Formación Agraria de Córdoba.

Los suelos del área experimental se clasifican como "Typic Xerofluvents" (Berengena y Roldán, 1979), poseen una textura limo – arenosa de origen aluvial (con más de 1,5 m de profundidad), y con unos valores límite de contenido de agua de $0,24 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de capacidad de campo y de $0,08 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ de punto de marchitez permanente (Villalobos, 1988).

Con el fin de contrastar los resultados obtenidos para dos sistemas de cultivo bien contrapuestos, es decir, un sistema de explotación intensivo frente a un sistema extensivo, se eligieron dos parcelas experimentales, una sembrada de trigo y otra en la que se encuentra una plantación de olivar, respectivamente.

En cada parcela elegida, se instaló un equipo EnviroSCAN con varias sondas de medida del contenido de agua en profundidad y varios tubos de acceso de sonda de neutrones.

Las características de las parcelas elegidas para el estudio, fueron las siguientes:

Plantación de olivar de 1.1 ha (Olea europaea L. Cv Picual y 19 años de antigüedad). El marco de plantación es de $6 \times 6 \text{ m}^2$. El sistema de riego es por goteo, estando la parcela del estudio dividida en tres parcelas, cada una de las cuales tiene una dotación de riego distinta:

Parcela 1 – Riego con un déficit continuo del 75% de la ET del cultivo, con julio y agosto sin riego.

Parcela 2 – Riego con un déficit continuo del 75% de la ET del cultivo.

Parcela 3 – Sin riego.

Parcela de trigo de 1.5 ha (Triticum aestivum var. Tigre, sembrada a finales de diciembre de cada campaña) con el sistema de riego por aspersión para el año 1999, y sin riego en el año 2000.

Descripción de los equipos de medida del contenido de agua en el suelo utilizados

Sonda de Neutrones

Se empleó una sonda modelo 503 (Campbell Nuclear Pacific, Pacheco, California) con dos rectas de calibración, una para profundidad de 0-15 cm y otra para el resto de las medidas (calibrada "in situ"):

Profundidad 0-15 cm:

$$\theta_{SN} = 1.45 \left(\frac{0.235L_{sn}}{\bar{L}_{sn}} - 0.014 \right) \quad (1)$$

Profundidad a partir de 15 cm:

$$\theta_{SN} = 1.45 \left(\frac{0.184L_{sn}}{\bar{L}_{sn}} - 0.036 \right) \quad (2)$$

siendo θ_{SN} el contenido de agua del suelo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), L_{SN} la lectura realizada por la sonda y \bar{L}_{SN} el valor medio de las lecturas realizadas por la sonda de neutrones, en condiciones estándar.

Sistema de medida EnviroSCAN

La curva de calibración utilizada para todos los sensores fue la recomendada por el fabricante para suelos de textura media a gruesa:

$$F_n = 0.1957 \times \theta^{0.404} + 0.02852 \quad (3)$$

siendo θ el contenido de agua del suelo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) y F_n la frecuencia normalizada de oscilación generada por el sensor (Mead et al., 1995).

Distribución espacial de las sondas del EnviroSCAN y de los tubos de acceso de la sonda de neutrones instalados en las parcelas

Se instalaron dos sondas por parcela del EnviroSCAN, tanto en las parcelas de olivar, como en la de trigo (denominadas ES_j). En la parcela de olivar se instalaron 8 tubos de acceso para la sonda de neutrones, y dos en la de trigo (denominados SN_i).

Para comparar las medidas realizadas con ambos sistemas, se eligieron una sonda ES y un tubo de acceso de la SN en cada parcela, semejantes en cuanto a su posición relativa respecto a los árboles y a la línea porta-goteros: en las parcelas

VERIFICACIÓN DE UN EQUIPO FDR PARA LA MEDIDA DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO EN DOS SISTEMAS DE CULTIVO

O.1 y O.2 tanto la sonda ES como el tubo de acceso de la SN se encuentran a 90 cm de distancia a la línea porta-goteros, y a 125 cm del árbol más cercano.

Distribución en profundidad de los sensores de la sonda EnviroSCAN y de las medidas con la sonda de neutrones

Para estudiar el comportamiento del sistema ES como equipo de medida del contenido de agua en el suelo, se compararon los valores obtenidos por dicho sistema con los obtenidos por la sonda de neutrones, tanto para cada una de las profundidades de medida como para una profundidad determinada, elegida previamente. Así, eligiendo como profundidad de cálculo, el perfil de suelo en el que se encuentra la mayor parte del sistema radicular del cultivo, a cada profundidad de medida se le asoció una proporción determinada de la profundidad total del perfil del suelo.

En la figura 1 se muestra un esquema genérico de distribución en profundidad de los sensores del sistema ES (Z_i) y de las profundidades de medida de la sonda de neutrones (Z'_j), así como los perfiles de suelo asociados a cada profundidad de medida (e_i para el sistema ES y e'_j para la sonda de neutrones).

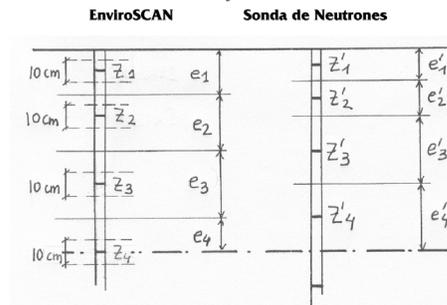


figura 1. Esquema generico.

Las ecuaciones generales utilizadas para el cálculo del contenido de agua medio del perfil son:

Tabla 1. Comparación de los valores del contenido medio de agua medidos con el EnviroSCAN, y con la sonda de neutrones en la parcela de olivar.

ENVIROSCAN				SONDA DE NEUTRONES		
Z_i	e_i	θ_{z_i}	θ_i calculados	Z'_j	e'_j	$\theta_{z'_j}$
10	20	$\theta_{10\text{ cm}}$	$\theta_{10\text{ cm}}$	7.5	15	$\theta_{7.5\text{ cm}}$
30	25	$\theta_{30\text{ cm}}$	$\frac{\theta_{10\text{ cm}} + \theta_{30\text{ cm}}}{2}$	22.5	15	$\theta_{22.5\text{ cm}}$
60	30	$\theta_{60\text{ cm}}$	$\frac{\theta_{30\text{ cm}} + \theta_{60\text{ cm}}}{2}$	45	30	$\theta_{45\text{ cm}}$
90	15	$\theta_{90\text{ cm}}$	$\frac{\theta_{60\text{ cm}} + \theta_{90\text{ cm}}}{2}$	75	30	$\theta_{75\text{ cm}}$

Tabla 2. Comparación de los valores del contenido medio de agua medidos con el EnviroSCAN, y con la sonda de neutrones en la parcela de trigo.

ENVIROSCAN				SONDA DE NEUTRONES		
Z_i	e_i	θ_{z_i}	θ_i calculados	Z'_j	e'_j	$\theta_{z'_j}$
10	15	$\theta_{10\text{ cm}}$	$\theta_{10\text{ cm}}$	7.5	15	$\theta_{7.5\text{ cm}}$
20	10	$\theta_{20\text{ cm}}$	$\frac{\theta_{20\text{ cm}} + \theta_{30\text{ cm}}}{2}$	22.5	15	$\theta_{22.5\text{ cm}}$
30	15	$\theta_{30\text{ cm}}$				
50	20	$\theta_{50\text{ cm}}$	$\frac{\theta_{30\text{ cm}} + \theta_{50\text{ cm}}}{2}$	45.0	30	$\theta_{45\text{ cm}}$
70	20	$\theta_{70\text{ cm}}$	$\frac{\theta_{70\text{ cm}} + \theta_{90\text{ cm}}}{2}$	75.0	30	$\theta_{75\text{ cm}}$
90	15	$\theta_{90\text{ cm}}$				
100	10	$\theta_{100\text{ cm}}$	$\theta_{100\text{ cm}}$	105.0	15	$\theta_{105\text{ cm}}$

Sistema EnviroSCAN:

$$\left(\theta_{ES}\right)_Z = \frac{\sum_{i=1}^n e_i \theta_{Z_i}}{Z} \quad (4)$$

donde:

n es el número de sensores instalados en cada una de las sondas del EnviroSCAN ($n = 5$ en olivar y $n = 7$ en trigo)

e_i (mm) es el espesor de suelo asociado a cada sensor del EnviroSCAN, de tal forma que la profundidad total del perfil es:

$$Z = \sum_{i=1}^n e_i$$

Z_i (mm) es la profundidad a la que se encuentra situado cada sensor del EnviroSCAN

θ_{Z_i} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) es el contenido de agua medido a la profundidad Z_i

Sonda de Neutrones:

$$\left(\theta_{SN}\right)_Z = \frac{\sum_{j=1}^m e'_j \theta_{Z'_j}}{Z} \quad (5)$$

donde:

m es el número de lecturas realizadas por la sonda de neutrones ($m = 4$ en olivar y $m = 5$ en trigo)

e'_j (mm) es el espesor de suelo asociado a cada profundidad de medida, de tal forma que la profundidad total del perfil es:

$$Z = \sum_{j=1}^m e'_j$$

Z'_j (mm) es la profundidad a la que se realizan las medidas

$\theta_{Z'_j}$ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) es el contenido de agua medido con la sonda de neutrones, para cada profundidad de medida.

En las Tablas 1 y 2 aparecen los valores asignados a las variables de entrada de las ecuaciones 4 y 5 para las parcelas de olivar y de trigo, respectivamente. Además, y por encontrarse los sensores del sistema EnviroSCAN a distinta profundidad de las lecturas realizadas con la sonda de neutrones, se muestran en dichas tablas los valores del contenido de agua del suelo calculados para el sistema EnviroSCAN, que se han utilizado para compararlos con los obtenidos por la sonda de neutrones (denominados $\theta_{i \text{ calculados}}$)

Calibración del sistema EnviroSCAN

Por último, se corrigieron los contenidos de agua medidos con el sistema EnviroSCAN en los perfiles estudiados. Para ello, se utilizaron las regresiones lineales entre el contenido de agua medido con EnviroSCAN y el medido con la sonda de neutrones para el primer año de toma de medidas, y se corrigieron los datos del segundo. Así, si la regresión de los datos del primer año tiene la forma $\theta_{ES} = a + b\theta_{SN}$, los datos corregidos para el segundo año se calcularon como sigue:

$$\left(\theta_{ES}^c\right)_i = \frac{\left(\theta_{ES}\right)_i - a}{b} \quad (6)$$

siendo $\left(\theta_{ES}\right)_i$ cada uno de los datos del contenido de agua obtenidos para el segundo año de medida.

RESULTADOS

Contenido total de agua

En las Tablas 3.a y 3.b se comparan los contenidos de agua para ambos sistemas de medida, y cada profundidad de medida, y así como los contenidos de agua el perfil de 90 cm de profundidad, en cada una de las parcelas del olivar.

Al igual que observaron Ould Mohamed et al. (1997) o Evett y Steiner (1995), se han encontrado distintas regresiones lineales entre el contenido de agua del suelo medido con el EnviroSCAN y el medido con la sonda de neutrones para cada profundidad que puede ser debido a pequeñas variaciones verticales de textura en el suelo, ya que la textura del suelo tiene un gran efecto en su respuesta dieléctrica, lo que conlleva que la calibración de los sensores sea independiente para cada profundidad de medida (Bell et al., 1987).

Cabe destacar el comportamiento de los sensores más profundos en las parcelas O.1 y O.3 para el año 1999, en los que el coeficiente de determinación de las regresiones no son significativas para un nivel de confianza del 95 %. Esto es así, ya que las variaciones de humedad leídas por estos sensores es muy pequeña (0.054 a 0.076 cm^3/cm^3 para la parcela O.1 y 0.043 a 0.054 cm^3/cm^3 para la O.3). Por lo tanto, al igual que observaron Tomer y Anderson (1995), los sensores del EnviroSCAN captan difícilmente pequeñas variaciones en el contenido de agua, debido a la utilización de una recta de calibración creada para un determinado rango de humedad, y utilizada para

VERIFICACIÓN DE UN EQUIPO FDR PARA LA MEDIDA DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO EN DOS SISTEMAS DE CULTIVO

Tabla 3.a. Regresión lineal entre el contenido de agua medido con el sistema EnviroSCAN (término dependiente) y de la sonda de neutrones (término independiente) para las distintas profundidades de medida, en las parcelas de olivar (año 1998).

Año 1998									
PARCELA	Profundidad	$\bar{\theta}_{ES}$	$\bar{\theta}_{SN}$	$\theta_{ES} = a + b \theta_{SN}$			et (%)	RMSE cm^3cm^{-3}	ER (%)
		cm^3cm^{-3}	a	b	R ²				
O.1	10 cm	0.13	0.12	0.03*	0.89*	0.83	2.8	0.031	26
	20 cm	0.13	0.12	0.03*	0.81*	0.75	2.1	0.024	20
	45 cm	0.14	0.11	0.06	0.77	0.86	1.1	0.034	31
	75 cm	0.24	0.10	0.08	1.59	0.91	1.7	0.142	142
	Total 90cm	0.17	0.11	0.06	0.96*	0.88	1.3	0.062	56
O.2	10 cm	0.14	0.11	0.02*	1.14*	0.80	3.9	0.050	45
	20 cm	0.21	0.12	0.04	1.36	0.87	2.4	0.090	75
	45 cm	0.24	0.11	0.11	1.18*	0.80	2.2	0.135	123
	75 cm	0.19	0.09	0.08	1.18*	0.74	2.4	0.102	113
	Total 90cm	0.20	0.12	0.07	1.25*	0.84	2.0	0.098	82
O.3	10 cm	0.17	0.15	0.06	0.69	0.88	2.2	0.038	25
	20 cm	0.17	0.13	0.07	0.79	0.93	1.2	0.043	33
	45 cm	0.17	0.11	0.09	0.75	0.81	1.9	0.065	59
	75 cm	0.25	0.10	0.11	1.41	0.84	3.2	0.156	156
	Total 90cm	0.21	0.11	0.09	0.90*	0.86	1.9	0.083	75

*a**: ordenada en el origen de la regresión no es significativamente distinto de 0, *b**: coeficiente de la regresión no es significativamente distinto de 1 y *R*²: coeficiente de determinación de la regresión no es significativo ($\alpha=0.05$) et (%): error típico; RMSE (cm^3cm^{-3}): raíz del error cuadrático medio; ER (%): error relativo ($RMSE/\bar{\theta}_{SN}$)

Tabla 3.b. Regresión lineal entre el contenido de agua medido con el sistema EnviroSCAN (término dependiente) y de la sonda de neutrones (término independiente) para las distintas profundidades de medida, en las parcelas de olivar (año 1999).

Año 1999									
PARCELA	Profundidad	$\bar{\theta}_{ES}$	$\bar{\theta}_{SN}$	$\theta_{ES} = a + b \theta_{SN}$			et (%)	RMSE cm^3cm^{-3}	ER (%)
		cm^3cm^{-3}	a	b	R ²				
O.1	10 cm	0.12	0.12	0.02*	0.82*	0.77	3.6	0.036	30
	20 cm	0.13	0.12	0.03*	0.84*	0.88	1.7	0.019	16
	45 cm	0.12	0.09	0.08	0.43	0.44	1.3	0.035	39
	75 cm	0.18	0.07	0.16	0.18	0.02*	1.2	0.110	157
	Total 90cm	0.14	0.09	0.07	0.74	0.75	1.2	0.050	56
O.2	10 cm	0.16	0.12	0.04*	1.03*	0.70	5.7	0.070	58
	20 cm	0.22	0.13	0.03	1.42	0.94	1.8	0.092	71
	45 cm	0.22	0.09	0.13	0.96*	0.71	2.1	0.120	133
	75 cm	0.15	0.07	0.03*	1.65	0.70	1.1	0.080	114
	Total 90cm	0.16	0.08	0.05	1.35	0.75	0.9	0.091	114
O.3	10 cm	0.16	0.13	-0.07*	1.41	0.65	4.7	0.061	47
	20 cm	0.17	0.12	0.06	0.91*	0.87	2.2	0.060	50
	45 cm	0.14	0.08	0.10	0.66	0.80	1.0	0.069	86
	75 cm	0.17	0.05	0.20	-0.38	0.01*	1.3	0.125	250
	Total 90cm	0.18	0.09	0.09	0.76*	0.68	1.4	0.081	90

rangos de humedades menores (Morgan et al., 1999). Así, de esta forma se explica que Starr y Paltineanu (1998) al trabajar con humedades volumétricas entre 0.08 y 0.38 cm³/cm³ concluyeran que el método era sensible a cambios grandes y pequeños en el contenido de agua del suelo.

Respecto a los sensores superficiales, y al contrario de lo que observaron Tomer y Anderson (1995), existe buena correlación entre la humedad medida por el sistema EnviroSCAN y la medida por la sonda de neutrones en superficie. Esto es debido a que la sonda de neutrones utilizada, tiene una recta de calibración en superficie distinta de la recta de calibración en profundidad, con el fin de reflejar el escape de neutrones a la atmósfera (Gardner et al., 1991). El hecho de que en superficie, las regresiones

realizadas en las parcelas O.1 y O.2 tengan pendientes y ordenadas en el origen no significativamente distintas de uno y cero, respectivamente, hace pensar que la recta de calibración elegida para los sensores del EnviroSCAN, corresponde más acertadamente a la textura superficial del suelo en el que fueron instalados, variando en profundidad. Sin embargo, los errores típicos de las regresiones son mayores en los sensores superficiales, como consecuencia de las mayores fluctuaciones de humedad que ocurren en superficie.

Los valores de RMSE encontrados en las parcelas de olivar han variado entre 0.02 en superficie y 0.15 cm³/cm³ en profundidad, estando muy por encima del valor medio 0.009 cm³/cm³ encontrado en laboratorio por Paltineanu y Starr (1997);

Tabla 4.a. Regresión lineal entre el contenido de agua medido con el sistema EnviroSCAN (término dependiente) y de la sonda de neutrones (término independiente) para las distintas profundidades de medida, en la parcela de trigo (año 1999).

Año 1999								
Profundidad	$\bar{\theta}_{ES}$	$\bar{\theta}_{SN}$	$\theta_{ES} = a + b \theta_{SN}$			et (%)	RMSE cm ³ cm ⁻³	ER (%)
	cm ³ cm ⁻³		a	b	R ²			
10 cm	0.28	0.09	0.15	1.46	0.88	2.9	0.19	211
25 cm	0.28	0.13	0.22	0.55	0.92	0.9	0.16	123
40 cm	0.29	0.14	0.22	0.59	0.97	0.6	0.16	114
80 cm	0.33	0.14	0.21	0.91*	0.95	1.3	0.19	136
95 cm	0.28	0.13	0.16	0.93	0.99	0.4	0.14	108
Total 105 cm	0.299	0.129	0.19	0.79	0.98	0.6	0.17	132

Ver tabla 3.a.

Tabla 4.b. Regresión lineal entre el contenido de agua medido con el sistema EnviroSCAN (término dependiente) y de la sonda de neutrones (término independiente) para las distintas profundidades de medida, en la parcela de trigo (año 2000).

Año 1999								
Profundidad	$\bar{\theta}_{ES}$	$\bar{\theta}_{SN}$	$\theta_{ES} = a + b \theta_{SN}$			et (%)	RMSE cm ³ cm ⁻³	ER (%)
	cm ³ cm ⁻³		a	b	R ²			
10 cm	0.24	0.09	0.04*	2.92	0.97	1.3	0.15	167
25 cm	0.27	0.14	0.12	1.06*	0.96	0.9	0.13	93
40 cm	0.29	0.15	0.15	0.99*	0.96	1.0	0.15	100
80 cm	0.38	0.15	0.24	0.94*	0.94	1.4	0.23	153
95 cm	0.33	0.15	0.21	0.81*	0.91	1.6	0.18	120
Total 105 cm	0.310	0.142	0.17	1.01*	0.98	0.6	0.14	99

Ver tabla 3.a.

VERIFICACIÓN DE UN EQUIPO FDR PARA LA MEDIDA DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO EN DOS SISTEMAS DE CULTIVO

aunque son más cercanos a los encontrados en campo por otros autores como Ould Mohamed et al. (1997), que para variaciones de contenido de agua en el suelo entre 0.25 y 0.40 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ encontraron un RMSE entre 0.0098 y 0.159 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ o Starr y Paltineanu (1998) que encontraron rangos entre 0.016 y 0.031 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ para contenidos de agua entre 0.05 y 0.45 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ obtenidos por otros investigadores.

En las Tablas 4.a y 4.b se comparan los contenidos de agua para ambos sistemas de medida en la parcela de trigo, tanto para cada profundidad de medida, como para el total del perfil de 105 cm.

Se puede observar que en las regresiones realizadas en el trigo (ver tabla 4), los coeficientes de determinación encontrados en superficie son muy altos, pero las pendientes son también muy elevadas. Esto es consecuencia de que la capa superficial tiene una densidad aparente menor como consecuencia de las labores superficiales a que ha sido sometido el suelo, para facilitar la nascencia del trigo, de ahí que los errores relativos sean mayores en superficie (al contrario que en el olivar). Así, la recta de calibración real se aleja considerablemente de la que eligió el fabricante para la textura original del suelo (Morgan et al., 1999).

Respecto a los valores de RMSE encontrados (entre 0.13 y 0.23 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ para contenidos de agua de 0.04 a 0.22 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) son muy superiores a los encontrados en la bibliografía existente (Paltineanu y Starr, 1997; Ould Mohamed et al., 1997; Starr y Paltineanu, 1998), consecuencia de la gran diferencia entre la ecuación de calibración facilitada por el fabricante y la que realmente tienen los sensores instalados en esta parcela.

Es importante observar la diferencia en el comportamiento de la parcela sometida a secano (año 2000), respecto de la regada (año 1999). Al no haber cambiado las características del equipo de un año a otro, cabe pensar que la estructura del suelo alrededor de los tubos de PVC ha cambiado, y como ya ha sido estudiado ampliamente por diversos autores (Bell et al., 1987; Dean et al., 1987) la sonda EnviroSCAN por ser una sonda de capacitancia, es muy sensible a las condiciones del suelo que se encuentran en contacto y próximo al tubo. De esta forma, pequeñas variaciones de textura causadas por las raíces del cultivo o por cambios de un año a otro por ser un suelo aluvial de secano, pueden formar heterogeneidades alrededor del tubo de PVC en el que se encuentran instalados los sensores del EnviroSCAN, que pueden afectar a las lecturas de la sonda (Wobschall, 1978).

Tabla 5. Regresión lineal entre los errores de medida (término dependiente) y el contenido de agua calculado a partir de la sonda de neutrones (término independiente), para las distintas profundidades de medida, en las parcelas de olivar.

PARCELA	Profundidad	Año 1998			Año 1999		
		a	b	R ²	a	b	R ²
O.1	10 cm	0.03	-0.11	0.08*	0.02	-0.18	0.14*
	20 cm	0.03	-0.19	0.13*	0.03	-0.16	0.21*
	45 cm	0.06	-0.23	0.34	0.10	-0.68	0.54
	75 cm	0.08	0.58	0.59	0.16	-0.81	0.30
	Total 90cm	0.06	-0.04	0.01*	0.07	-0.26	0.27
O.2	10 cm	0.02	0.14	0.06*	0.04	0.03	0.002*
	20 cm	0.04	0.36	0.31	0.03	0.42	0.60
	45 cm	0.11	0.18	0.08*	0.13	-0.04	0.004*
	75 cm	0.08	0.18	0.06*	0.03	0.65	0.27*
	Total 90cm	0.07	0.25	0.17*	0.05	0.35	0.17*
O.3	10 cm	0.06	-0.3	0.60	0.07	0.41	0.13*
	20 cm	0.07	-0.21	0.50	0.06	-0.10	0.06*
	45 cm	0.09	-0.25	0.33	0.10	-0.40	0.50
	75 cm	0.11	0.41	0.31	0.20	-1.40	0.16*
	Total 90cm	0.09	-0.10	0.07*	0.09	-0.24	0.18*

Ver tabla 3.a.

Para comprobar si los resultados comentados son consecuencia, además de una incorrecta calibración, de una mala instalación de las sondas del EnviroSCAN, se estudiaron las relaciones existentes entre los errores de medida cometidos por el EnviroSCAN (es decir, la diferencia entre la humedad medida con el EnviroSCAN y la medida con la sonda de neutrones, tomando como contenidos de agua reales los medidos con la sonda de neutrones) y las medidas realizadas con la sonda de neutrones para las distintas profundidades, tanto para las parcelas del olivar (Tabla 5) como para la parcela sembrada de trigo (Tabla 6).

Del estudio de los errores de medida del sistema EnviroSCAN (ver Tablas 5 para el olivar y 6 para el trigo), se puede observar una vez más el distinto comportamiento de los sensores situados a distinta profundidad, así como los situados en las parcelas regadas, de las situadas en las no regadas. Además, en las parcelas regadas, se observa que los sensores en los que se encontró una pendiente significativamente distinta de uno para las regresiones entre el contenido de agua medido con la sonda de neutrones y el medido con el EnviroSCAN (ver Tablas 3 para el olivar y 4 para el trigo), el error cometido es función del contenido de agua en el suelo (independientemente del valor de los coeficientes de determinación de las regresiones). Esto significa que al igual que han observado Veldkamp y O'Brien (2000) en suelos con alto contenido de arcilla y alto contenido de materia orgánica, Mead et al. (1996) en suelos salinos o Morgan et al. (1999) en suelos de textura arenosa, estos sensores necesitan ser recalibrados en campo para la correcta medida del contenido de humedad en el suelo. Sin embargo, si pretendiéramos mejorar los coeficientes de las regresiones realizadas,

tendríamos que realizar una nueva instalación en campo de los tubos de PVC, fundamental para el buen funcionamiento del sistema EnviroSCAN (Bell et al., 1987; Dean et al., 1987; Starr y Paltineanu, 1998).

Respecto a las medidas en profundidad, para la parcela O.1 existe relación lineal entre el error cometido por el EnviroSCAN y el contenido de agua en el suelo, para las profundidades de 45 y 75 cm, aunque los coeficientes de determinación son bajos. En la parcela O.2 sólo existe relación lineal entre el error cometido en las medidas a la profundidad de 20 cm. En la parcela O.3, una vez más se comprueba la diferencia en el comportamiento del sistema EnviroSCAN para cada año de medida, ya que en 1998 el error cometido en las medidas está relacionado con el contenido de agua del suelo para todas las profundidades, mientras que en el año 1999 no.

Variación del contenido de agua del suelo

Otra cuestión interesante a estudiar respecto del comportamiento del sistema EnviroSCAN, es la capacidad del sistema para medir las variaciones de humedad en el suelo, con el fin de utilizarlo en programación de riegos.

En las Tablas 7 y 8 aparecen las ecuaciones de regresión lineal para la variación del contenido de agua, calculada como la diferencia del contenido de agua para dos días consecutivos a distintas profundidades y del contenido de agua medio en el perfil del suelo hasta 90 cm de profundidad, medidas con el EnviroSCAN (término dependiente) y con la sonda de neutrones (término independiente), en las parcelas de olivar y de trigo, respectivamente.

Tabla 6. Regresión lineal entre los errores de medida (término dependiente) y el contenido de agua calculado a partir de la sonda de neutrones (término independiente), para las distintas profundidades de medida, en la parcela de trigo.

Profundidad	Año 1999			Año 2000		
	a	b	R ²	a	b	R ²
10 cm	0.15	0.46	0.42	-0.04*	1.92	0.93
25 cm	0.22	-0.45	0.88	0.12	0.06	0.09*
40 cm	0.22	-0.41	0.93	0.15	-0.01	0.01*
80 cm	0.21	-0.09	0.17*	0.24	-0.06	0.07*
95 cm	0.16	-0.07	0.63	0.21	0.19	0.34*
Total 105 cm	0.19	-0.20	0.78	0.17	0.01*	0.002*

Ver tabla 3.a.

VERIFICACIÓN DE UN EQUIPO FDR PARA LA MEDIDA DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO EN DOS SISTEMAS DE CULTIVO

Tabla 7. Regresión lineal entre la variación del contenido de agua medido con el EnviroSCAN (término dependiente) y las medidas con la sonda de neutrones (término independiente) para cada profundidad de medida y el perfil de 90 cm, en la parcela de olivar.

PARCELA	Profundidad	Año 1998				Año 1999			
		a	b	R ²	et (%)	a	b	R ²	et (%)
O.1	10 cm	-0.0004*	0.78*	0.58	4.4	-0.0020*	0.87*	0.77	3.5
	20 cm	-0.0005*	0.79	0.63	2.7	-0.0001*	0.67	0.87	1.9
	45 cm	0.0003*	0.34	0.50	1.0	-0.0006*	0.40	0.42	1.3
	75 cm	0.0009*	0.29	0.12*	0.9	0.0004*	0.22	0.03*	0.6
	Total 90cm	0.0020*	0.99*	0.65	1.6	0.0004*	0.71	0.70	1.7
O.2	10 cm	0.0008*	1.07*	0.60	6.5	-0.002*	1.16*	0.75	4.9
	20 cm	0.0037*	1.51	0.84	3.4	-0.002*	1.36	0.96	1.6
	45 cm	0.0077*	1.23*	0.81	2.5	-0.006*	0.83*	0.61	2.5
	75 cm	0.0082*	1.60	0.68	1.7	-0.003*	1.28	0.80	0.4
	Total 90cm	0.0006*	1.28	0.81	1.3	0.0017*	0.60	0.88	1.2
O.3	10 cm	0.0001*	0.71	0.82	2.6	-0.008*	0.93*	0.83	3.2
	20 cm	-0.0003*	0.87*	0.93	1.2	-0.004*	0.90*	0.95	1.4
	45 cm	0.0054*	0.48	0.53	1.7	-0.003*	0.61	0.70	1.2
	75 cm	0.0080*	0.33	0.18*	1.1	-0.001*	0.12	0.02*	0.6
	Total 90cm	-0.0050*	1.02*	0.78	1.3	0.0025*	0.65	0.95	0.7

Ver tabla 3.a.

Tabla 8. Regresión lineal entre las variaciones del contenido de agua medido con el sistema EnviroSCAN (término dependiente) y con la sonda de neutrones (término independiente) para cada profundidad de medida y el perfil de 105 cm, en la parcela de trigo.

Profundidad	Año 1999				Año 2000			
	a	b	R ²	et (%)	a	b	R ²	et (%)
10 cm	-0.0050*	2.29	0.81	3.0	0.0050*	2.60	0.99	0.7
25 cm	0.0003*	0.53	0.35	1.2	-0.0020*	1.11*	0.97	0.7
40 cm	-0.0010*	0.65	0.43	0.8	-0.0050*	1.19	0.99	0.5
80 cm	-0.0008*	0.86*	0.54	1.0	-0.0060*	1.21*	0.67	1.2
95 cm	-0.0006*	0.96*	0.92	0.4	0.0030*	0.55	0.31*	1.6
Total 105 cm	-0.0020*	1.05*	0.67	0.8	-0.0020*	1.19*	0.95	0.6

Ver tabla 3.a.

Si observamos los resultados obtenidos (ver Tabla 7 para las parcelas de olivar y la Tabla 8 para la parcela de trigo) encontramos coeficientes de determinación mucho más bajos que los que encontrábamos para las lecturas del contenido de agua (tablas 3 y 4), salvo para las medidas tomadas en los perfiles más superficiales de la parcela de trigo, en el año 2000. Esto significa que los errores que se cometen en las medidas del contenido de agua se traducen en un mal comportamiento de

la variación del contenido de agua a lo largo del tiempo.

Validación de la calibración del sistema EnviroSCAN

En la Tabla 9 y 10 aparecen las regresiones lineales de los datos del segundo año de medida corregidos y sin corregir, para la plantación de olivar y la parcela de trigo, respectivamente.

De los resultados obtenidos, se tiene que distinguir una vez más, entre parcelas regadas y parcelas de secano.

En las parcelas regadas de olivar, se podría decir que en principio se puede corregir sin problemas con los datos de cualquier año, con los del primer año de toma de datos, hay que distinguir entre los sensores situados en superficie y los más profundos:

– Los situados en superficie se comportan muy bien, por lo que la corrección o no mejora los datos obtenidos por la sonda EnviroSCAN (como ocurre a 10 y 20 cm de profundidad en parcela O.1 y 10 cm de profundidad en parcela O.2) o la

mejora significativamente (como ocurre a 20 cm de profundidad en la parcela O.2).

– Con los sensores situados en profundidad, dependerá de las variaciones en el contenido de humedad del suelo, ya que cuando el agua no llega a las capas más profundas del suelo y por tanto las variaciones de humedad son muy pequeñas (año 1999 para las parcelas O.1 y O.2 a 75 cm de profundidad) la corrección acentúa el diferente comportamiento de la humedad del suelo de un año a otro. Sin embargo, cuando se ha regado de forma regular, y teniendo en cuenta las necesidades del cultivo (es decir, teniendo en cuenta las lluvias caídas durante la campaña de riegos) la corrección mejora los datos medidos, como ocurre en la parcela O.2 a 45 cm de profundidad.

Tabla 9. Relación lineal entre el contenido de agua corregido del EnviroSCAN y los medidos con la sonda de neutrones para una profundidad determinada, en las parcelas de olivar.

Parcela	Profundidad	$\bar{\theta}_{ES}^c$	$\bar{\theta}_{SN}$	a	b	R ²	et (%)	RMSE cm ³ cm ⁻³
O.1	10 cm	0.102	0.118	-0.006*	0.92*	0.77	4.0	0.041
	20 cm	0.124	0.122	-0.016*	1.15*	0.87	2.4	0.024
	45 cm	0.086	0.092	0.034	0.56	0.44	1.3	0.015
	75 cm	0.060	0.680	0.029	0.45	0.16*	0.7	0.011
	Total 90 cm	0.080	0.093	0.008*	0.77	0.74	1.1	0.011
O.2	10 cm	0.127	0.117	0.021*	0.91*	0.67	5.0	0.050
	20 cm	0.131	0.131	-0.006*	1.04*	0.94	1.3	0.013
	45 cm	0.097	0.090	0.012*	0.81*	0.71	1.8	0.019
	75 cm	0.052	0.069	-0.044	1.39	0.70	0.9	0.019
	Total 90 cm	0.089	0.096	-0.021	1.14*	0.93	0.9	0.010
O.3	10 cm	0.154	0.138	0.012	1.02*	0.65	6.7	0.065
	20 cm	0.132	0.119	-0.005*	1.15*	0.86	2.7	0.030
	45 cm	0.075	0.077	0.006*	0.88*	0.78	1.3	0.013
	75 cm	0.044	0.049	0.060*	-0.27	0.01*	0.9	0.011
	Total 90 cm	0.079	0.084	0.005*	0.87*	0.79	1.4	0.014

Ver tabla 3.a.

Tabla 10. Regresión lineal entre el contenido de agua corregido del EnviroSCAN y las medidas con la sonda de neutrones para cada profundidad de medida, en la parcela de trigo.

Profundidad	$\bar{\theta}_{ES}^c$	$\bar{\theta}_{SN}$	a	b	R ²	et (%)	RMSE cm ³ cm ⁻³
10 cm	0.060	0.094	-0.128	2.00	0.97	0.9	0.041
25 cm	0.091	0.138	-0.174	1.92	0.96	1.6	0.060
40 cm	0.134	0.152	-0.120	1.67	0.96	1.6	0.037
80 cm	0.195	0.152	0.040	1.03*	0.94	1.5	0.044
95 cm	0.186	0.151	0.054	0.87	0.91	1.7	0.039
Total 105 cm	0.140	0.140	-0.036	1.26	0.98	0.8	0.012

Ver tabla 3.a.

VERIFICACIÓN DE UN EQUIPO FDR PARA LA MEDIDA DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO EN DOS SISTEMAS DE CULTIVO

Respecto a la parcela no regada de olivar, no se puede asegurar "a priori" que se pueda realizar la corrección de los datos obtenidos, ya que va a depender del comportamiento del humedecimiento del suelo (Tomer y Anderson, 1995). De esta forma, en la parcela del estudio se puede observar que en el sensor más superficial y en el situado a 45 cm, la calibración ha mejorado las lecturas del segundo año de medidas, mientras que en el situado a 20 cm de profundidad ésta ha empeorado los datos obtenidos (en el sensor situado a 75 cm la variación de humedad el segundo año ha sido muy pequeña, por lo que no tiene sentido la corrección). Esto es así ya que para las profundidades de 10 y 45 cm el comportamiento del humedecimiento ha sido el mismo (en el primer caso, el comportamiento del primer año ha mejorado los datos del segundo año, mientras que en el segundo año, el comportamiento ha sido el mismo), en el perfil de 20 cm el comportamiento del primer año, ha empeorado los datos medidos el segundo año.

Sin embargo, los valores de RMSE han disminuido, sobre todo para los sensores más profundos, y para los valores medios del contenido de agua para el perfil de 90 cm, variando entre valores de 0.01 a 0.065 cm³ cm⁻³, siendo mayores estos valores para los sensores más superficiales.

Respecto a la parcela de trigo, las correcciones han empeorado las relaciones entre el contenido de agua medido con sonda de neutrones y el corregido del EnviroSCAN, como consecuencia de la diferencia en el comportamiento de ambas parcelas de un año a otro. Sin embargo, los valores de RMSE han disminuido considerablemente, sobre todo para el contenido medio de agua del perfil de 105 cm de profundidad.

CONCLUSIONES

Al emplear el sistema EnviroSCAN como equipo de medida en tiempo real del contenido de agua en el suelo, hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Al utilizar sistema EnviroSCAN en suelos cuya estructura puede cambiar al variar las condiciones climáticas de la zona o la frecuencia de humedecimiento del suelo (p.ej. suelos arcillosos, o con texturas heterogéneas en climas extremos), se debería procurar que el riego fuera continuo y frecuente a lo largo de la campaña de riegos.

- Si importante es la correcta instalación del equipo en campo con el fin de evitar en lo posible la perturbación del suelo, la ubicación de los sensores es crucial. Si el sistema de explotación es de cobertura completa, sólo hay que tener en cuenta la heterogeneidad del suelo, pero si el sistema es de cobertura parcial, además, habrá que tener en cuenta dónde se concentran las raíces del árbol, función a su vez, del tipo de riego.

- Es necesario realizar la calibración en campo de los equipos que ya se encuentran instalados y funcionando. Esto es esencial, ya que pueden estar dando lecturas que al no ser contrastadas con otro equipo de medidas, provoquen errores en las tomas de decisiones en programación de riegos. La calibración se puede realizar mediante muestreos gravimétricos (método directo de medida del contenido de agua del suelo, pero puede ser engorroso si el suelo es pedregoso o arcilloso) o mediante una sonda de neutrones (método indirecto, muy fiable pero que necesita personal cualificado para su manejo) cada campaña de riegos. Además, es recomendable tomar lecturas para la comparación con el EnviroSCAN periódicamente, con el fin de que no entren en juego errores intrínsecos al equipo de medida, como puede ser la temperatura del suelo.

LISTA DE SÍMBOLOS

a*, b*	ordenada en el origen y coeficiente de las regresiones realizadas no significativamente distinto de cero y de uno, respectivamente, para un $\alpha = 0.05$.
A, B, C	Coefficientes empíricos obtenidos de la calibración de la sonda EnviroSCAN.
e_i	Espesor de suelo asociado a cada sensor del EnviroSCAN (mm)
e'_j	Espesor de suelo asociado cada profundidad de medida de la sonda de neutrones.
ER	Error relativo de las medidas realizadas con el sistema EnviroSCAN, calculado como $RMSE / \bar{\theta}_{SN}$ (%).
ES	Abreviatura utilizada para denominar el sistema EnviroSCAN.
ES_i^k	Denominación de la sonda del EnviroSCAN número i instalada en la parcela k .
ET	Evapotranspiración del cultivo (mm día ⁻¹)
F_n	Frecuencia de oscilación generada por los sensores del EnviroSCAN, normalizada.

i	Subíndice utilizado para enumerar los sensores instalados en cada sonda del EnviroSCAN, en una parcela determinada.
j	Subíndice utilizado para enumerar las medidas realizadas con la sonda de neutrones en cada tubo de acceso, en una parcela determinada.
k	Subíndice utilizado para enumerar las parcelas en las que están instalados los equipos de medida de contenido de agua en el suelo.
m	Número de medidas realizadas por la sonda de neutrones, en un tubo de acceso.
n	Número de sensores instalados en cada una de las sondas del EnviroSCAN
R²	Coefficiente de determinación de las regresiones realizadas
R^{2*}	Coefficiente de determinación no significativo para un $\alpha = 0.05$
RMSE	Raíz cuadrada del error cuadrático medio
SN	Abreviatura utilizada para denominar a la Sonda de Neutrones.
SN_i^k	Denominación del tubo de acceso número i instalado en la parcela k .
Z	Profundidad total de suelo.
Z_i	Profundidad a la que se encuentran situados cada uno de los sensores instalados en las sondas del EnviroSCAN.
Z'_j	Profundidad a las que se realizan las medidas con la sonda de neutrones.
θ	Contenido de agua del suelo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
θ_{ES}	Contenido de agua del suelo calculada a partir de las medidas realizadas por el sistema EnviroSCAN ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
θ_{ES}^c	Contenido de agua del suelo calculada a partir de las medidas corregidas realizadas por el sistema EnviroSCAN ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
$\bar{\theta}_{\text{ES}}$	Contenido de agua del suelo medido con el sistema EnviroSCAN, calculada para un año de medidas ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
$(\theta_{\text{ES}})_Z$	Contenido medio de agua en el perfil de suelo de profundidad Z (mm), calculado a partir de los datos medidos por los sensores del EnviroSCAN ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
θ_{SN}	Contenido de agua del suelo calculado a partir de las medidas realizadas por la sonda de neutrones ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
$\bar{\theta}_{\text{SN}}$	Media del contenido de agua del suelo medido con la sonda de neutrones, calculada para un año de medidas ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
$(\theta_{\text{SN}})_Z$	Contenido medio de agua en el perfil de suelo de profundidad Z (mm), a partir de los datos medidos por la sonda de neutrones ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
$\bar{\theta}_{Z_i}$	Contenido de agua calculado a partir de los datos obtenidos por el sensor del EnviroSCAN situado a la profundidad Z_i ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
$\bar{\theta}_{Z'_j}$	Contenido de agua medido por la sonda de neutrones, para la profundidad Z'_j ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)

REFERENCIAS

- Baumhardt, R.L.; Lascano, R.J.; Evett, S.R. (2000). Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. *Soil Sci. Soc. Am. J. Nov/Dec 2000*. v. 64 (6) p. 1940-1946.
- Bell, J.P.; Dean, T.J.; Hodnett, M.G. (1987). Soil moisture measurement by an improved capacitance technique. II: field techniques, evaluation and calibration, *J. Hydrol.*, 93, 79-90.
- Berengena, J. y Roldán J. (1979). Water needs of soybeans in Guadalquivir Valley. Serie producción vegetal. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. 1979. (10) p. 101-119.
- Campbell, G.S. y Mulla, D.J. (1990). Measurement of soil water content and potential. P. 127-142. In: *Irrigation of Agricultural Crops*. (B.A. Stewart y D.R. Nielsen, eds.) Amer. Soc. Agric. Engn., Madison, Wis
- Campbell G.S. y Campbell, M.D. (1982). Irrigation scheduling using soil moisture measurements: theory and practice. *Adv. Irrig.*, vol. 1, pp. 25-42
- Dean, T.J.; Bell, J.P.; Baty, A.J.B. (1987). Soil moisture measurement by all improved capacitance technique. Part I. Sensor design and performance. *J. Hydrol. (Amsterdam)* 93:67-78.
- Dobson, M.C.; Ulaby, F.T.; Hallikainen, M.T.; El-Rayes, M.A. (1985). Microwave dielectric behavior of wet soil Part II: Dielectric mixing models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 23:35-46.
- Evett, R.S. y Steiner, J.L. (1995). Precision of neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 961-968.
- Fares A. y Alva, A.K. (2000). Soil water components based on capacitance probes in a sandy soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 311-318
- Fernández Fernández M^a D., Bonachela Castaño S., Contreras Sánchez A. y González Céspedes A. M^a. (2004) Evaluación de un equipo de medida continua de humedad basado en la reflectometría en el dominio de frecuencias en un suelo enarenado. XXII Congreso Nacional de Riegos. Logroño.
- Dean, T.J.; Bell, J.P.; Baty, A.J.B. (1987). Soil moisture measurement by all improved capacitance technique. Part I. Sensor design and performance. *J. Hydrol. (Amsterdam)* 93:67-78.
- Gardner, C.M.K., Bell, J.P.; Cooper, J.D.; Dean, T.J.; Hodnett, M.G.; Gardner, N. (1991). Soil water content. p. 1-73. In R.A. Smith and C.E. Mullings (ed.) *Soil analysis -Physical methods*. Marcel Dekker. New York.
- Girona, J.; Mata, M.; Fereres, E.; Goldhamer, D.A.; Cohen, M. (2002). Evapotranspiration and soil water dynamics of peach trees under water deficits. *Agr. Water Manage.* 54: 107-122.

VERIFICACIÓN DE UN EQUIPO FDR PARA LA MEDIDA DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO EN DOS SISTEMAS DE CULTIVO

- Goldhamer, D.A.; Fereres, E.; Mata, M.; Girona, J.; Cohen, M. (1999). Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 124 (4), 437-444.
- Green, R.E. y Topp, G.C. (1992). Survey of use of field methods for measuring soil hydraulic properties. In: Topp, G.C., et al. (Eds.), *Advanced in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*. Soil Sci. Soc. Am. Special Publ. no.30, Madison, WI. pp. 281-288.
- Hanson, B.R. y Peters, D. (2000). Soil type affects accuracy of dielectric moisture sensors. *Calif. Agric.*: 55 (3): 43-47.
- Kuraz, V. (1982). Testing of a field dielectric soil moisture meter. *ASTM Geotech. Test. J.* 4:111-116.
- Kutilek, M. y Nielsen, D.R. (1994). Soil hydrology. *Catena, Cremlingen-Destedt*, p 370
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2002). *Hechos y cifras del sector agroalimentario y del medio rural español*. Secretaría técnica, Madrid.
- Mead, R.M.; Ayars, J.E.; Liu, J. (1995). Evaluating the influence of soil texture, bulk density and soil water salinity on a capacitance probe calibration. *ASAE Pap.* 95-3264. ASAE. St. Joseph. MI.
- Mead, R.M.; Soppe, R.W.O.; Ayars, J.E. (1996). Capacitance probe observations of daily soil moisture fluctuations: p. 916-923. In C.R. Camp et al. (ed.) *Evapotranspiration and irrigation scheduling*. Proc. Int. Conf.. San Antonio. TX. 3-6 Nov 1996. ASAE. St. Joseph. MI.
- Morgan, K.T.; Parsons, L.R.; Wheaton, T.A.; Pitts, D.J.; Obreza, T.A. (1999). Field Calibration of a Capacitance Water Content Probe in Fine Sand Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 987-989.
- Ould Mohamed, S.; Bertuzzi, P.; Bruend, A.; Raison, L.; Bruckler, L. (1997). Field evaluation and error analysis of soil water content measurement using the capacitance probe method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 399-408.
- Paltineanu, I.C. y Starr, J.L. (1997). Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory Calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1576-1585.
- Richards, L.A. (1949). Soil moisture tensiometer materials and construction. *Soil Sci.* 53:241-248.
- Roth, K.; Schulin, R.; Flüher, H.; Attinger, W. (1990). Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resour. Res.* 26:2267-2273.
- Starr, L. y Paltineanu, I.C. (1998). Real-time soil water dynamics over large areas using multisensor capacitance probes and monitoring system. *Soil & Tillage Research* 47: 43-49.
- Thomas, A.M. (1966). In situ measurement of moisture in soil and similar substances by 'fringe' capacitance. *J. Sci. Instrum.* 43:21-27.
- Tomer, M.D., y Anderson, J.L. (1995). Field evaluation of a soil water-capacitance probe in a fine sand. *Soil Sci.* 159:90-97.
- Veldkamp E. y O'Brien, J. (2000). Calibration of a Frequency Domain Reflectometry Sensor for Humid Tropical Soils of Volcanic Origin. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1549-1553.
- Villalobos, F. (1988). Los procesos de evaporación, transpiración y precipitación en los modelos de programación de riegos. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba.
- Villalobos, F.J. (1993). Los servicios de asesoramiento de riegos y las necesidades hídricas de los cultivos. *Riegos y Drenajes XXI*, 71: 24-28.
- Wobschall, D. (1978). A frequency shift dielectric soil moisture sensor. *IEEE Trans. Geosci. Electron.* GE-16(2): 112-118.
- Zekri, M. y Parsons, L.R. (1999). Determination of field capacity in a Florida sandy soil and drainage time at different depths. *Hort Technology*. Apr/June 1999. v. 9 (2) p. 258-261.

