

EVALUACIÓN DE SONDAS DE CAPACITANCIA PARA EL SEGUIMIENTO DE LA HUMEDAD DE UN SUELO ARCILLOSO BAJO DISTINTAS CONDICIONES Y TIPOS DE MANEJO

I.García¹, J.A. Jiménez², J.L. Muriel³, F. Perea⁴ y K. Vanderlinden⁵.

¹ivan.garcia.ext@juntadeandalucia.es.

²boca_79@msn.com.

³josel.muriel@juntadeandalucia.es

⁴francisco.perea.ext@juntadeandalucia.es

⁵karl.vanderlinden.ext@juntadeandalucia.es

RESUMEN. Los instrumentos electromagnéticos, tales como las sondas TDR y FDR han aportado nuevas ventajas al estudio de la humedad del suelo, de forma rápida y directa evitando además la complejidad que entraña el uso de fuentes de radiación como es el caso de la sonda de neutrones. Sin embargo, al tratarse el suelo de un sistema cuyas propiedades son cambiantes en el tiempo, la señal de las sondas se ve afectada por factores muy diversos independientes del contenido de humedad. A partir de sondas FDR tipo Enviroscan se ha estudiado la variación espacio temporal del agua en un suelo arcilloso de bujeo, en la campiña de Carmona, sometido a dos tipos de tratamientos, siembra directa (SD) y laboreo convencional (LC). El objetivo primero fue evaluar el comportamiento de dichas sondas de capacitancia en las condiciones de un suelo, cuyas propiedades evidencian una gran variabilidad en el tiempo, tales como los ocurridos en la densidad aparente debido a la presencia de arcillas expansibles; el nivel de compactación y el efecto de los tratamientos. Mediante un análisis de varianza factorial se comprobó que los resultados obtenidos sugerían la necesidad de realizar calibraciones in situ, la cual se efectuó frente a contrastes gravimétricos que culminaron en funciones individuales de calibración para cada sonda; así como la necesidad de aumentar el número de repeticiones. Tras las nuevas calibraciones y como segundo objetivo se quiso evaluar el efecto de los tratamientos en la evolución del contenido de humedad en el suelo. Los resultados demostraron que, la SD tiende a acumular más agua en el suelo, especialmente en los primeros centímetros, agotándose más lentamente y apareciendo una distribución más uniforme a lo largo del perfil.

ABSTRACT. Electromagnetic techniques such as TDR and FDR are increasingly used for automated continuous soil water content monitoring. However, most calibration methods assume that other soil properties remain constant throughout the monitoring period, an assumption that is violated in cracking heavy clay soils. We used Enviroscan FDR probes to monitor soil moisture in a heavy clay soil near Carmona (Seville), subject to non tillage (NT) and conventional tillage (LC). The main objective was to

analyse the behaviour of capacitance probes in this soil with changing bulk density throughout the wetting and drying cycles. Factorial variance analysis was used to determinate whether these changing soil conditions had a significant influence on the measurements. Results indicate that more probes are necessary to detect significant differences between the different tillage alternatives, but the SD seems to accumulate more soil water, specially in the first centimetres and runs out the water more slowly.

1. Introducción

El conocimiento directo y continuo de la variación espacio temporal del agua en el suelo resulta de gran valor para las técnicas relacionadas con la agricultura de precisión en general, y el manejo del agua en particular (Starr, 2005).

Son numerosos los factores que influyen en la variación del agua en el suelo tales como la topografía, el tamaño de partícula, los contenidos de arcilla, de materia orgánica así como los distintos sistemas de laboreo (Hidalgo et al. 2003).

Dentro de los métodos indirectos, para medir el contenido de humedad de un suelo, destacan la sonda de neutrones y aquellos basados en la medición de la constante dieléctrica del medio como son el uso de sensores TDR y FDR (Green, 1992).

La sonda de neutrones, aún resultando un método muy fiable cuenta con el inconveniente de requerir una calibración local y el uso de una fuente de radiación, lo cual complica y limita sensiblemente sus posibilidades de uso (Martínez et al. 2004).

Las sondas TDR y FDR miden la constante dieléctrica del medio, la cual es una propiedad intrínseca de éste (Ferre y Topp, 2002).

El sistema FDR calcula la humedad de un suelo mediante la respuesta a cambios en la constante dieléctrica del medio usando una técnica de reflectometría de dominio de frecuencias conocida como capacitancia (Sentek Pty, 1999).

Este tipo de sistemas de medida ofrece grandes ventajas con respecto a los anteriores métodos, como son la posibilidad de obtener un gran número de medidas, de forma continuada, y sin disturbar las propiedades del suelo, pero, sin embargo cuentan con una serie de inconvenientes a veces difíciles de resolver. Entre ellos está la necesidad de realizar calibraciones que requieren de mucho tiempo, debido al elevado número de repeticiones que son necesarias con el fin de obtener un amplio rango de humedades. Estas calibraciones resultan ser de carácter casi obligado en suelos con elevada salinidad, elevados contenidos en materia orgánica, o como es nuestro caso, un alto porcentaje de arcillas (Sentek, 2001, 1999). Otra de las dificultades que plantean el uso de este tipo de sondas es el escaso volumen de suelo al que vienen referidas las medidas, lo cual implica que pequeñas variaciones en el medio como la existencia de grietas o una cierta pedregosidad, pueden influenciar drásticamente en los valores obtenidos.

A partir de estas premisas, los objetivos planteados en el presente trabajo han sido los siguientes: 1) El estudio del comportamiento de dichas sondas en diferentes condiciones de humedad, profundidad y localización, para un suelo cuyas características resultan muy específicas; 2) calibración de las sondas para dichas condiciones; 3) estudio de la variación espacio temporal del contenido de agua en el suelo y 4) estudiar el efecto de dos sistemas de manejo de suelo en los contenidos de humedad a lo largo del tiempo.

2. Materiales y métodos

2.1. Localización del ensayo

El presente trabajo se ha realizado en la finca experimental Tomejil, situada en la campiña de Carmona, Sevilla (37° 24' 07'' N y 5° 35' 10'' O) y a una altitud de 79 msnm.

2.2. Características del suelo y climatología

Se trata de un suelo arcillo de bujeo (*Typic Haploxerert*) (Soil Taxonomy, 1999), uniforme y profundo con unos contenidos medios de arcilla del 65% del grupo de las esmectitas, 25% de limo y 10% de arena (Perea et al. 2003), no existiendo diferencias claras entre los horizontes edáficos, ni por el color, ni por variaciones en la textura (Tabla 1).

Debido a sus propiedades el suelo cuenta con una gran porosidad y una elevada capacidad de retención de agua. Al mismo tiempo, el pequeño tamaño de sus poros y su naturaleza plástica limita la velocidad de infiltración y le permite mantener la humedad durante la época estival, dando al suelo unas propiedades altamente productivas (Giráldez y Sposito, 1978).

La climatología de la zona es típicamente mediterránea. Se caracteriza por tener inviernos suaves y veranos extremadamente secos y muy calurosos. Las precipitaciones son escasas e irregulares en el tiempo, tanto inter como

intraanualmente, apareciendo ciclos de años secos y otros de precipitaciones más abundantes. Las lluvias se concentran en torno a los meses de noviembre, diciembre y enero; siendo la primavera más seca que el otoño y de precipitaciones más irregulares.

Tabla 1. Características del perfil del suelo. (Perea et al. 2003).

Horizonte F.A.O	Prof (cm)	Color	Caliza %	Análisis Textural (%)			Clase
				Arcilla	Limo	Arena	
Ap	0-25	5Y 4/3	25.9	65.1	24.5	10.4	Ac
Ac ₁	25-34	5Y 4/3	25.9	67.1	22.5	10.4	Ac
Ac ₂	34-98	2.5Y 4/3	31.4	67.6	23.0	9.4	Ac

Las parcelas experimentales desde 1982 han estado sometidas a distintas condiciones de laboreo, SD y LC bajo una rotación de cultivo trigo-girasol-leguminosa. Las labores en las parcelas de LC han consistido en el alzado del suelo con arado de vertedera, dando a continuación dos o tres pases de cultivador sucesivos para reducir el tamaño medio de los agregados y eliminar la flora acompañante.

En las parcelas bajo tratamiento con SD una vez realizada la cosecha no se hace ninguna operación con maquinaria, excepto la de siembra y aplicación de los tratamientos fitosanitarios, fertilizantes y herbicidas que sean necesarios para mantener la cubierta limpia.

2.3. Sondas de capacitancia FDR

El método FDR se basa en la relación existente entre el contenido volumétrico de humedad y la constante dieléctrica aparente del medio. Dicha constante se determina a partir del tiempo de tránsito de una señal electromagnética a lo largo de una sonda metálica introducida en el suelo (Ferre y Topp, 2002).

Este tipo de sondas permiten la obtención de un registro de datos en continuo a lo largo de todo el perfil del suelo, ofreciendo medidas más o menos precisas pero que necesitan de una calibración previa en suelos arcillosos o con altos contenidos en materia orgánica. (Paltineanu y Starr, 1997; Sentek, 1999; Fares y Alva, 2000; Sentek, 2001; Starr y Paltineanu, 2002; Ferre y Topp, 2002). Las sondas cuentan con sensores que pueden distribuirse a lo largo de un metro de profundidad, permitiendo de este modo obtener datos a diferentes niveles.

Cada sensor de 5.1 cm de diámetro y 7.5 cm de longitud, mide en una distancia axial de 10 cm, aunque aproximadamente el 93% de la señal radial sólo afecta a una distancia de tres centímetros del tubo de acceso (Paltineanu y Starr, 1997).

Previamente, deben ser calibrados antes de la instalación por medio de lecturas de frecuencia específicas en agua y en aire seco. La frecuencia normalizada o universal se calcula entonces de la siguiente manera:

$$SF = (SF_a - SF_s) / (SF_a - SF_w) \quad (1)$$

Siendo:

SF_a= Lectura de frecuencia del sensor en el aire seco
 SF_s= Lectura de frecuencia del sensor en el suelo
 SF_w= Lectura de frecuencia del sensor en el agua

El contenido de agua en el suelo (θ) es entonces una función exponencial de SF:

$$\theta = \{(SF-c)/a\}^{1/b} \quad (2)$$

Donde a, b y c son coeficientes que varían según la calibración, y dependiendo de ellos se puede obtener la humedad gravimétrica o volumétrica. La calibración de fábrica es válida para un amplio intervalo de valores en distintos tipos de suelo y condiciones, pero no es aplicable en los casos de arenas gruesas, arcillas expansibles (como es nuestro caso), suelos con contenidos en materia orgánica altos y suelos salinos (Starr y Paltineanu, 2002).

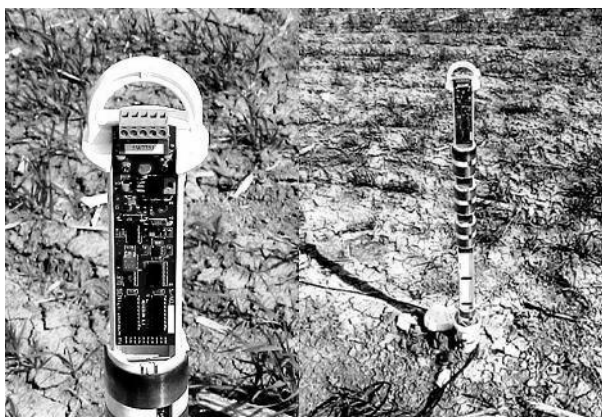


Fig. 1. Regleta portasensores y sensores de humedad.

2.4. Metodología

En dos parcelas experimentales de 180x15 m, una bajo LC y otra de SD, se instalaron dos tubos de un metro de profundidad, colocados a 7 m de distancia, en donde se insertaban las regletas porta-sensores, que fueron colocados a 10, 20, 30, 60 y 90 cm de profundidad.

Durante algo más de un año (Diciembre de 2003 a Marzo de 2005) se ha estudiado la evolución del contenido de agua en el suelo a distintas profundidades mediante la utilización de sondas de capacitancia, FDR tipo Enviroscan.

Por otra parte, con una periodicidad semanal y entre los meses de diciembre de 2003 y junio de 2004, se tomaron en cada parcela muestras por triplicado para profundidades de 0-20, 20-40 y 40-60, cercanas a los tubos de acceso de las sondas para el cálculo de humedad gravimétrica. Con este procedimiento se realizó la calibración *in situ* de las sondas de capacitancia que la misma empresa fabricante (Sentek, 2001) recomienda.

2.5. Análisis estadístico de los datos

Para evaluar la fiabilidad de los datos de humedad registrados con las sondas, se realizó un análisis multifactorial de la varianza de las lecturas de la SF emitidas por los distintos sensores, así como de los

contenidos de humedad gravimétrica del suelo una vez realizadas las calibraciones pertinentes; con el objetivo de cuantificar qué factores están influyendo sobre las medidas arrojadas. Se tomaron como posibles factores de influencia la profundidad, tratamientos, sondas y cuatro periodos que se definieron en función del contenido de humedad. En aquellos casos donde el análisis factorial fue positivo se realizó un test de Tukey para saber donde se localizaban las diferencias significativas.

Por otra parte, para los valores obtenidos manualmente y con el objetivo de estudiar las posibles diferencias significativas de las medias entre tratamientos, se le realizó una t de student a los valores obtenidos.

3. Resultados y discusión

Para el estudio de los datos se definieron cuatro periodos distintos en función de los contenidos de humedad del suelo. PI ó periodo húmedo, que se corresponde con los meses de diciembre de 2003 y enero, febrero, marzo y abril de 2004; en los cuales se registraron precipitaciones que alcanzaron un total de 500 mm. PII ó periodo de descarga; correspondiente a los meses de mayo, junio y primeros días de julio, sin precipitaciones, en el cual los valores de humedad descienden desde contenidos superiores al 35% de θ_g a porcentajes inferiores al 18%, quedando por debajo del punto de marchitez permanente. PIII ó periodo seco, correspondiente a los meses de julio, agosto y septiembre, en donde no se registran variaciones evidentes en los contenidos de humedad. Finalmente, un PIV ó periodo de recarga, desde Octubre de 2004 a Marzo de 2005, en el cual, debido a la escasez de precipitaciones registradas, el suelo ha ido acumulando agua muy lentamente, alcanzándose valores de humedad muy por debajo de los registrados en la campaña anterior (un 50% menos de humedad).

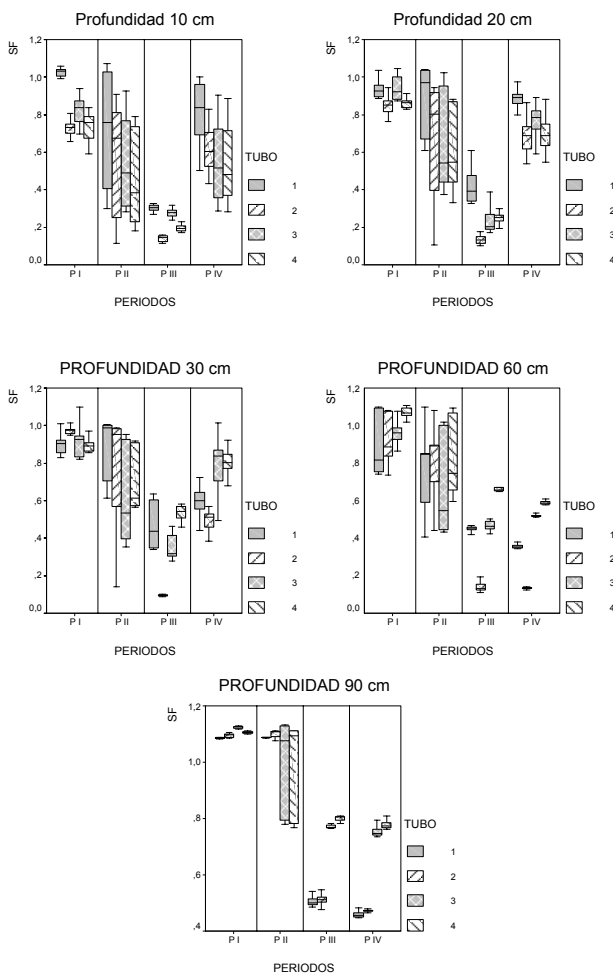
Los datos de la SF obtenidos a partir de las sondas se analizaron para cada periodo y profundidad.

Tabla 2. Análisis descriptivo de los datos de la SF obtenidos a partir de las sondas.

Periodos Tratamientos	PERIODO I		PERIODO II		PERIODO III		PERIODO IV	
	SD	LC	SD	LC	SD	LC	SD	LC
MEDIA	0.945	0.94	0.806	0.71	0.325	0.457	0.552	0.677
Max	1.105	1.131	1.111	1.132	0.824	0.81	1.75	1.01
Min	0.657	0.454	0.105	0.179	0.087	0.171	0.124	0.211
S²	0.015	0.018	0.07	0.072	0.031	0.047	0.051	0.023
S	0.123	0.133	0.27	0.268	0.175	0.217	0.225	0.15

PI: Periodo Húmedo
 P II: Periodo de descarga
 P III: Periodo Seco
 P IV: Periodo de Recarga
 SD: Siembra Directa
 LC: Laboreo Convencional

Como puede observarse en la Fig. 2, en apariencia no existe un comportamiento similar entre tubos pertenecientes a tratamientos iguales ni diferencias apreciables entre tubos de distintos tratamientos, excepto para los valores de SF obtenidos a 90 cm.



Tubos 1 y 2: Tubos instalados en una parcela bajo SD
 Tubos 3 y 4: Tubos instalados en una parcela bajo LC
 P I: Periodo Húmedo
 P II: Periodo de descarga
 P III: Periodo Seco
 P IV: Periodo de Recarga

Fig. 2. Variación de los valores de la SF obtenidos a partir de las sondas FDR en distintos periodos de humedad y para cada profundidad.

Tal y como puede observarse en la Tabla 1, no parecen existir grandes diferencias en los valores de la SF pertenecientes a distintos tratamientos, siendo las varianzas y las medias para cada periodo muy similares entre los dos tratamientos.

Como objetivo principal del trabajo, se quiso estudiar la precisión de los datos obtenidos a partir de las sondas y el efecto de posibles factores que pudieran estar afectando a las medidas. Para ello se realizó un análisis de varianza multifactorial a partir de los datos de la SF y considerándose como posibles factores de influencia la profundidad, los tubos de medida y los periodos.

El análisis de varianza evidenció que, tanto los tubos como la profundidad y el periodo eran factores influyentes en las medidas de las sondas. Para buscar donde se localizaban las diferencias significativas se realizó un test de Tukey. Se comprobó que en muy pocas ocasiones los tubos pertenecientes a un mismo tratamiento arrojaban

valores similares, (Tabla 3) lo cual pone en evidencia la gran variabilidad de los datos arrojados por sondas que, en principio se encuentran bajo las mismas condiciones. Esto sugiere la existencia de factores distintos a la humedad que están influenciando notablemente en los datos obtenidos, siendo necesario un aumento del número de sondas, así como la calibración previa de éstas, tal y como se recomienda por parte del fabricante y otros autores. (Paltineanu y Starr, 1997; Sentek, 1999; Sentek 2001; Fares y Alva, 2004).

Tabla 3. Análisis multifactorial para los valores de la SF en relación a la profundidad, tubos y periodos.

Prof.	Periodo I	Periodo II	Periodo III	periodo IV
10 cm	2 a ◀	4 a ◀	2 a	4 a ◀
	4 a ◀	3 ab ◀◀	4 b	3 a ◀
	3 b	2 b ◀	3 c	2 b
	1 c	1 c	1 d	1 c
20 cm	2 a ◀	4 a ◀◀	2 a	2 a ◀
	4 a ◀	3 a ◀◀	3 b ◀	3 a ◀◀
	3 b ◀	2 a ◀	4 b ◀	4 a ◀◀
	1 b ◀	1 b	1 c	1 b
30 cm	4 a ◀	3 a	2 a	2 a
	3 a ◀	4 b ◀	3 b	1 b
	1 a ◀	2 b ◀	1 c	3 c ◀
	2 b	1 c	4 d	4 c ◀
60 cm	1 a	3 a ◀	2 a	2 a
	2 b	2 a ◀◀	1 b	1 b
	3 c	1 ab ◀◀	3 c	3 c
	4 d	4 b ◀	4 d	4 d
90 cm	1 a	4 a ◀	1 a	1 a
	2 b ◀	3 a ◀◀	2 b	2 b
	4 b ◀	1 ab ◀◀	3 c	3 c
	3 c	2 b ◀	4 d	4 d

Periodo I: Periodo Húmedo
 Periodo II: Periodo Descarga
 Periodo III: Periodo Seco
 Periodo IV: Periodo Recarga
 1 y 2: Tubos correspondientes a SD
 3 y 4: Tubos correspondientes a LC
 ◀Coincidencias entre tubos pertenecientes a distintos sistemas de manejo.
 ◀◀Coincidencias entre tubos pertenecientes a un mismo tratamiento.

Para corregir estas diferencias entre tubos de un mismo tratamiento y obtener medidas más cercanas a los valores reales (obtenidos por gravimetría) se realizaron las curvas de calibrado a partir de las medidas que se fueron obteniendo durante todo un ciclo de cultivo en muestras pertenecientes a tres profundidades distintas: 0-20, 20-40 y 40-60.

Las funciones de calibración obtenidas para cada sonda se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros a, b y c para las curvas de calibrado obtenidas a partir de los datos de gravimetría. $\theta_v = \{(SF-c)/a\} \exp 1/b$. (Muriel et al. 2005)

Trat	a	b	c	N	R ²	RSS
SD1	140'924	0'0054	-139'083	96	0'699	0'9457
SD2	151'233	0'0065	-149'210	92	0'715	1'4470
LC1	150'944	0'0053	-149'065	89	0'888	0'4953
LC2	150'797	0'0041	-149'209	78	0'763	0'7084

N: Número de muestras.
 RSS: Suma de cuadrados residuales.
 Trat: Tratamientos

Una vez conocidos los valores de humedad, calculados a partir de los coeficientes de calibración y los valores de SF obtenidos a partir de las sondas se realizó un nuevo análisis de varianza multifactorial para comprobar si, tras la calibración, el efecto por parte de determinados factores de incidencia en la medida se había atenuado y comprobar dónde se localizaban diferencias significativas.

Tabla 5. Análisis descriptivo de los datos de humedad gravimétrica obtenidos tras las calibraciones.

Periodos	PERIODO I		PERIODO II		PERIODO III		PERIODO IV	
Tratamientos	SD	LC	SD	LC	SD	LC	SD	LC
Media	0.327	0.334	0.282	0.252	0.156	0.173	0.208	0.229
Max	0.389	0.461	0.392	0.462	0.258	0.283	0.757	0.339
Min	0.23	0.167	0.128	0.101	0.123	0.099	0.136	0.11
S ²	0.002	0.005	0.006	0.01	0.001	0.003	0.003	0.002
S	0.044	0.069	0.076	0.0976	0.03	0.057	0.055	0.046

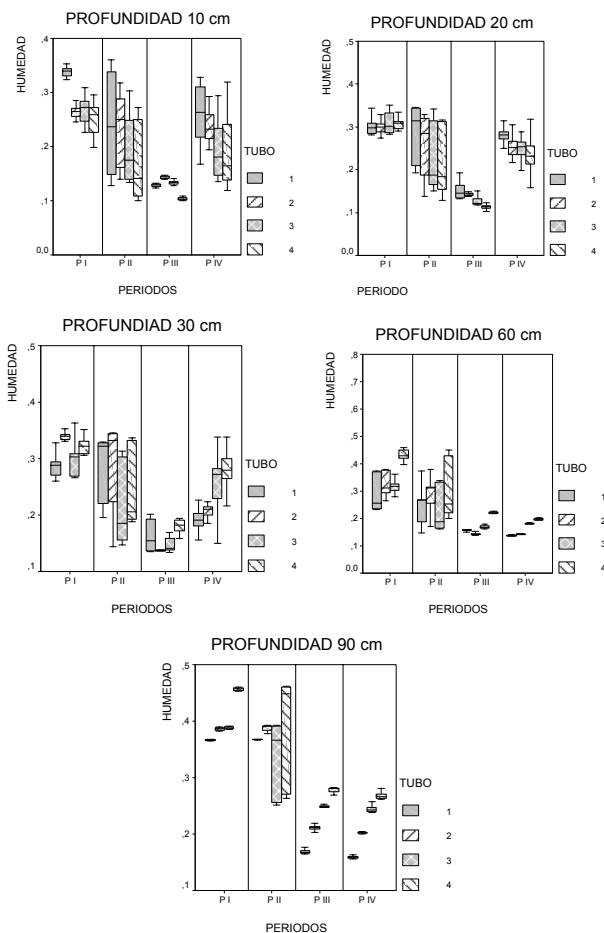


Fig. 3. Variación de los valores de humedad obtenidos a partir de las sondas FDR en distintos periodos de humedad y para cada profundidad.

En el análisis descriptivo que se muestra en la Tabla 5 se observan valores más altos para las varianzas de los datos de humedad en parcelas bajo LC. Asimismo, durante el periodo de desecado la SD tiende a acumular mayor cantidad de agua, aunque la diferencia con respecto al LC es pequeña.

En la Fig. 3 se muestra la variación de los valores de humedad experimentados por las sondas para cada profundidad y periodo. Parece observarse una cierta

tendencia de valores más altos para los tubos instalados en la parcela bajo SD, si bien, esto sólo ocurre en los primeros centímetros del perfil. Al profundizar, dicha tendencia se invierte a favor de las sondas instaladas en las parcelas bajo laboreo convencional.

Tabla 6. Análisis multifactorial para los valores de humedad gravimétrica en relación a la profundidad, los tubos y periodos.

Prof.	Periodo I	Periodo II	Periodo III	Periodo IV
10 cm	4 a	4 a◀	4 a	4 a◀
	2 b←	3 a◀	3 b←	3 a◀
	3 b←	2 b◀	1 b←	2 b
	1 c	1 b◀	2 c	1 c
20 cm	1 a◀	4 a◀	4 a	4 a
	2 a◀	3 a◀	3 b	2 b←
	3 b◀	2 b◀	2 c	3 b←
	4 b◀	1 b◀	1 d	1 c
30 cm	1 a←	3 a	2 a	1 a
	3 a←	4 b	3 b	2 b
	4 b	2 c◀	1 c	3 c
	2 c	1 c◀	4 d	4 d
60 cm	1 a	3 a←	2 a	1 a
	3 b←	1 a←	1 b	2 b
	2 b←	2 b	3 c	3 c
	4 c	4 c	4 d	4 d
90 cm	1 a	3 a←	1 a	1 a
	3 b←	1 a←	2 b	2 b
	2 b←	4 b←	3 c	3 c
	4 c	2 b←	4 d	4 d

Periodo I: Periodo Húmedo

Periodo II: Periodo Descarga

Periodo III: Periodo Seco

Periodo IV: Periodo Recarga

1 y 2: Tubos correspondientes a SD

3 y 4: Tubos correspondientes a LC

◀ Coincidencias entre tubos de un mismo tratamiento que difieren con tubos de tratamientos distintos.

← Coincidencias entre tubos de distintos tratamientos.

En el análisis de varianza realizado a partir de los valores de humedad se observó que, durante el periodo de desecado, y más concretamente en la zona más superficial, las medidas de los tubos de un mismo tratamiento no mostraban diferencias significativas, apareciendo sin embargo entre tubos de distintos tratamientos.

Con las nuevas calibraciones se consiguió en parte que, sondas sometidas a condiciones muy similares (instaladas en una misma parcela a una distancia de 7 m) respondieran con comportamientos similares, aunque no para todas las profundidades y periodos de humedad.

Para poder explicar estos resultados, y con el objetivo de concretar en que periodos de humedad se localizaban diferencias significativas entre los dos tratamientos, se calculó la t de student a los valores de humedad obtenidos mediante gravimetría para las tres profundidades (0-20, 20-40 y 40-60). (Fig(s). 4, 5 y 6). Los resultados obtenidos demuestran que las diferencias significativas se localizaban en los puntos pertenecientes al periodo de desecado, lo cual coincide con el resultado obtenido a partir del análisis de varianza realizado a los valores de humedad obtenidos con las nuevas calibraciones.

Tal y como puede observarse en las gráficas, durante el periodo húmedo, las diferencias entre el laboreo convencional y la siembra directa no existen, a excepción de lo que ocurre en los primeros 20 centímetros. Sin

embrago, a medida que nos acercamos al periodo seco, las diferencias significativas se concentran en las tres profundidades.

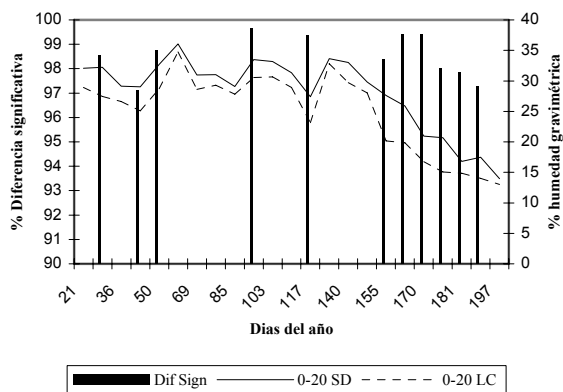


Fig. 4. Evolución de la humedad en los 20 primeros centímetros del perfil y diferencias significativas entre tratamientos.

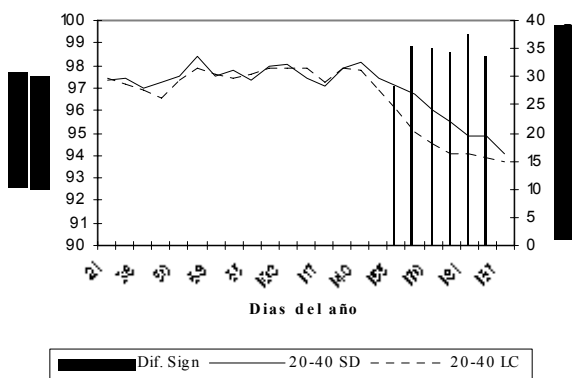


Fig. 5. Evolución de la humedad entre 20-40 cm del perfil y diferencias significativas entre tratamientos.

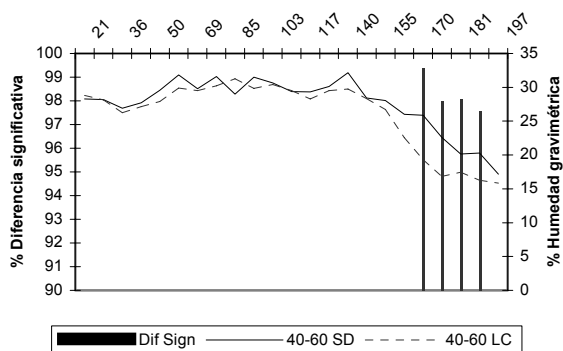


Fig. 6. Evolución de la humedad a 40-60 cm del perfil y diferencias significativas entre tratamientos.

Por otra parte, tal y como se observa en las Fig(s). 4, 5 y 6 el efecto del laboreo ha provocado cambios en las propiedades físicas del suelo que han favorecido un aumento de su capacidad de almacenamiento y retención,

como así se ha demostrado en estudios realizados por diversos autores (González y Ordóñez, 1997; Giráldez, 1997; Berenjena, 1997).

Los datos obtenidos corroboran el hecho de que, las diferencias significativas entre tratamientos, calculadas a partir de los datos de humedad obtenidos mediante las sondas FDR se concentran en el periodo de desecado y en los primeros centímetros del perfil.

Otra cuestión importante dentro del estudio del comportamiento del agua en el suelo, fue analizar la distribución del agua en el perfil en un tratamiento y otro.

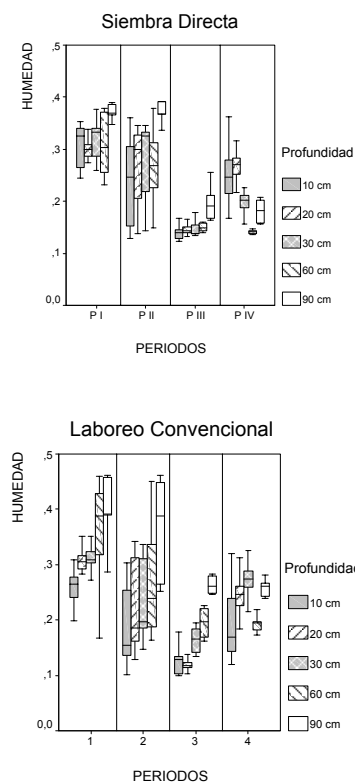


Fig. 7. Distribución del agua en el perfil a distintas profundidades y en distintos periodos de humedad del suelo.

En la Fig. 7 se puede observar que en las parcelas con SD el agua se distribuye de forma más equitativa a lo largo del perfil, mientras que, en las parcelas de LC existe una cierta tendencia a la acumulación de agua en las zonas más profundas, dificultándose así la disponibilidad por parte del cultivo.

Para comprobar si estas diferencias eran estadísticamente significativas se realizó un análisis de la varianza del contenido del agua en el suelo a distintas profundidades (Tabla 7). Se pudo observar que en la siembra directa se produce una equiparación de los contenidos de humedad en el periodo de desecado y en el periodo seco, lo cual nos hace pensar que el agotamiento de agua se ha producido de una manera más equilibrada en todo el perfil, mientras que en el LC existe una tendencia a que parte del agua quede retenida a profundidades superiores a los 60 cm, de difícil acceso para la planta. Estos resultados coinciden con otros trabajos realizados donde se comprobaba que las técnicas

relacionadas con el mínimo o nulo laboreo favorecen una distribución más homogénea del agua en el perfil. (Muriel et al. 2005).

Tabla 7. Análisis multifactorial para los valores de humedad gravimétrica en relación a la profundidad, dentro de un tratamiento determinado y dentro de cada periodo.

Tratamiento	Periodo I	Periodo II	Periodo III	Periodo IV
SD	2 a	1 a	1 a	4 A
	1 a	4 B◀	2 b◀	5 b
	4 b	2 bc◀	3 B◀	4 C
	3 c	3 c◀	4 b◀	1 d
	5 d	5 d	5 c	2 e
LC	1 a	1 a	2 a	1 a◀
	2 b	2 b	1 a	4 a◀
	3 B	3 B	3 b	2 b
	4 C	4 C	4 c	5 C
	5 d	5 d	5 d	3 d

Periodo I: Periodo Húmedo

Periodo II: Periodo Descarga

Periodo III: Periodo Seco

Periodo IV: Periodo Recarga

SD: Siembra Directa

LC: Laboreo Convencional

◀ Coincidencias entre profundidades superiores (10, 20, 30) y profundidades inferiores (60, 90).

4. Conclusiones

Las sondas de capacitancia FDR permiten un registro en continuo de los valores de la humedad en el suelo, posibilitando una información directa y en tiempo real.

Los sensores, para suelos con características similares a éstos y regímenes de humedad tan variables, deben ser calibrados con el objetivo de mejorar su exactitud y precisión debido a la influencia en la medida de otros factores independientes al contenido de humedad.

El hecho de que tras las calibraciones manuales, las medidas de los sensores sigan estando influidas puede deberse a que éstas se hicieron con muestras tomadas durante el periodo húmedo y desecado, y no durante el periodo seco y de recarga.

Los resultados sugieren el cálculo de nuevas funciones de calibración en las que puedan incluirse la variabilidad de factores potencialmente influyentes en las medidas como la variación de la densidad aparente, la textura del suelo o el nivel de compactación.

En lo referente a la diferencia de tratamientos, en las parcelas bajo SD se almacena más cantidad de agua en los primeros centímetros del perfil, apareciendo diferencias significativas en todo el periodo de desecado, en el cual, las parcelas bajo LC comienzan a perder agua antes que las parcelas bajo SD, poniendo por lo tanto menor cantidad a disposición del cultivo en el periodo de máxima demanda.

Los suelos bajo siembra directa permiten un reparto más igualitario del agua a lo largo de todo el perfil mientras que en suelos bajo laboreo convencional hay una cantidad del total del agua almacenada que queda retenida a profundidades superiores a los 60 cm y por lo tanto de difícil acceso para el cultivo.

Referencias

- Berenjena, J. 1997. Efecto del laboreo sobre el contenido de agua en el suelo. En: Agricultura de Conservación. Fundamentos agronómicos, medioambientales y económicos. Asociación Española del Laboreo de Conservación / Suelos Vivos. L. García y R. González (eds) pp: 51-74.
- Fares, A. y A.K. Alva. 2000. Evaluation of capacitance probes for optimal irrigation of citrus through soil moisture monitoring in an entisol profile. Irrigation Science 19: 57-64.
- Ferré, P. A. y G. C. Topp. 2002. Time domain reflectometry. En: Dana, J.H. & Topp, G. C. (Eds), Methods of soil Analysis, Part 4-Physical Methods, pp.434-446. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Giráldez, J.V. 1997. Efectos de los sistemas de laboreo sobre las propiedades físicas del suelo. En: Agricultura de conservación. Fundamentos agronómicos, medioambientales y económicos. Asociación Española del Laboreo de Conservación/ Suelos Vivos L.García y R. González (eds). pp13-40.
- Giráldez, J.V. y G. Sposito, 1978. Water Resources Research. 14, 314-318
- González, P. y Ordóñez, R. Efecto del laboreo sobre la materia orgánica y fertilidad de los suelos. En: Agricultura de Conservación. Fundamentos agronómicos, medioambientales y económicos. Asociación Española del Laboreo de Conservación / Suelos Vivos. L. García y R. González (eds). pp: 41-50.
- Green, R.E., Topp, G. C., 1992. Survey of use of fields methods for measuring soil hydraulic properties. Pp: 281-288 G. C. Topp et al (ed). Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practise. SSSA Spec. Publ. 30. SSSA. Madison. WI.
- Hidalgo, J., M. Pastor y J. C. Hidalgo. 2003. Evaluación de una sonda FDR para la estimación de la evolución del contenido de agua en el suelo y para el control de riegos en olivar. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo VI. J. Álvarez-Benedi y P. Marinero.
- Martínez, R. S. Montero, J., Moreno, M., Tarjuelo, J.M., de Juan, J.A. 2004. Estudios de calibración de sondas de capacitancia para la medición de la humedad del suelo. Actas del XII Congreso Nacional de Riegos. Logroño.
- Muriel, J.L.; Vanderlinden, K.; Perea, F.; García I. Y Jiménez, J.A. 2005. Dinámica del agua en suelos sometidos a distintos sistemas de laboreo. En: VI Simposio del Agua en Andalucía. Tomo I. J.A. López-Geta, J.C. Rubio Campos, M. Martín Machuca Eds.
- Paltineanu I.C. y J.L. Starr. 1997. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. Soil Science Society of America Journal, 61:1576-1585.
- Perea, F., Giráldez, J.V., González, P., Gil, J. y Ordóñez, R. 2003. Influence of soil moisture on the compaction of clay soils under conservation agriculture in mediterranean environments. En: Actas del II World Congress on Conservation Agriculture. Paraná, Brasil. 11-15 agosto.
- Sentek 2001. Calibration of Sentek Pty Ltd Soil Moisture Sensors. Sentek Pty Ltd. Stepney, Australia.
- Sentek. 1999. Diviner 2000. Guía del usuario. Versión 1.0
- Soil taxonomy, 1999. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2ª ed. Washington USDA. Natural Resources Conservation Service. 815-816 pp.
- Starr, G.C. 2005. Assessing temporal stability and spatial variability of soil water patterns with implications for precision water management. Agriculture Water Management 72 (2005) 223-243.
- Starr, J.L. y I.C. Paltineanu. 2002. Capacitance Devices. En: Dane, J.H. y G.C. Topp, G.C. (Eds.) Methods of Soil Analysis. Part 4- Physical Methods. pp. 463-474. American Agronomy Society, Madison, WI, USA.