

USO DE SONDAS FDR PARA BALANCE DE AGUA EN SUELO: CALIBRACIÓN Y APLICACIÓN¹

Marano*, R. P.¹; Ledesma y F.²; Camussi, G.³

(1) Profesor Asociado Diagnóstico y Tecnología de Aguas Facultad de Ciencias Agrarias. UNL; (2) Ms Sc Riego y Drenaje, Profesional INTA EEA Cerrillos; (3) Auxiliar Docente Diagnóstico y Tecnología de Aguas de la Facultad de Ciencias Agrarias. UNL,

*autor de contacto marano@fca.unl.edu.ar, Kreder 2805, Esperanza (3085), tel 0054342154187496

RESUMEN

Una de las principales limitantes en regiones de secano y riego complementario para el desarrollo de cultivos es la disponibilidad de agua en el suelo. Por lo tanto, el conocimiento del contenido volumétrico de agua en el perfil es de vital importancia para comprender el comportamiento de un cultivo frente a variaciones del mismo. Dentro de los métodos de medición de agua en el suelo, la sonda de capacitancia FDR (*Frequency Domain Reflectometry*) es un instrumental de medición indirecta que permite obtener gran cantidad de registros precisos y de manera inmediata. Su calibración es primordial para asegurar obtener datos certeros. De esta manera, el objetivo de este trabajo fue calibrar una sonda de capacitancia para Molisoles e Inceptisoles de Argentina. Para ello se instalaron tubos de PVC de longitud variable en cuatro sitios, mediante una técnica desarrollada por el grupo de trabajo. Se tomaron muestras de suelo cada 10 cm para estimar el contenido hídrico a partir del método gravimétrico y con muestras imperturbadas se obtuvieron densidades. Para la calibración se obtuvieron ecuaciones específicas de cada suelo que fueron comparadas con ecuaciones obtenidas por otros autores y con la que entrega el fabricante por default. Posteriormente fueron aplicadas con cultivos a campo, en condiciones de riego complementario y en secano. Las ecuaciones propias tuvieron menor error (RCEM) que las desarrolladas para otras condiciones de suelo y se logró aplicarlas mediante un balance hídrico simplificado para diferentes cultivos.

Palabras clave: Molisoles; Inceptisoles; riego

¹ Trabajo seleccionado para presentación oral en el XXIII CONGRESO ARGENTINO DE LA CIENCIA DEL SUELO, Mar del Plata, abril de 2012.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento del agua en el suelo es fundamental tanto en las regiones de secano, donde los cultivos dependen de la capacidad de almacenamiento del suelo; como en regiones sub-húmedas con riego complementario, donde es muy importante definir el momento oportuno de riego para el manejo racional del agua, siendo el contenido hídrico el método más utilizado universalmente para esta decisión (Ferrer et al., 2008).

Para superar las limitantes que presenta el método de medición de agua en suelo gravimétrico, se desarrolló instrumental para medir indirectamente el contenido hídrico, con diferentes principios de funcionamiento, siendo los principales: sondas de neutrones, sondas *Frequency Domain Reflectometry* (FDR) y sondas *Time Domain Reflectometry* (TDR).

La sonda de capacitancia (FDR) se basa en la respuesta a cambios en la constante dieléctrica del medio (ϵ), usando una técnica de reflectometría de dominio de frecuencias a través de capacitores y osciladores de frecuencia variable (Ferré y Topp, 2002) Su principal ventaja es la sencillez de su operación, muy bajo mantenimiento y facilidad en la manipulación de datos. Pero también tiene desventajas, siendo la principal la necesidad de realizar calibraciones para su correcto funcionamiento, las cuales requieren tiempo, debido al elevado número de repeticiones que son necesarias con el fin de obtener un amplio rango de humedades (Ferre y Topp, 2002). Dichas calibraciones son necesarias principalmente en suelos arcillosos y/o con elevada materia orgánica.

Debido a que no existen trabajos específicos de calibración de sondas FDR en Argentina, el objetivo de este trabajo fue obtener ecuaciones de calibración en Molisoles e Inceptisoles para su posterior aplicación a condiciones reales con diversos cultivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron cuatro sitios para realizar las calibraciones de la sonda:

- Esperanza (ES), Lat. $31^{\circ} 21' S$; Long $61^{\circ} 08' W$ No coinciden las coordenadas con la zona aledaña a Esperanza
- Humboldt (HU), (Lat. $31^{\circ} 23' S$; Long $61^{\circ} 04' W$
- San Fabián (SF), (Lat. $32^{\circ} 08' S$; Long $60^{\circ} 58' W$
- Salta (SA), Lat $24^{\circ} 53' S$; Long $65^{\circ} 28' W$

Las calibraciones se realizaron sobre Molisoles e Inceptisoles (Tabla 1), donde ES y HU corresponden a la misma serie Humboldt (Argiudol ácuico); mientras SF corresponde a un Argiudol típico serie Maciel y SA a un Ustocrepte ácuico, serie Cerrillos. En las dos primeras series la profundidad analizada fue hasta 120 cm, en SF hasta 40 cm (horizonte A) y en SA hasta 80 cm.

Tabla 1: Información analítica correspondiente a un Argiudol ácuico, serie Humboldt (ES y HU).

	Argiudol ácuico, serie Humboldt (ES y HU).							
	Ap	A ₁₂	A/B	B _{21t}	B _{22t}	B _{23t}	B ₃	C
Profundidad (cm)	12	24	38	76	96	118	153	+
% Arcilla	29	29	34	59	54	47	42	29
δa (kg m ⁻³)	1310	1350	1400	1400	1350	1350		
	Argiudol típico serie Maciel (SF)							
	A ₁	B ₁	B _{21t}	B _{22t}	B _{23t}	B ₃	C ₁	
Profundidad (cm)	25	37	51	85	112	147	240	
% Arcilla	21,5	29,0	48,5	49,0	40,5	33,0	31,5	
δa (kg m ⁻³)	1280	1360	1400	1410	1390			
	Ustocrepte ácuico, serie Cerrillos (SA)							
Profundidad (cm)	7	29	45	69				
Textura	F	F	FL	aL				
δa (kg m ⁻³)	1430	1430	1410	1250				

Para la instalación de los tubos de acceso se utilizó una técnica particular desarrollada por el grupo de investigación de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Litoral. En cada sitio donde se ubicarían los tubos se realizó una perforación manual hasta 2 m con un barreno de diámetro exterior igual al diámetro nominal del tubo (4,8 cm). La ejecución de la perforación conlleva que el pozo terminado tenga un diámetro 4 mm mayor que el tubo, de modo tal que éste ingresa libremente. Para completar el espacio entre la pared de la perforación y el tubo se preparó una mezcla de suelo y agua, tamizando material franco-limoso en un tamiz de abertura < 2 mm, con una consistencia de la mezcla tal que el tubo pueda introducirse sin impedimentos (Figura 1). Dado que en su extremo inferior lleva un tapón, el aire interior del tubo lo induce a flotar, razón por la cual debe colocarse un contrapeso. Cabe destacarse que los tubos son de PVC, con diámetro y espesor especiales provistos por la empresa Sentek Australia.



(A)



(B)

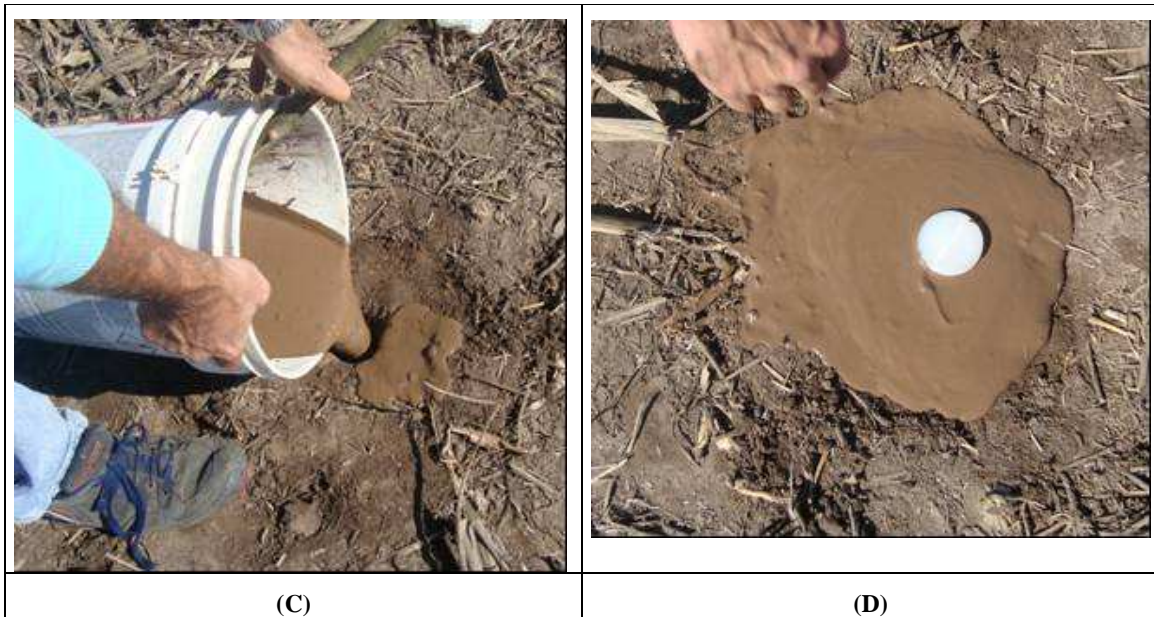


Figura 1: Pasos para la instalación de una sonda de capacitancia en suelos de textura franco-limososa. A perforación con barreno; B interior de la perforación; C agregado fluido y D tubo instalado.

En ES la calibración se realizó en el período 2004-2005, en ensayos con una secuencia de cultivos trigo/soja^{2°}; en HU durante el ciclo 2006-2007 en un cultivo de alfalfa de primer año; en SF en el período 2008-2009, en una secuencia trigo/soja^{2°} bajo riego con pivote central y en SA durante el ciclo 2009-2010 en un cultivo de tabaco.

La sonda FDR utilizada es fabricada por Sentek Australia, modelo Diviner, descrita en Camussi y Marano (2009). Para su calibración, los datos a obtener deben estar en modo de frecuencia normalizada (FN), siendo necesaria una pre-calibración al agua y al aire.

FN se determina de la siguiente manera:

$$FN = \frac{FN_a - FN_s}{FN_a - FN_w} \quad [1]$$

Siendo:

FN_a = Lectura de frecuencia del sensor en el aire

FN_s = Lectura de frecuencia del sensor en el suelo

FN_w = Lectura de frecuencia del sensor en el agua

El contenido de agua volumétrico en el suelo (θ) es una función potencial de FN:

$$\theta = a * FN^b \quad [2]$$

Donde a y b son coeficientes que varían según la calibración. La ecuación por default es utilizable para distintos tipos de suelo, pero no es aplicable en los casos de arenas gruesas, arcillas expansibles, suelos con contenidos de materia orgánica altos y suelos salinos (Starr y Paltineanu, 2002).

En cada tubo de los sitios con Molisoles se obtuvieron muestras perturbadas cada 10 cm en tres momentos: un período húmedo, uno normal y otro seco. Para determinar densidad de suelo se extrajeron muestras no perturbadas (método del cilindro) también cada 10 cm. En el suelo Inceptisol, debido a que las condiciones climáticas no garantizan altos contenidos hídricos en el perfil de suelo, se adicionó agua en cantidad suficiente para saturar hasta 1 m de profundidad, construyendo un bordo alto alrededor de la parcela donde estaba ubicado el tubo. En el momento que se infiltró toda la lámina de agua se cubrió la superficie con abundante paja de cebada para evitar la evaporación directa del suelo. Inmediatamente de colocada la cobertura se tomaron lecturas de FN y muestras de suelo con pala barreno alrededor del tubo sobre su eje norte-sur a intervalos de 0,10 m. Esta misma parcela se dejó drenar por cinco días con la cobertura de cebada en superficie y al cabo de este plazo se realizaron lecturas de FN junto con muestreo de suelo con pala barreno sobre el eje este-oeste, a intervalos de 0,10 m. Finalmente la condición de suelo seco para este sitio se supuso lograda al final del periodo de barbecho.

A cada lectura con sonda FDR le correspondió un valor de contenido hídrico, logrando así un conjunto de datos de FN y de θ para diferentes estados hidrológicos del suelo. Considerando que la ecuación 2 es no lineal, el ajuste de los parámetros se realizó a través del procedimiento respectivo del programa Infostat (versión 2008), que permite obtener los estimadores por mínimos cuadrados. El set de datos se analizó para todo el perfil y para todos los sitios y también separando por horizontes (A, B y C).

A partir de los datos de FN se obtuvieron nuevos valores de θ , utilizando otras ecuaciones de calibración: default (brindada por el fabricante) y la de Gueesing et al. (2004); que fueron comparados con la ecuación propia, utilizando como estimador la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RCEM).

Para la aplicación se realizaron sendos balances hídricos simplificados de acuerdo a la ecuación 3 (Marano et al., 2009)

$$\Delta H = ETr + LRn + Per - Pe \quad (3)$$

siendo ΔH (mm) la variación del contenido de agua en el suelo entre el inicio y el final del intervalo (entre 7 y 21 días); Pe (mm) la precipitación efectiva, considerada como 0,8 de la precipitación total, cuando ésta fue mayor a 20 mm; Per (mm): percolación profunda, estimada a través del análisis del perfil hídrico y LRn (mm) corresponde a la lámina de riego neta. No se consideró aporte de flujo subsuperficial entrante ni saliente.

Los cultivos empleados fueron trigo irrigado (región central de Santa Fe) y tabaco irrigado (Cerrillos, Salta)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los parámetros a y b de la ecuación 2 para el perfil completo fueron aceptados, al tiempo que las ecuaciones obtenidas para Molisoles e Inceptisoles fueron similares (Tabla 2), teniendo ambas menor RCEM que la ecuación por default y la obtenida por Guessing et al. (2004) Figura Gueesing en la bibliografía. Esto significa que se logró una mayor aproximación a los datos reales obtenidos a campo, otorgándole alto grado de confianza a tales ecuaciones. La similitud de las ecuaciones para suelos tan diferentes podría deberse a la clase textural de ambos, de características franca y franco-limosa (Tabla 1).

Debido a que este tipo de sonda es muy utilizada en Brasil, diferentes autores propusieron ecuaciones de calibración. Se destaca la propuesta por Andrade et al. (2007), quienes determinaron valores de los coeficientes a y b para el perfil completo de 1 m de un suelo Lattosolo Amarelo (textura arenoso-franca), de 0,397 y 2,533. Nuevamente se destaca la similitud con los resultados obtenidos en este trabajo, donde no se encuentran denominadores comunes en la textura de suelo.

También se obtuvieron ecuaciones particulares para diferentes espesores, cada una con menor RCEM que cuando se utilizó la ecuación general (Tabla 3). En ambos suelos las ecuaciones de los horizontes superficiales tuvieron un RCEM superior a las obtenidas para los demás horizontes (Tabla 3). Esto es debido a la presencia de materia orgánica, la cual influye en la lectura del instrumental disminuyendo su precisión (Ferré y Topp, 2002). Las ecuaciones obtenidas para horizontes más profundos -debajo de 40 cm en Molisoles o de 30 cm en Inceptisol- tuvieron similares RCEM, por lo que puede inferirse que la presencia de mayor contenido de arcilla en ellos no afecta la sensibilidad del instrumento. En todos los casos, comparando RCEM de un mismo horizonte para las dos ecuaciones –es decir, utilizando los parámetros para el horizonte particular vs la utilización de los parámetros de la ecuación general- se obtuvo el menor valor usando la ecuación propia de cada horizonte (Tabla 3). Con lo cual, la calibración por horizontes tiene mayor exactitud que si utilizáramos la ecuación de calibración general.

En cuanto al método de instalación de tubos de acceso utilizado, se debe considerar que la utilización de material tamizado especialmente para rellenar el espacio de aire entre el tubo y el suelo, permitió obtener datos de confianza. Es de fundamental importancia para la obtención de datos certeros, lograr un íntimo contacto entre el tubo, el material de relleno y el suelo.

Tabla 2: Parámetros a y b del modelo $a*FN^b$ para, número de muestras (N) y raíz cuadrada del error medio (RCEM) para el perfil completo de los suelos analizados.

Referencia	a	b	N	RCEM
Molisoles				
Ecuación general propia	0,3970*	2,2130*	137	0,04321
Ecuación general default	0,4940	3,0175	137	0,07709
Ecuación general de Guessing et al. (2004)	0,5183	2,1367	137	0,10736
Inceptisol				
Ecuación General Propia	0,3907*	2,1121*	112	0,0214
Ecuación General default	0,4940	3,0175	112	0,07456

*: Términos que realizan una contribución significativa al modelo ($P < 0,0001$)

Las Figuras 2 y 3 representan las curvas de calibración de θ y FN correspondientes a Molisoles e Inceptisoles respectivamente. Puede observarse que en la región húmeda los contenidos hídricos alcanzan valores próximos a $0,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y FN igual a 1, condición que se presentó en 2007, en coincidencia con un evento climático El Niño que tuvo extensión regional. En cambio en la región sub-húmeda de Salta, el máximo valor de θ correspondió apenas por encima de capacidad de campo con FN de 0,92. En el extremo opuesto, los mínimos valores de θ en ambos casos fueron similares ($0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), con FN en torno a 0,4. Los datos presentados cubren una amplia variación de contenidos hídricos, resultando así valiosa la información resultante.

Tabla 3: Parámetros a y b del modelo $a \cdot \text{FN}^b$, número de muestras (N) y raíz cuadrada del error medio (RCEM) para diferentes espesores de los suelos analizados.

Referencia	a	b	N	RCEM
Molisoles				
Horizonte Superficial				
Ecuación para horizonte superficial (0-40 cm)	0,4310*	2,7390*	61	0,05002
Resultados utilizando en el espesor 0-40 cm la ecuación general propia	0,3970*	2,2130*	61	0,05265
Horizonte Subsuperficial				
Ecuación para espesor (40-90 cm)	0,431*	2,146*	30	0,03070
Resultados utilizando en el espesor 40-90 cm la ecuación general propia	0,3970*	2,2130*	30	0,04460
Horizonte Profundo				
Ecuación para espesor (90-120 cm)	0,4052*	2,6971*	18	0,03003
Resultados utilizando en el espesor 90-120 cm la ecuación general propia	0,3970*	2,2130*	18	0,03109
Inceptisol				
Ecuación para espesor 0-30 cm	0,3177*	1,8976*	42	0,0428
Ecuación para espesor 30-50 cm	0,3917*	3,2249*	56	0,0287
Ecuación para espesor 50-80 cm	0,2878*	2,4273*	14	0,0316

*: Términos que realizan una contribución significativa al modelo ($P < 0,0001$)

En cuanto a la aplicación de estas ecuaciones, la Figura 3 representa la variación de θ en función de la profundidad para diferentes etapas durante el ciclo 2009-10 de tabaco. El inicio de las mediciones coincide con el perfil de suelo uniforme y próximo a capacidad de campo, dado que para el transplante se aplican riegos de asiento. Las fechas posteriores indican agotamiento de θ en los horizontes superficiales (0-40 cm, Figura 4) que se corresponde con la profundidad enraizable del tabaco. El 4/1 coincide con la época de lluvias, donde puede observarse infiltración y redistribución en todo el perfil, con posterior agotamiento de θ en momento de máxima demanda hídrica.

También fueron validadas las ecuaciones para Molisoles en cultivo de trigo en seco (ciclo 2008, Figura 5). En ésta se representaron los contenidos hídricos correspondientes al agua fácilmente utilizable (θ umbral) y se distingue en el perfil el horizonte Bt (40-80 cm), cuya capacidad de retención de agua es mayor. El inicio de las mediciones corresponde con la siembra del trigo, momento en que el perfil se encuentra recargado por las precipitaciones de otoño. En pleno macollaje el cultivo extrae considerable cantidad de agua en todo el perfil,

aún por debajo del contenido considerado umbral para los horizontes profundos, excepto Bt, donde la capacidad de extracción es limitada por el potencial matricial del suelo. En floración el agotamiento fue máximo (en este año las precipitaciones fueron menores a las normales) y por debajo de los contenidos hídricos umbrales, a excepción del horizonte Bt. Las mediciones realizadas con esta sonda tienen como utilidad adicional caracterizar los límites de máxima retención de agua (capacidad de campo) y marchitez permanente para diferentes condiciones hidrológicas y de cultivo (Figura 4).

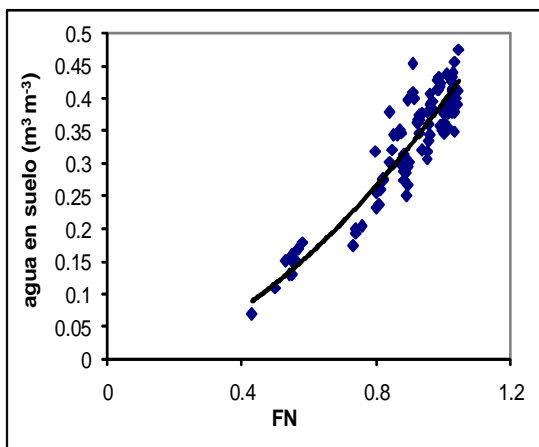


Figura 2: Curva de ajuste de contenidos hídricos (θ) y frecuencias normalizadas (FN) utilizados para la calibración de un perfil completo de Molisoles del centro de Santa Fe.

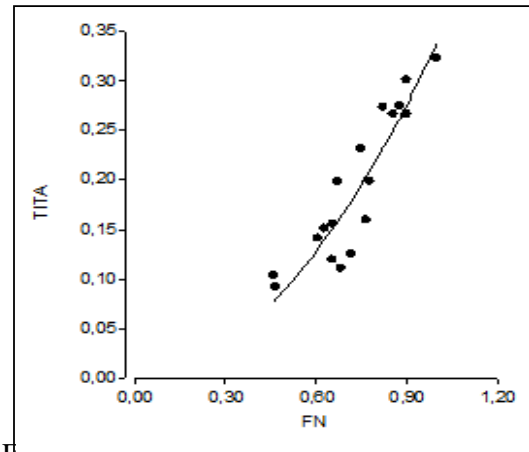


Figura 3: Curva de ajuste de contenidos hídricos (θ) y frecuencias normalizadas (FN) utilizados para la calibración de un Inceptisol. TITA???

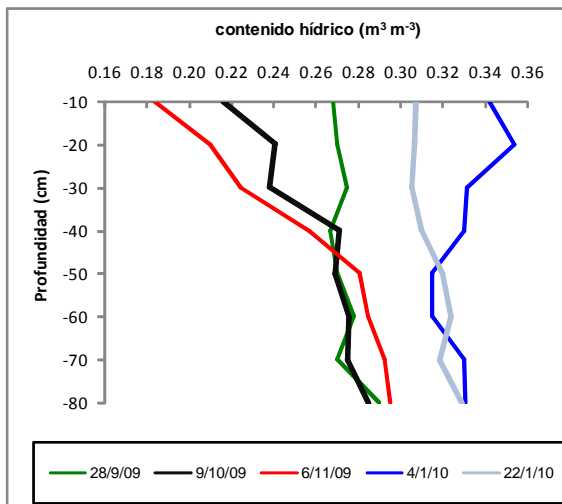


Figura 4. Evolución de contenidos hídricos ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) en función de la profundidad, obtenidos con ecuación de calibración propia (Inceptisol) en diferentes etapas de un cultivo de tabaco

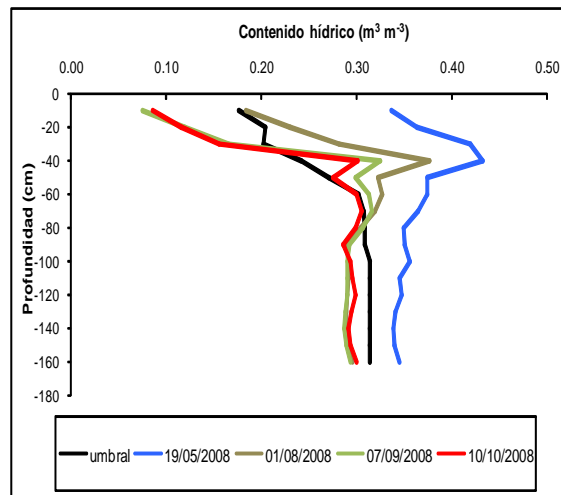


Figura 5. Evolución de contenidos hídricos ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) en función de la profundidad, obtenidos con ecuación de calibración propia (Molisoles) en diferentes etapas de un cultivo de trigo en seco.

CONCLUSIONES

Se logró calibrar una sonda FDR en Molisoles e Inceptisoles de Argentina con ecuaciones de ajuste de menor RCEM en relación a la presentada por los fabricantes (default), lo que permitió mayor exactitud de las lecturas con la sonda.

Este instrumental permitió obtener rápidamente datos muy precisos, significando una gran ventaja en cuanto a tiempos y operatividad. Por otra parte, el método de instalación de los tubos de acceso, si bien es tedioso en cuanto a que no está mecanizado, fue satisfactorio debido a que se logró –mediante la utilización de partículas < 2 mm- un íntimo contacto, aspecto fundamental para la obtención de lecturas certeras por el instrumental.

Se logró representar adecuadamente la evolución de contenidos hídricos en regiones con diferentes regímenes climáticos, de manejo contrastante (riego y seco) y cultivos muy diversos.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDRADE, A. J.; Silva. C. R.; Rossini, D. Calibração de um sensor capacitivo de umidade em Latossolo Amarelo na microrregião do litoral Piauiense. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, Recife, v.2, n.4, p.303-307, 2007.
- CAMUSSI, G. y MARANO, R.P. 2009. Calibración de una sonda de capacitancia para determinación de contenido hídrico en Argiudoles del centro de Santa Fe. Avances de la Ingeniería Rural 2007-09, Di Leo N., Montico S. y Nardón G. editores ISBN 978-950-673-752-8; Vol I 353:358 Rosario - Santa Fe – Argentina.

- FERRÉ, P.A; TOPP, G.C. 2002. "Time domain reflectometry". In: Dana, J.H. & Topp, G. C. (Eds), Methods of soil Analysis, Part 4-Physical Methods, p. 434-446. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.
- FERRER, P.J.; ADAM, V.; BONET, L.; VERA, J.; SENCHERMÉS, J.4; SANZ, E. 2008. "El uso de sondas capacitivas multisensor en sociedades de riego y el ahorro de agua en la Comunidad Valenciana". XXVI Congreso Nacional de Riegos: Huesca, 2008, p. 51-52.
- GUEESING, D; BACHMAIER, M; SCHMIDHALTER, U. 2004. "Field calibration of a capacitance soil water probe in heterogeneous fields". Australian Journal of Soil Research, 42, p. 289-299. Cual es el nombre correcto? Guessing figura en el texto
- STARR, J.L; PALTINEANU, I.C. 2002. "Capacitance Devices". In: Dane, J.H. y G.C. Topp, G.C. (Eds.): Methods of Soil Analysis. Part 4- Physical Methods. p. 463-474. American Agronomy Society, Madison, WI, USA.