

DISEÑO Y CALIBRACIÓN AIRE-AGUA DE UN CONECTOR DE GUÍAS DE TDR PARA MEDIDA DE LA PERMITIVIDAD DIELECTRICA EN SUELOS PEDREGOSOS

F.J. Souto Jorge, J. Dafonte Dafonte, M. Escariz Viña

Departamento de Enxeñaría Agroforestal, Escola Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela, Campus Universitario 27002 Lugo, fsouto@usc.es, jdafonte@usc.es, mescariz@usc.es.

RESUMEN. Para la estimación del contenido de agua en el suelo, uno de los métodos más extendidos es la utilización del TDR (Time Domain Reflectometry), que estima el contenido en agua mediante la medida de la permitividad dieléctrica relativa aparente del suelo (ϵ_{ra}), que está directamente relacionada con el agua del suelo. En el caso de guías de TDR instaladas en suelos pedregosos, es difícil la conexión entre la cabeza de la sonda del modelo de TDR TRASE de Soilmoisture Equipment y las guías, debido a la falta de paralelismo entre las guías por la existencia de gran cantidad de fragmentos de roca en el perfil del suelo; lo cual provoca que haya zonas de la guía en contacto con el aire y zonas comprimidas en torno a las guías, en el momento de la medida, provocando errores en la estimación de ϵ_{ra} .

Debido a este motivo se diseñó un nuevo tipo de conector flexible, que minimizaba los problemas existentes. Se calibró el factor de corrección del tiempo de viaje de la señal (t_0) que tiene en cuenta el viaje de la señal en el conector flexible de las guías y la longitud eléctrica de las guías (L_e) y se desarrolló un programa para analizar la onda obtenida con el TDR Trase.

Los resultados obtenidos en la calibración se consideran buenos, y también se observó que la sensibilidad de los valores del contenido de agua en el suelo, son poco sensibles a la estimación del parámetro t_0 .

ABSTRACT. Time domain reflectometry (TDR) is one of the most widely used methods for measuring soil water content. TDR estimates water content by measuring the apparent relative dielectric permittivity of the soil ϵ_{ra} , which is directly related to soil water. For TDR waveguides installed in stony soils, the connection between the Trase TDR probe head (Soilmoisture Equipment) and the waveguides is difficult because of the lack of parallelism between the waveguides. This lack of parallelism is caused by the occurrence of a large amount of rock fragments in the soil profile, which produces air gaps and compression zones around the waveguides during the measurement, that cause errors in the estimation of ϵ_{ra} .

For this reason, a new type of flexible connector that minimises the existing problems has been designed. The signal travel time correction factor t_0 , accounting for signal travel in the designed flexible waveguide connector, and the electrical length of the waveguide L_e have been calibrated.

In addition, software for analyzing the waveform obtained with TDR Trase has been developed.

Calibration results are considered to be good and the sensitivity of soil water content values to the estimation of t_0 is low.

1.- Introducción

El contenido de agua en el suelo es un parámetro esencial para el estudio de los procesos hidrológicos. Dentro de los métodos de estimación del contenido en agua en el suelo, el TDR (Time Domain Reflectometry) se presenta como un método de medición electromagnético (EM) indirecto, no destructivo, que permite la medición en tiempo real, así como la automatización de las lecturas en varias sondas simultáneamente mediante un multiplexor. En los pasados 30 años, el TDR se ha usado para la medida del contenido en humedad en muchas escalas y bajo un amplio rango de condiciones (Topp y Reynolds, 1998; Woodhead et al., 2003) El principio de funcionamiento del TDR para estimar el contenido de agua en un suelo está basado en la diferente permitividad dieléctrica relativa del agua (80 a 20°C), un valor muy superior a la de los materiales del suelo: 2 a 5 para suelos orgánicos, 3 a 7 para compuestos minerales, 1 para el aire (Topp y Ferré, 2002); el valor de la permitividad dieléctrica puede estimarse a partir de una medida del tiempo de viaje una señal EM, que se propaga a lo largo de una línea de transmisión dentro de un medio (Jones et al., 2005).

La frecuencia de medida efectiva para el TDR es aproximadamente 1 GHz (Or y Wraith, 1999), en estas frecuencias la parte real de la permitividad dieléctrica relativa (ϵ_r'), está más afectada por el contenido en agua que la parte imaginaria de la permitividad dieléctrica relativa (ϵ_r''). Además ϵ_r' es casi independiente en las frecuencias utilizadas por el TDR (Topp y Ferré, 2002). La mayoría de los equipos de TDR lanza un pulso de voltaje de ascenso rápido (tiempo de ascenso < 200 ps) a lo largo de una línea de transmisión en el suelo, y el pulso electromagnético viaja una distancia hasta el final de la guía y regresa, esto permite la determinación de la permitividad dieléctrica relativa aparente (ϵ_{ra}) a partir del tiempo del viaje de ida y conocida la longitud eléctrica de la sonda.

$$\epsilon_{ra} = \left(\frac{ct_s}{L_e} \right)^2 \quad (1)$$

donde: c es la velocidad de la luz en el vacío; t_s es el tiempo de viaje (tiempo de viaje de ida); y L_e es la longitud eléctrica de la sonda.

$$\epsilon_{ra} = \frac{\mu\epsilon_r'}{2} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \left[\frac{\epsilon_r'' + (\sigma_0 / \omega\epsilon_0)}{\epsilon_r'} \right]^2} \right\} \quad (2)$$

donde: μ es la permeabilidad magnética del medio relativa al vacío, la mayoría de suelos no son magnéticos, así que μ es igual a uno; σ_0 es conductividad eléctrica directa en $S\ m^{-1}$; ω es la frecuencia angular en $rad\ s^{-1}$; y ϵ_0 es la permitividad del vacío en F/m .

Las mayoría de las aplicaciones del TDR hasta la fecha asumen que $\left[\frac{\epsilon_r'' + (\sigma_0 / \omega\epsilon_0)}{\epsilon_r'} \right] \ll 1$, dado que $\epsilon_{ra} \approx \epsilon_r'$. Esta

asunción permite la determinación del contenido en agua sin previo conocimiento de la conductividad eléctrica para suelos no salinos que tengan un contenido en arcilla inferior al 50% (Ferré y Topp 2002).

La alta permitividad dieléctrica del agua, con respecto a los valores del aire y del suelo seco, produce que el valor ϵ_{ra} tenga una gran dependencia del contenido de agua. Relaciones empíricas entre ϵ_{ra} y el contenido volumétrico de agua se han determinado para un amplio rango de suelos (Topp et al., 1980; Ledieu et al., 1986; Topp y Reynolds, 1998), cuando el suelo tiene una textura gruesa o media, la relación empírica de Topp et al. (1980) es normalmente empleada para estimar el contenido de agua partir de las medidas de permitividad (Woodhead et al., 2003).

La inserción de las guías de TDR en un suelo pedregoso es muy difícil, siendo muy complicado mantener el paralelismo entre las mismas según Spittlehouse (2000), este trabajo señala, que la divergencia de las guías provoca problemas en la correcta identificación del final de la guía en la onda y la convergencia de las guías reduce el volumen de suelo muestreado

Los objetivos de este trabajo son el diseño de un conector flexible de guías que permita la fácil conexión a las guías instaladas en campo en un suelo pedregoso a un TDR cuando estas no están totalmente paralelas, la calibración de los valores del factor de corrección del tiempo de viaje de la señal (t_0) que tiene en cuenta el viaje de la señal en el conector flexible de las guías y la longitud eléctrica de las guías (L_e); y el desarrollo de un programa para analizar la onda obtenida con el TDR Trase de Soilmoisture Equipment.

2. Diseño de la sonda

2.1. Tipo de sondas de TDR

Desde el comienzo de la aplicación del TDR en ciencia del suelo, han sido muchos los modelos de sondas creados para la medición del contenido de agua del suelo. En las primeras mediciones realizadas por Topp et al. (1980) se utilizaron sondas que guardaban la misma conformación que los cables coaxiales (una guía en el interior de un cilindro metálico). Las principales diferencias entre cada modelo están en el número de guías, su disposición, diámetro, separación entre las mismas, longitud y forma. La separación y el diámetro de las guías han de guardar una relación que viene fijada por el campo eléctrico y la zona de influencia de la sonda (Knight, 1992). Aunque existe más de una docena de tipos de sondas, los dos tipos más habituales son:

- (1) Sondas de dos guías. Este tipo de sondas consiste normalmente en dos varillas de acero inoxidable paralelas instaladas en el suelo. Son las más instaladas en el campo debido a su facilidad de instalación. Dentro de este tipo de sondas existen otras variantes como sondas tipo tubo desarrolladas por TRIME System (Imko), que permiten realizar una medida a partir de un tubo de acceso en material plástico, y obtener un perfil de humedad del suelo (Sánchez-Pérez et al., 1999); sondas con diodo de corte (Hook et al., 1992; Hook y Livingston, 1995; Robinson et al., 2003a). Las sondas de dos guías para ser balanceadas (los dos conductores transportan polaridades opuestas e iguales, p.e.: +1V y -1V, con respecto a la tierra) precisan la utilización de un transformador de impedancia (balun). Si no tuvieran este dispositivo, una de las guías tendría una tensión positiva (p.e.: +1V) y la otra guía sería la tierra (0 V) (Robinson et al., 2003a). Inicialmente se recomendaba la utilización de un transformador de impedancia en las sondas de dos guías para conseguir tener un voltaje balanceado (Topp et al., 1982a, 1982b). No obstante, trabajos posteriores sugirieron que las sondas no balanceadas podrían utilizarse con poca o ninguna pérdida de precisión (Zegelin et al., 1989; Ledieu et al., 1986; Malicki y Skierucha, 1989; Malicki et al., 1992; Rajkai y Ryde'n, 1992; Kelly et al., 1995). Según Martínez y Ceballos (2001), la conexión directa al TDR de un sensor de dos guías sin un transformador de impedancia ofrece una señal más nítida y sencilla de interpretar. Otra de las características interesantes de las sondas no balanceadas es que permiten la medida de la conductividad eléctrica aparente a partir de la señal recogida por el TDR (Robinson et al., 2003a), aunque según otros autores como Ferré et al., (1998) la utilización de un transformador de impedancia no afecta a la medida de conductividad eléctrica.
- (2) Sondas de tres guías. Tienen diámetros inferiores a las de dos guías y menor separación entre las mismas. Exploran un menor volumen de suelo que las anteriores aunque tienen mayor energía concentrada en torno a la

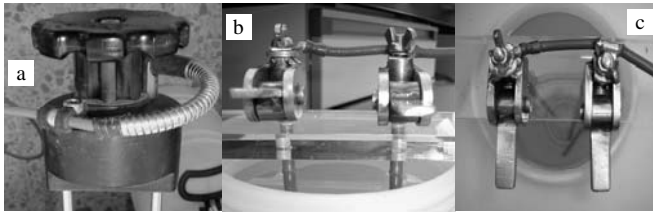


Fig. 1. Conector de guías suministrado con el Trase TDR (a); Nuevo diseño de conector de guías flexible (b y c)

varilla central. Su instalación en campo es más compleja. Las sondas de tres guías no necesitan un transformador de impedancias debido a que simulan una célula coaxial. Este tipo de sondas se pueden conectar a equipos como el Trase TDR (Soilmoisture Equipment Corp.), TDR 100 (Campbell Scientific Inc.) y Tektronix 1502 (Tektronix Inc), los cuales también trabajan con sondas de dos guías.

2.2. Justificación y características del conector de guías flexible diseñado

La necesidad de diseñar este modelo de conector viene dada por el problema de utilización del conector de guías suministrado por el sistema de TDR Trase 6050X1 de Soilmoisture (Soilmoisture Equipment Corp., 1996) para conectar a las guías instaladas en el campo (Fig. 1a). En suelos con gran cantidad de elementos gruesos, se produce fácilmente durante la inserción de las guías en el campo, una falta de paralelismo entre las dos guías, aumentando o disminuyendo la separación de las mismas en la superficie (Fig. 2a), lo que provoca una difícil conexión de las mismas al conector original de Trase (Fig. 2b). Debido a estas razones, se diseñó un conector flexible que permitiese la fácil conexión, aunque existan desviaciones en la zona de acople de las guías. El conector debe permitir el giro en el plano formado por las guías y en otro perpendicular. Una vez realizado el acople, las guías deben permanecer en íntimo contacto con el conector a fin de permitir una lectura nítida. Para ello una pequeña palanca soldada a un cilindro excéntrico empuja un émbolo que fija la guía a las paredes del conector propiamente dicho cuando es empujada hacia abajo. La retirada del conector se realiza situando la palanca en posición vertical y tirando de ella. La dirección en la que se realiza la presión sobre el conector coincide con la de inserción de la guía. Por lo tanto no provoca su desplazamiento, garantizando la permanencia de la guía en la posición inicial, lo que evita que parte de las guías queden expuestas al aire, y la aparición de zonas comprimidas de suelo durante el proceso de conexión (Fig. 2c). Otro problema que se evita con este tipo de conector flexible es una incorrecta lectura por una introducción incompleta de la guía dentro de la cabeza, permaneciendo una parte de las guías en contacto con el aire, y por lo tanto subestimando el valor de ϵ_{ra} . Otras ventajas del cabezal de guías diseñado son: reducción del tiempo de conexión de

las guías a la cabeza de la sonda, reduciendo el tiempo de lectura, y la obtención de una señal nítida y de fácil interpretación (Fig. 3), facilitando el análisis gráfico de la onda.

La conexión del TDR y el conector se realiza usando un cable coaxial RG-58. Se ha decidido no introducir en este diseño el modulador de impedancias para reducir costes, porque según lo comentado en el punto 2.1, éste no produce un incremento importante en la precisión. En las Figs. 1b y 1c se muestra el nuevo conector.

3.- Calibración de los parámetros t_0 y L_e de la sonda TDR en agua y aire.

La calibración de la sonda en aire y agua destilada (Heimovaara, 1993; Robinson et al., 2003b) es un método simple y práctico para la estimación de los parámetros t_0 y L_e

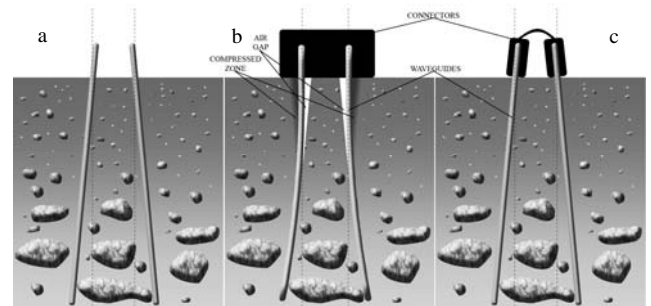


Fig. 2.- Desviaciones producidas por las presencia de piedras en la trayectoria de las guías. (a) Guías no paralelas debido a la existencia de piedras; (b) Guías no paralelas con el conector de guías de TRASE; (c) Guías no paralelas con el conector de guías flexible.

Este método requiere la estimación del tiempo total (t_p), que se define como el tiempo total de viaje de la señal y es la suma un factor de corrección del tiempo de viaje (t_0), que tiene en cuenta el tiempo de viaje de la señal en el cabezal de la sonda y el tiempo de viaje en el medio que rodea a la sonda (t_s). Para el cálculo del tiempo de viaje total, el primer paso es la identificación del t_{start} , que se produce en la base de la primera reflexión de la señal (Fig. 3) debido a la diferente impedancia entre el cable y la cabeza de la sonda. Este punto es una buena referencia para localizar la entrada de la señal en el conector debido a que no se mueve significativamente, como otros puntos de referencia utilizados como el el máximo inicial en la onda (Robinson et al., 2003b). Para la identificación de este tiempo se usa tangente a lo largo de la rama ascendente del pulso reflejado en el conector, que se extrapola hacia atrás hasta la intersección con la línea horizontal que pasa por el mínimo de la onda antes del ramal ascendente de la reflexión. Posteriormente se localiza el segundo punto de reflexión que se produce al final de la guía (t_{end}) igual que en el primer punto de reflexión (Fig. 3), obteniéndose el valor de t_p :

$$t_p = t_{end} - t_{start} \quad (3)$$

$$t_{p(i,j)} = t_0 + \left(L_{e(i,j)} \sqrt{\epsilon_{ra(i)}(T)} \right) / c \quad (4)$$

3.1. Metodología de calibración

Se realizaron dos repeticiones con tres longitudes de guías (15, 30 y 45 cm) a distintas temperaturas (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 °C) en aire y en agua destilada. El proceso consistió en introducir la cabeza de la sonda flexible con las guías en una cámara con temperatura controlada. Tanto las medidas en agua como las medidas en aire se monitorizaron con cuatro sensores de temperatura. Se distribuyeron los sensores en el depósito de agua destilada uniformemente para las lecturas en este medio. Debido a la limitación volumétrica de la cámara la longitud máxima calibrada con este método fue de 45 cm. También se registraron las ondas en agua y en aire a temperatura constante de 24°C con varillas de 15, 30, 45 y 60 cm, usando 10 pares de guías diferentes para cada longitud y dos repeticiones para cada par de guías.

A partir de las ondas obtenidas en cada uno de los medios (aire y agua) fueron calculados el tiempo de la señal (t_{start}) en el inicio del conector y otro donde la señal se refleja en el extremo de la guía (t_{end}), el tiempo de tránsito comprendido entre los dos puntos (t_p) es función de ϵ_{ra} del aire y del agua, que son conocidas y de los parámetros t_0 y longitud eléctrica de las guías.

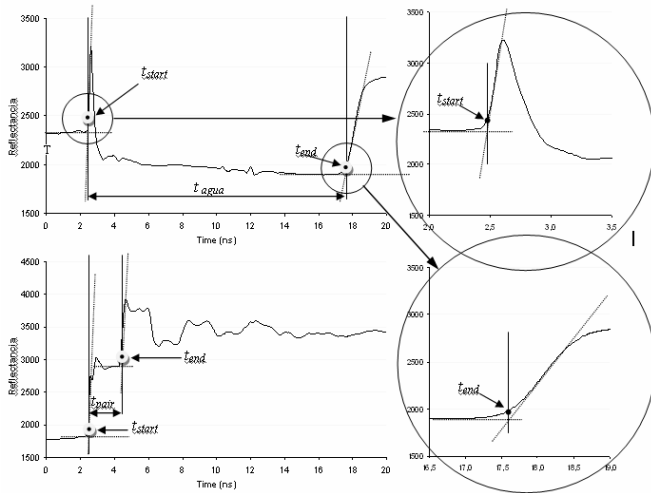


Fig. 3. Onda registrada en agua y aire con el conector flexible y una guía de 60 cm

Los valores de los parámetros t_0 , longitud eléctrica de las guías de 15 cm de longitud ($L_{e 15}$), las guías de 30 cm de longitud ($L_{e 30}$), las guías de 45 cm de longitud ($L_{e 45}$) y las guías de 60 cm de longitud ($L_{e 60}$) se estimaron usando el procedimiento de mínimos cuadrados, a partir de todos los datos de t_p obtenidos en aire y agua, para las diferentes longitudes de guías y diferentes temperaturas, la ecuación que se usó en la estimación es la Ec. 4.

donde: el subíndice i son las diferentes longitudes de las guías: 15, 30, 45 o 60 cm, el subíndice j es el medio donde están las guías: agua o aire, $t_{p(i,j)}$ es el tiempo total de tránsito de la onda a través del cabezal de la sonda y de las guías; $\epsilon_{ra(i)}(T)$ es la permitividad dieléctrica aparente, la cual depende de la temperatura en el caso del agua y se estima con la Ec. (5) para el agua y es igual a uno en el aire; y c es la velocidad de la luz en el vacío.

La permitividad dieléctrica del agua que depende de la temperatura se estima usando la ecuación empírica de Weast (1986):

$$\epsilon_{ra\ agua} = 78,54 \cdot (1 - 4,579 \cdot 10^{-3}(T - 25) + 1,19 \cdot 10^{-5}(T - 25)^2 - 2,8 \cdot 10^{-8}(T - 25)^3) \quad (5)$$

donde: T es temperatura del agua en °C.

Una vez estimados los valores de t_0 y L_e , la permitividad dieléctrica del suelo, se obtendrá con las Ecs. (1) y (6):

$$t_s = (t_p - t_0) \quad (6)$$

4.- Desarrollo del programa “TDR waveform analyst” para medida de la permitividad dieléctrica y la calibración de sondas de TDR

La mayor parte de las aplicaciones de análisis de ondas de TDR para ordenador para la estimación de ϵ_{ra} fueron desarrollados para el TDR Tektronix 1502, como p .ej.: TACQ (Evelt, 2000a, 2000b), WINTDR (Or et al. 2004). Debido a la diferente estructura entre los datos, estas aplicaciones no son compatibles con los ficheros generados por otros equipos como el TRASE de Soilmoisture. Este último equipo de TDR dispone de un aplicación interna que permite el cálculo de ϵ_{ra} , pero no permite que el usuario intervenga en el proceso, aunque sí que es posible la descarga de los datos de la onda registrada.

Se desarrolló un programa para el análisis de la onda del TDR, que se denomina “TDR Waveform Analyst”, este programa extrae la información básica contenida en el fichero de texto generado por el TDR TRASE. Durante el proceso de cálculo la aplicación utiliza los datos de reflectancia, y encuentra los tiempos claves (t_{start} y t_{end}) utilizando la metodología explicada en el punto 3 de este trabajo. Calculando t_s en el medio a partir de los valores de t_{start} , t_{end} y t_0 , obteniéndose ϵ_{ra} .

La aplicación permite al usuario visualizar la gráfica y el proceso de cálculo empleado en la identificación de t_{start} y t_{end} (Fig. 4). Posibilita acceder a una tabla que contiene los datos de la onda. Al navegar por las distintas medidas, se visualizan en la parte superior la información que la identifica, y muestra los valores de los parámetros estimados.

Otras características de este programa son las siguientes:

- (1) *Estimación semiautomática de los tiempos de inicio y de fin de la onda.* En algunas casos puede haber una incorrecta identificación por parte del programa de t_{start} y t_{end} en la onda para ello el programa cuenta con una herramienta, que permite al usuario la identificación semiautomática de estos tiempos.
- (2) *Salida de datos.* Se dispone de tres clases de salidas. La primera permite generar un fichero corto con los datos identificativos de cada lectura seguido de las variables estimadas: tiempo total del transito (t_s), permitividad dieléctrica aparente (ϵ_{ra}) y el contenido de agua calculado con la ecuación de Topp et al. (1980); el segundo tipo de salida crea un fichero largo, que además de los datos identificativos contiene los datos de reflectancia dispuestos en columna para una fácil importación desde una hoja de cálculo; y finalmente el tercer tipo de salida sería la posibilidad de impresión de las gráficas.

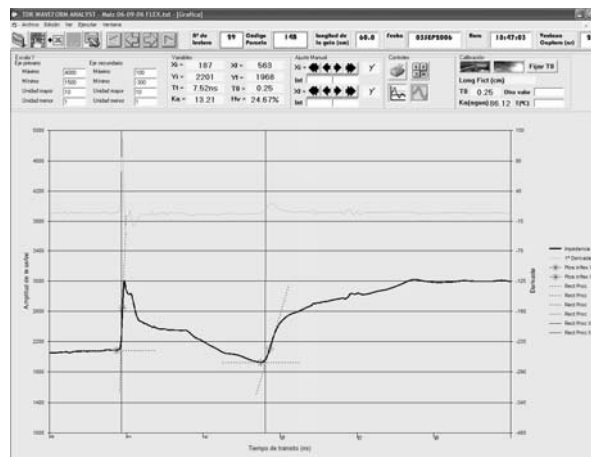


Fig. 4. Interface gráfica del programa “TDR waveform analyst”

5.- Resultados y discusión

En la Tabla 1 aparecen los valores medios de los tiempos totales de viaje (t_p) medidos en aire y agua destilada para las diferentes temperaturas y longitudes de guías. Los valores estimados de los parámetros L_{e15} , L_{e30} , L_{e45} , L_{e60} y t_0 a partir de la calibración de la sonda en aire y agua destilada, son los que aparecen en la Tabla 2, también se incluye el límite superior e inferior de la estimación de cada parámetro para un nivel de confianza del 95%. Como muestran los datos de la Tabla 2, las longitudes eléctricas de las sondas calibradas tienen un valor muy próximo a la longitud real de las guías; y el coeficiente de correlación de la estimación por mínimos cuadrados es 0,9998, lo que indica un ajuste muy bueno.

Tabla 1. Tiempos totales de viaje de la onda a través del conector y de las guías en función de la temperatura y longitud de las guías

Medio	Temperatura del medio (T), °C	N	Longitud de las guías, cm			
			15	30	45	60
			t_p , ns			
	5	2	5.030	9.680	14.220	--
	10	2	4.930	9.560	14.190	--
	15	2	4.980	9.510	13.980	--
	20	2	4.900	9.340	13.870	--
Agua	24	20	4.742	9.169	13.622	18.123
	25	2	4.840	9.300	13.730	--
	30	2	4.730	9.100	13.470	--
	35	2	4.810	9.210	13.450	--
	40	2	4.790	9.130	13.360	--
Aire	-	36	0.787	1.266	1.746	2.247*

N- número de medidas; *número de medidas 20

Se analizó la sensibilidad de las estimaciones del contenido de agua en el suelo a los posibles errores cometidos en la estimación de t_0 . Con este objetivo se eligen valores de viaje a tiempo de viaje a través del conector y las guías (t_p), correspondientes a tres contenidos de agua en el suelo (bajos, medios y altos) normales en un suelo con textura franca y con las cuatro longitudes eléctricas de las guías (L_{e15} , L_{e30} , L_{e45} y L_{e60}). Al valor de t_p se le sustrae en un caso el valor del límite inferior del intervalo de confianza del 95% de la estimación de t_0 ($t_{0\text{ bajo}}$) y en el otro caso valor del límite superior ($t_{0\text{ alto}}$), obteniéndose dos tiempos de viaje a través de las guías: $t_{s\text{ bajo}}$ y $t_{s\text{ alto}}$; estimándose dos permitividades dieléctricas diferentes, $\epsilon_{ra\text{ bajo}}$ y $\epsilon_{ra\text{ alto}}$. Usando la ecuación de Topp et al. (1980) se estiman dos contenidos en agua en el suelo WC_{bajo} y WC_{alto} . En la Tabla 3 se muestra la diferencia en el contenido de agua obtenido con el límite superior de t_0 y el inferior (WC_{bajo} y WC_{alto}); y la diferencia relativa, estos resultados muestran que el caso en el cual se produce una mayor diferencia relativa en la estimación del contenido de agua, sería con guías de 15cm y con un bajo contenido en agua, en esta situación la diferencia relativa en la estimación del contenido en agua es de 5.95% y una diferencia en el contenido de agua de 0.59% (10.05% frente a 10.64%), considerándose este valor un resultado aceptable.

Un futuro trabajo a desarrollar sería la cuantificación del efecto del no paralelismo de las guías en este tipo de terrenos sobre los resultados de ϵ_{ra} .

Tabla 2. Valores estimados de los parámetros L_{e15} , L_{e30} , L_{e45} , L_{e60} y t_0 ; error típico; límites inferior y superior con nivel de confianza del 95%

Parámetro	Valor estimado	Error típico	Intervalo de confianza 95%	
			Límite inferior	Límite superior
t_0 , ns	0.255	0.007	0.241	0.268
L_{e15} , cm	15.313	0.046	15.222	15.404
L_{e30} , cm	30.282	0.046	30.191	30.373
L_{e45} , cm	45.230	0.046	45.139	45.321
L_{e60} , cm	60.171	0.058	60.058	60.285

Tabla 3.- Análisis de sensibilidad del valor del contenido de agua en el suelo vs. t_0

Cont. Agua	L_e , cm	t_p , ns	t_0 bajo, ns	ϵ_{ra} bajo	WC_{alto} , %	Diferencia $WC_{alto} - WC_{bajo}$, %	Diferencia relativa $[(WC_{alto} - WC_{bajo}) / WC_{alto}] \times 100\%$
			t_0 alto, ns	ϵ_{ra} alto	WC_{bajo} , %		
Bajo	15.313	1.505	0.241	6.135	10.64	0.59	5.95
			0.268	5.876	10.05		
Medio	15.313	2.232	0.241	15.213	27.91	0.64	2.34
			0.268	14.803	27.27		
Alto	15.313	3.051	0.241	30.301	44.64	0.45	1.02
			0.268	29.722	44.19		
Bajo	30.282	2.728	0.241	6.068	10.49	0.30	2.97
			0.268	5.937	10.19		
Medio	30.282	4.165	0.241	15.108	27.74	0.32	1.18
			0.268	14.900	27.42		
Alto	30.282	5.784	0.241	30.152	44.53	0.23	0.52
			0.268	29.859	44.30		
Bajo	45.23	3.948	0.241	6.046	10.44	0.20	1.98
			0.268	5.958	10.24		
Medio	45.23	6.095	0.241	15.072	27.69	0.22	0.79
			0.268	14.933	27.47		
Alto	45.23	8.513	0.241	30.102	44.49	0.15	0.35
			0.268	29.906	44.34		
Bajo	60.235	5.174	0.241	6.034	10.41	0.15	1.48
			0.268	5.968	10.26		
Medio	61.235	8.161	0.241	15.053	27.66	0.16	0.58
			0.268	14.951	27.50		
Alto	62.235	11.618	0.241	30.074	44.47	0.11	0.25
			0.268	29.931	44.36		

6.- Conclusiones

La facilidad y rapidez de acople del conector flexible diseñado reduce el tiempo de lectura en campo en suelos pedregosos. Se reducen las cámaras de aire y las zonas comprimidas alrededor de las guías causadas por desplazamiento de las guías en el momento de la conexión. y por lo tanto los errores provocados en la estimación de la permitividad del suelo (ϵ_{ra}) en estas situaciones. Además el conector flexible es de bajo coste y de fácil construcción

La nitidez de la señal obtenida con el conector flexible permite una fácil interpretación por parte del programa desarrollado para el análisis de la onda del TDR, que se muestra como una herramienta útil, que permite al usuario visualizar el proceso de cálculo y actuar en aquellos casos de difícil interpretación automática. Los valores de los parámetros estimados: el factor de corrección del tiempo de viaje de la señal (t_0) que tiene en cuenta el viaje de la señal en el conector flexible de las guías y la longitud eléctrica de las guías (L_e) muestran un coeficiente de correlación muy alto (0,9998). Se ha observado que el valor de contenido en

agua tiene una sensibilidad que se considera aceptable respecto a los errores cometidos en la estimación de t_0 .

Agradecimientos. A los revisores de este trabajo, por sus valiosos comentarios. Este trabajo ha sido financiado con fondos del Ministerio de Educación y Ciencia (Proyecto de Investigación AGL2003-09284-C02-02), de la Xunta de Galicia (Proyecto de Investigación PGDIT04PXIC29101PN) y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Bibliografía

- Evelt, S.R. 2000a. The TACQ computer program for automatic time domain reflectometry measurements: I. Design and operating characteristics. *Trans. ASAE* 43:1939-1946.
- Evelt, S.R. 2000b. The TACQ computer program for automatic time domain reflectometry measurements: II. Waveform interpretation methods. *Trans. ASAE* 43:1947-1956.
- Ferré, P.A., y Topp, G.C., 2002. Time domain reflectometry. En: Dane, J.H., and Topp, G.C., (eds.). *Methods of soil analysis, Part 4-Physical methods*: Soil Science Society of America Book Series No. 5, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, p 434-446.
- Ferré, P.A., J.H. Knight, D.L. Rudolph y Kachanoski, R.G.. 1998. The sample areas of conventional and alternative time domain reflectometry probes. *Water Resour. Res.* 34:2971-2979.
- Heimovaara, T.J. 1993. Design of triple-wire Time Domain Reflectometry probes in practice and theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57: 1410-1417.
- Hook, W.R., N.J. Livingston, Z.J. Sun, y Hook, P.B.. 1992. Remote diode shorting improves measurement of soil water by time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1384-1391.
- Hook, W.R. y Livingston, N.J.. 1995. Propagation velocity errors in time domain reflectometry measurements of soil water. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:92-96.
- Jones, S. B., Blonquist, J. M. Jr., Robinson, D. A., Philip Rasmussen V. y Or, D. 2005. Standardizing Characterization of Electromagnetic Water Content Sensors Part 1. Methodology. *Vadose Zone Journal*, 4:1048-1058.
- Kelly, S.F., Selker, J.S. y Green, J.L., 1995. Using short soil moisture probes with high-bandwidth time domain reflectometry measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 97-102.
- Knight, J.H. 1992. Sensitivity of time domain reflectometry measurements to lateral variations in soil water content. *Water Resour. Res.* 28:2345-2352.
- Ledieu, J., De Ridder, P., De Clerck, P. y Dautrebande, S., 1986. A method measuring soil water moisture by time-domain reflectometry. *J. Hydrol.* 88, 319-328.
- Malicki, M.A., Plagge, R., Renger, M. y Walczak, R.T., 1992. Application of time-domain reflectometry (TDR) soil moisture miniprobe for the determination of unsaturated soil water characteristics from undisturbed soil cores. *Irrig. Sci.* 13, 65-72.
- Malicki, M.A. y Skierucha, W.M., 1989. A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300 ps rise-time needle pulse. *Irrig. Sci.* 10, 153-163.
- Martínez, J. y Ceballos. 2001. Diseño y validación de una sonda TDR para la medición de la humedad del suelo. En: *Temas de Investigación en Zona No Saturada*. J.J. López, M. Quemada (Eds.). Universidad pública de Navarra. Pamplona
- Or, D., Jones, S.B., VanShaar, J.R, Humphries y S., Koberstein. 2004. *WinTDR Soil Analysis Software. Users guide*. Soil Physics Utah State University and Environmental Physics. UConn
- Or, D., y J.M. Wraith, 1999. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: A physical model. *Water Resour. Res.*, 35, 371-383.
- Rajkai, K., Ryde'n, B.E., 1992. Measuring aerial soil moisture distribution with the TDR method. *Geoderma* 52, 73-85.
- Robinson, D.A, Jones, S.B., Wraith, J.M., Or, D. y Friedman, S.P. 2003a. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using Time Domain Reflectometry. *Vadose Zone J.* 2:444-475

- Robinson, D.A., Schaap, M., Jones, S.B., Friedman, S.P. y Gardner, C.M.K. 2003b. Considerations for improving the accuracy of permittivity measurement using TDR: Air/water calibration, effects of cable length. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 62–70.
- Sánchez-Pérez, J.M., Laurent, J.P., Bohy, M., Auzet, A.V. y Thony, J.L. 1999. Evaluación de un nuevo método de caracterización del perfil hídrico del suelo a partir de la inversión de una sola señal TDR. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*. Eds. R. Muñoz-Carpena, A. Ritter, C. Tascón. ICIA: Tenerife.
- Soil Moisture Equipment Corp. 1998. *Trase 6050X1. Operating instructions*. Soil Moisture Equipment Corp. Santa Barbara, CA.
- Spittlehouse, D.L., 2000. Using time domain reflectometry in stony forest soil. *Can. J. Soil Sci.* 80: 3–11
- Topp G.C. y W.D. Reynolds, 1998. Time domain reflectometry: a seminal technique for measuring mass and energy in soil. *Soil Tillage Res.* 47:125-132
- Topp, G.C. and Ferré, P.A., 2002, The Basis of Electromagnetic Methods: a Wave Equation Framework. En Dane, J.H., and Topp, G.C., (eds.), *Methods of soil analysis, Part 4-Physical methods*: Soil Science Society of America Book Series No. 5, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, p 428-433
- Topp, G.C., Davis, J.L. y Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial Transmission lines. *Water Resour. Res.* 16: 574–582.
- Topp, G.C., Davis, J.L. y Annan, A.P., 1982a. Electromagnetic determination of soil water content using TDR: I. Applications to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 672–678.
- Topp, G.C., Davis, J.L. y Annan, A.P., 1982b. Electromagnetic determination of soil water content using TDR: II. Evaluation of installation and configuration of parallel transmission lines. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 678–684.
- Weast RC (ed.). 1986. *Handbook of Physics and Chemistry*, 67th edn. CRC Press: Boca Raton, FL.
- Woodhead I.M., Buchan G.D., Christie J.H. y Irie K. 2003. A general dielectric model for Time Domain Reflectometry. *Biosyst. Engng.* 86(2): 207-216.
- Zegelin, S.J., White, I. y Jenkins, D.R., 1989. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. *Water Resour. Res.* 25: 2367–2376.

