

ESTIMACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DEL RADAR (GPR) A PARTIR DE MEDIDAS REFLECTOMETRICAS TDR "in situ"

A. López Piñeiro¹; A. García Navarro¹ y M. E. Collins²

1. Área de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Ciencias Universidad de Extremadura. 06075 Badajoz

2. Soil and Water Science Department. University of Florida Gainesville FL 32611-0290

INTRODUCCIÓN

En las investigaciones llevadas a cabo con el ground penetrating radar (GPR) sobre suelos, se asumen y asignan valores de E_r entre 4 y 6 para horizontes arenosos no saturados con agua, 30 para arenosos saturados, 10 para limosos saturados y entre 8 y 12 para arcillosos saturados (Johnson et al., 1980; Geophysical Survey Systems, Inc., 1987; Collins, 1990). Es necesario que los investigadores que utilizan el GPR seleccionen uno de los valores de E_r para determinar la máxima profundidad a la que las señales del radar penetran en un suelo, y así poder localizar e identificar horizontes diagnósticos subsuperficiales, propiedades y características edáficas, etc. El establecer correctamente las profundidades de los horizontes diagnósticos así como de otras características resulta imprescindible para identificar un suelo, determinar su variabilidad espacial, distribución y efectuar su cartografía. Así y a modo de ejemplo, un suelo clasificado como paleudult típico presenta un horizonte argílico a cualquier profundidad entre 0 y 200 cm de profundidad, mientras que otro clasificado como paleudult arénico lo presenta entre 50 y 100 cm. En consecuencia, conocer el valor real de E_r permitiría una estimación más exacta de la localización de los diferentes horizontes de un suelo y de sus características, así como la correcta interpretación de los perfiles suministrados por el GPR.

La utilización del GPR proporciona un "continuum" del suelo en tiempo real, en el que podemos examinar las profundidades de varios horizontes diagnósticos subsuperficiales (argílico, espódico, fragipan, etc). Estos horizontes, debido al fuerte contraste que presentan con el material edáfico situado por encima y debajo de ellos, son fácilmente identificables por el GPR.

Varios autores (Collins, 1992; Doolittle y Asmussen, 1992; López-Piñeiro et al., 1996; etc.) han puesto de manifiesto la utilidad del GPR en la detección de propiedades edáficas y en el establecimiento de la variabilidad y composición taxonómica de los suelos. Estos autores constatan que los horizontes argílicos y espódicos, horizontes con saturación de agua, profundidad a la que se encuentra el material original, niveles de ortstein, etc, pueden ser bien detectados mediante la utilización del GPR. Sin embargo, en ninguna de las investigaciones llevadas a cabo por los autores anteriormente mencionados ni, por lo que a nuestro conocimiento se refiere, en otras previas a la que es objeto de este trabajo, se determinó E_r "in situ" mediante TDR ni con cualquier otra técnica, en su lugar fueron seleccionados valores de E_r entre varios referenciados y aceptados por los investigadores que incorporan el radar en sus investigaciones. La técnica del TDR permite deducir la constante dieléctrica de un suelo. Esta técnica se fundamenta, básicamente, en la utilización de dos varillas metálicas insertadas dentro del suelo que actúan como guías para la propagación de un pulso electromagnético enviado desde un osciloscopio. Cuando el pulso electromagnético encuentra una discontinuidad, parte de la energía es devuelta hacia el osciloscopio, atenuándose el voltaje del mencionado pulso (Nielsen et al., 1995). El principal factor que afecta a la constante dieléctrica de un suelo es su humedad.

El contenido en humedad y E_r han sido determinados mediante TDR en material edáfico por numerosos investigadores en diferentes condiciones (Dasberg y Dalton, 1985; Dalton y Van Genuchten, 1986; Topp et al., 1988; Campbell, 1990; Redman y Annan, 1992; Sutinen et al., 1992; Kung y Lu, 1993). No obstante, en ninguna de las investigaciones mencionadas se estudió el suelo "in situ", ni se relacionó la información así obtenida con la suministrada por el GPR. En este trabajo nos proponemos (1) determinar los valores de las constantes dieléctricas en suelos en condiciones de campo y (2) establecer la profundidad de la penetración del radar en los suelos examinados utilizando los valores de E_r calculados para cada uno de ellos, comparando estas profundidades con las que se estiman aplicando valores de referencia.

METODOLOGÍA

Suelos utilizados

Los suelos seleccionados para este trabajo se agrupan en diferentes zonas (Bosque Nacional de Ocala, Playa de San Agustín, estación experimental de Belle Glade y los condados de Madison y Hendry) distribuidas en el estado de

Florida (EEUU). Estos suelos ofrecen amplia variación en su morfología, porcentaje en humedad, horizontes diagnósticos subsuperficiales y propiedades tanto físicas como químicas. Un total de 21 suelos fueron examinados, muestreados y clasificados (Soil Survey Staff, 1992) ([Tabla 1](#)). Las muestras fueron tomadas coincidiendo con un cambio significativo en las lecturas 1 obtenidas mediante TDR.

Las determinaciones de humedad, porcentaje en carbono orgánico, análisis granulométrico, pH y conductividad eléctrica se efectuaron según Soil Survey Laboratory Staff (1992). El contenido en humedad determinado en laboratorio se utilizó como un factor de corrección sobre las lecturas suministradas de TDR (Topp et al., 1980 y Topp y Davis, 1984)

Sistemas de GPR y TDR

El sistema de radar utilizado fue el Subsurface Interface Radar (SIR), sistema-3 (Geophysical Survey Systems, INC., North Salem, NH), con la antena de 500 MHZ. Los tiempos fijados para explorar fueron de 40, 60 y 80 ns, con unas relaciones de 25,6 registros por segundo. El radar fue utilizado en varios transectos de diferentes longitudes, seleccionándose para posterior utilización del TDR y muestreo, aquellos pedones que ofrecían registros con fuertes contrastes en los perfiles de alta resolución suministrados por el GPR. La profundidad de la penetración del radar fue estimada mediante los valores de E_r ofrecidos por Johnson et al. (1980), Geophysical Survey Systems, Inc. (1987) and Collins (1990) utilizando la ecuación:

$$D = tp(0,15(E_r^{1/2})-1)$$

donde D = profundidad (m) y tp = tiempo fijado para exploración (two-way travel time) (ns). Por tanto, es necesario conocer E_r para poder determinar la profundidad de penetración del radar.

La constante dieléctrica se determinó "in situ" mediante TDR. El modelo de TDR utilizado fue el 1502 Metallic Time-Domain Reflectometry (Tektronix Inc., Beaverton, OR), junto con una sonda de 20 cm de longitud unida a un cable coaxial. De este modo, las medidas con TDR se efectuaron a intervalos de 20 cm de profundidad. Los valores de E_r se calculan a partir de la velocidad de propagación de un pulso electromagnético de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$E_r = (ct/L)^2$$

donde c = velocidad de propagación de un pulso electromagnético en el vacío ($3 \cdot 10^8$ ms⁻¹), t = tiempo de propagación del pulso electromagnético en la

línea de transmisión (s) y L = longitud de la línea de transmisión (m) (Amato y Ritchie, 1995; Nielsen et al., 1995, etc.). Para comprobar la significación de las diferencias entre las profundidades de penetración del radar establecidas a partir de E_r calculadas "in situ" frente a las obtenidas cuando se emplean valores de E_r referenciados, se realiza un análisis estadístico mediante un test de contraste de medias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades de los suelos

Once de los veintidós suelos examinados presentan un horizonte argílico y fueron clasificados dentro de los Ultisoles. El horizonte argílico apareció a una profundidad que varió entre 40 y 160 cm ([Tabla 1](#)). Horizontes espódicos aparecen en dos de los suelos considerados que pertenecen a los Espodosoles. Un Histosol fue seleccionado para contrastar los valores de E_r en suelos orgánicos frente a los de suelos minerales. El resto de los suelos que se incluyen en este estudio no presentan ningún horizonte diagnóstico y fueron clasificados como Entisoles.

En general, y como se desprende de la [Tabla 2](#), los suelos presentan pequeña proporción de arcilla y elevada de arena que supera en la mayoría de los casos el 90%, con valores extremos de 41,7% y 99,5%. El contenido medio en arcilla es inferior al 10% con porcentajes que varían entre 0% y 43%. La conductividad eléctrica ofrece valores por debajo de 1,00 mS cm⁻¹ a excepción de uno de los suelos examinados en el área de la playa de San Agustín (SA-1). Los valores de pH son inferiores a 7 salvo en los suelos seleccionados en la playa (SA-1 y SA-2) y uno de los examinados en el Condado de Hendry (CH-4). En general, los porcentajes de carbono orgánico decrecen a medida que aumenta la profundidad aunque, como es lógico, son notables los incrementos en los horizontes espódicos. El valor más alto de carbono orgánico fue de 43% en el horizonte Oa2 del histosol analizado.

Constantes dieléctricas

En el transecto realizado en el bosque nacional de Ocala, (pedones BNO-1 a BNO-6) quedan representados desde suelos muy profundos, arenosos y excesivamente drenados, hasta otros que se encuentran saturados, pobremente drenados, con un horizonte orgánico Oa. Aunque las propiedades de los suelos

presentan grandes variaciones de unos suelos a otros, no sucede igual con los valores medios de E_r (3,6 a 5,4) en este grupo de suelos. Los horizontes ofrecen, individualmente, valores de E_r comprendidos entre 3.7 y 7.7 en los horizontes Ap (BNO-1) y A1 (BNO-4) respectivamente.

En la [Figura 1](#) se muestra, a modo de ejemplo, el perfil obtenido mediante GPR para el pedón BNO-1. El suelo se presenta uniforme en profundidad, destacando la presencia de lamelas de arcilla con diferente espesor que comienzan a partir de 160 cm de profundidad. El valor medio calculado de E_r para este suelo es de 3,6. Utilizando este valor, la profundidad de penetración del radar se establece en 6.5 m en lugar de los 6 m que le correspondería si seleccionamos un valor de $E_r=4$, referenciado y aceptado para suelos arenosos secos y 80 ns.

En la Playa de San Agustín se han seleccionado dos suelos (pedones SA-1 y SA-2) con el objetivo de incluir y poder comparar valores de E_r en suelos arenosos con alto contenido en sales. Por ello se ha utilizado el radar en un transecto que tiene su inicio a orillas del Océano Atlántico y su término en el comienzo de una zona de dunas. El perfil que obtenemos mediante el radar ([Fig. 2](#)) nos muestra que las señales de éste son atenuadas cuando nos situamos en las proximidades del océano (SA-1). Cuando en el transecto seleccionamos puntos más alejados del océano, las señales del radar penetran bien y son capaces de distinguir características edáficas subsuperficiales (SA-2). En los dos pedones examinados E_r ofrece cifras muy similares y que se aproximan a 3 ([Tabla 2](#)). Utilizando un valor $E_r=4$, aceptado para medios arenosos y a 40 ns, la profundidad de penetración de las señales del radar sería de 3 m. Sin embargo, utilizando el valor de E_r determinado "in situ" mediante TDR, la profundidad de penetración de las señales del radar se incrementa a 3,5 m. se aprecia nuevamente una subestimación de la profundidad de penetración por el GPR cuando se seleccionan valores de E_r referenciados y universalmente aceptados.

En el Condado de Madison se han seleccionado seis suelos (pedones CM-1 a CM-6) en los que el horizonte argílico aparece a diferentes profundidades (40 a 160 cm). Los porcentajes de arcilla de estos horizontes variaron entre 4,5 y 43 %. Los valores medios de E_r en cada suelo varían entre 4,3 y 7,9. Analizando individualmente los horizontes se aprecia que E_r varía entre 3,3 y 9,4 (horizontes Ap y Bt). Atendiendo al fuerte contraste existente entre las propiedades de los horizontes arenosos y las de los argílicos, deberíamos esperar que los valores de E_r también experimentaran fuerte variación. Este hecho se confirma y los horizontes arenosos situados por encima de los niveles de acumulación de arcilla tienen un valor medio en E_r de 4,3, mientras que el correspondiente a los horizontes argílicos es de 7,3. En consecuencia, la profundidad estimada de penetración para el radar sería inferior a 5 m,

produciéndose una sobre-estimación superior a 1 m al seleccionar un valor de $E_r=4$ (80 ns) cifra aceptada para suelos con características similares ([Fig. 3](#)).

Los suelos seleccionados en el Condado de Hendry (pedones CH-1 a CH-6) ofrecen grandes variaciones en sus propiedades y características, presentando horizontes arenosos, espódicos, arcillosos y saturados con agua, motivo por el que proporcionan una excelente oportunidad para desarrollar investigaciones con el GPR. A modo de ejemplo se presenta la [Figura 4](#), en ella se muestran los perfiles obtenidos mediante radar para los pedones CH-1 y CH-2. El primero de ellos posee horizontes arenosos sobre el horizonte espódico y a continuación el material original (caliza) que se sitúa aproximadamente a partir de los 2 m. El pedón CH-2 no presenta horizonte espódico y, en su lugar debajo de los horizontes arenosos, muestra niveles de acumulación de carbonato cálcico próximos al materia original. Estas acumulaciones no interfieren ni atenúan las señales del radar, prueba de ello es su capacidad para identificar con claridad la profundidad a la que se encuentra el material original.

Los valores medios de E_r son altos (6,2 a 8,3) en comparación con los registrados para los otros suelos considerados como minerales, hecho atribuible a su mayor contenido en humedad. El valor de E_r para el horizonte enriquecido con carbonato cálcico (CH-2, horizonte 2Ck) es el más alto de los encontrados en los suelos minerales (12,3). La profundidad de penetración del radar utilizando valores calculados de E_r es aproximadamente 1,5 m menor que seleccionando su correspondiente referenciado para suelos de estas características ($E_r=4$).

La mayor precisión en la determinación de las profundidades de penetración del radar, utilizando valores de E_r obtenidos mediante TDR in situ frente a los referenciados, se demuestra estadísticamente al observar, [Tabla 3](#), los resultados obtenidos en el test de contraste entre medias efectuado mediante el estadístico t. El valor de las diferencias es próximo a 80 cm y significativo con un nivel de probabilidad inferior a 0,0001.

En Belle Glade hemos seleccionado un suelo orgánico (BG-1), con un contenido medio en carbono orgánico de 40 %. El valor medio de E_r es de 63, valor muy alto pero que concuerda con los establecidos para materiales orgánicos. Las propiedades que presentan estos suelos son muy diferentes que las de los considerados minerales, razón por la que los valores de E_r de este suelo no puede ser comparado con la de aquéllos.

CONCLUSIONES

Los valores de Er obtenidos mediante TDR "in situ" son, en su mayoría, considerablemente más bajos que los correspondientes referenciados para suelos con características similares a los examinados. En consecuencia, la estimación de la profundidad de penetración de las señales del GPR, difiere sensiblemente al utilizar valores calculados de Er en lugar de los habitualmente aceptados en investigaciones efectuadas con el radar. El TDR es una excelente herramienta que proporciona una interpretación más precisa de la información suministrada por el radar. Los resultados de este trabajo aconsejan seleccionar valores de Er referenciados sólo de manera orientativa y cuando Er no pueda ser determinado en condiciones de campo.

REFERENCIAS

- Amato, M.; Ritchie, J. T. (1995). Small spatial scale soil water content measurement with time-domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:325-329.
- Campbell, J.E. (1990). Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:332-341.
- Collins, M.E. (1990). Applications of ground penetrating radar. XVII Reunion Nacional sobre Edafología, Badajoz, España., 15-32.
- Collins, M.E. (1992). Soil Taxonomy: A useful guide for the application of ground penetrating radar. In Hanninen, P. and Autio, S. (eds), Fourth International Conference on Ground-Penetrating Radar. Rovaniemi, Finland., 125-132.
- Dasberg, S. y Dalton F.N. (1985). Time domain reflectometry field measurements of soil water content and electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:293-297.
- Dalto, F.N y Van Genuchten M.Th. (1986). The time domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. *Geoderma*, 38:237-250.
- Doolittle, J.A. y Asmussen, L.E. (1992). The years of applications of ground penetrating radar by the United State Department of Agriculture. In Hanninen, P. and Autio, S. (eds), Fourth International Conference on Ground-Penetrating Radar. Rovaniemi, Finland., 139-147
- Geophysical Survey Systems, Inc. (1987). SIR-3 Operator Manual. Hudson, NH.
- Hanninen, P. 1992. Application of ground-penetrating radar and radio wave moisture probe techniques to peatland investigations. Geological Survey of Finland, Bulletin 361. Espoo, Finland.

Johnson, R.W.; Glaccum, R. y Wojtasinski, R. (1980). Applications of ground-penetrating radar to soil survey. *Soil Crop Sci. Soc. Fla. Proc.* 39:68-72.

Kung, K.-J.S y lu, Z.-B. (1993). Using ground-penetrating radar to detect layers of discontinuous dielectric constant. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:335-340.

Nielsen, D. C.; Lagae, H. J. Y Anderson, R. L. (1995) Time domain reflectometry measurements of surface soil water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:103-105.

Redman, J.D. y Annan, A.P. (1992). Dielectric permittivity monitoring in a sandy aquifer following the controlled release of a DNAPL. In Hanninen, P. and Autio, S., (eds), *Fourth International Conference on Ground-Penetrating Radar*. Rovaniemi, Finland., 191-195.

Soil Survey Laboratory Staff. (1992). *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report No. 42., Ver. 2.0.

Sutinen, R., P. Hanninen, R. Cromwell, and E. Hyvonen. 1992. GPR and dielectric classification of glacial materials. In Hanninen, P. and Autio, S., (eds), *Fourth International Conference on Ground-Penetrating Radar*, June 8-13, 1992. Rovaniemi, Finland., 133-138.

Tektronix. (1991). *1502 Metallic Time Domain Reflectometry, Operator Manual*, Beaverton, OR.

Topp, G.C. y Davis, J. L. (1985). Measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR): A field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:19-24.

Topp, G.C.; Davis, J. L. y Annan, A.P.. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16, No. 3:574-582.

Topp, G.C.; Davis, J.L y Annan, A.P. (1982). 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.

Topp, G.C.; Davis, J.L.; Bailey, W. G. y Zebchuk, W.D. (1984). The measurement of soil water content using a portable TDR hand probe. *Can. J. Soil Sci.* 64:313-321.

Topp, G.C.; Yanuka, M.; Zebchuk, W.D. y Zegelin, S. (1988). Determination of electric conductivity using time domain reflectometry: Soil and water experiments in coaxial lines. *Water Resources Research*, 24, No. 7:945-952.

Figuras y Tablas.

Tabla 1. Clasificación y rasgos diagnósticos de los suelos seleccionados

Pedón	Clasificación	Rasgos diagnósticos
Bosque Nacional Ocala		
BNO-1	Quartzipsamment Típico	ninguno
BNO-2	Paleudult Arénico	argílico (80 cm)
BNO-3	Paleudult Arenico	argílico-lamelas (60 cm)
BNO-4	Paleudult Grossarenico	argílico (120 cm)
BNO-5	Paleaquult Grossarenico	hístico, argílico (160 cm), aquico
BNO-6	Paleaquult Grossarenico	hístico, argílico (120 cm), aquico
San Agustín		
SA-1	Quartzipsamment Espódico	ninguno
SA-2	Quartzipsamment Típico	ninguno
Condado Madison		
CM-1	Paleudult Grossarenico	argílico (100 cm)
CM-2	Paleudult Típico	argílico (40 cm)
CM-3	Paleudult Grossarenico	argílico-lamelas (140 cm)
CM-4	Paleudult Grossarenico	argílico-lamelas (160 cm)
CM-5	Paleaquult Arenico	argílico (80 cm), aquico
CM-6	Paleaquult Arenico	argílico (60 cm), aquico
Condado Hendry		
CH-1	Alaquod Aerico	espódico (60 cm)
CH-2	Eutrochrept Arenico	acumulación CO ₂ Ca
CH-3	Alaquod Arenico	espódico (100 cm)
CH-4	Quartzipsamment Típico	contacto-paralítico (40 cm)
CH-5	Endoaquoll Cumulico	móllico y aquico
CH-6	Quartzipsamment Aquico	ninguno
Belle Glade		
BG-1	Medisaprist Típico	horizonte orgánico espeso

Tabla 2. Algunas propiedades y análisis granulométrico de los suelos seleccionados

Pedón	Horizonte	profund. cm	pH	C.E. mS cm ⁻¹	C.O.	Arena	Limo	Arcilla	Er
						%	%	%	
Bosque nacional Ocala									
BNO-1	Ap	0-20	4.8	0.05	0.40	96.1	2.4	1.4	3.7
	C	80-100	4.7	0.04	0.28	98.1	2.0	0.0	3.5
	C	160-180	5.4	0.03	0.09	95.6	3.3	1.1	3.5
BNO-2	Ap	0-20	4.8	0.07	0.48	90.0	6.8	3.2	4.0
	E	40-60	4.8	0.04	0.11	91.6	5.4	3.0	3.9
	Bt	80-100	4.7	0.04	0.07	80.0	8.8	11.2	4.0
BNO-3	Ap	0-20	4.8	0.03	0.05	77.2	8.7	14.1	4.2
	E	20-40	4.7	0.05	0.55	93.2	4.7	2.1	4.2
	Bt	60-80	5.3	0.04	0.18	92.0	5.0	3.0	5.1
BNO-4	A1	0-20	4.3	0.01	3.83	82.0	11.2	6.8	7.7
	A2	20-40	4.6	0.05	1.36	90.0	7.0	2.6	5.0
	E	80-100	5.2	0.03	0.10	95.6	2.8	1.6	4.0
	Btg1	120-140	5.6	0.09	0.22	68.4	13.2	18.4	4.0
	Btg2	140-160	5.1	0.05	0.17	82.4	8.5	9.1	5.1
	Cg	200-210	5.2	0.03	0.08	96.4	2.0	1.6	6.7
BNO-5	Oa	0-20	4.0	0.01	8.14	69.0	20.2	10.8	5.9
	A	20-40	4.5	0.07	1.63	89.6	6.8	3.6	4.7
	E	60-80	4.6	0.04	0.15	94.0	4.2	1.8	4.0
	Btg	160-180	5.2	0.06	0.13	69.6	4.3	26.1	4.5
BNO-6	Oa	0-20	3.9	0.01	11.8	62.0	26.4	11.6	5.6
	A	20-40	4.4	0.04	3.06	78.0	16.0	6.0	5.3
	E	80-100	5.1	0.07	0.10	93.2	5.4	1.4	3.9
	Btg	120-140	5.0	0.09	0.12	85.2	6.5	8.3	4.0
	Btg	200-210	5.3	0.07	0.10	88.8	3.8	7.4	6.9

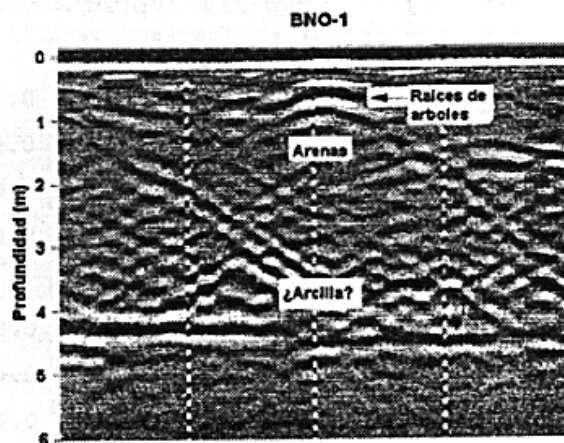


Figura 1. Perfil obtenido mediante GPR para el pedón BNO-1 en el bosque nacional de Ocala (500 MHz, 80 ns).

Tabla 2. (Continuación)

Pedón	Horizonte	profund. cm	pH	C.E. mS cm ⁻¹	C.O.	Arena	Limo %	Arcilla	Er
San Agustín									
SA-1	E	0-20	7.7	0.53	0.04				3.0
	Bh	60-80	7.4	1.99	0.06				3.9
	C	100-120	7.6	1.01	0.07				2.8
SA-2	C	0-20	7.9	0.26	0.07				2.9
	C	40-60	7.9	0.18	0.01				3.0
	C	80-100	7.8	0.35	0.07				3.0
	C	160-180	7.8	0.21	0.01				3.0
Condado Madison									
CM-1	Ap	0-20	6.3	0.19	0.72	92.8	5.2	1.9	4.6
	E	40-60	5.8	0.10	0.22	92.2	4.7	3.1	4.6
	E	80-100	6.2	0.14	0.00	92.7	5.4	1.9	6.0
	Bt	100-120	5.1	0.10	0.00	91.3	5.5	3.2	7.7
	Bt	140-160	4.8	0.10	0.00	70.5	3.6	25.9	8.6
CM-2	Ap	0-20	5.1	0.12	0.61	85.7	7.8	6.5	6.0
	Bt	40-60	5.0	0.10	0.13	83.4	7.1	9.5	7.5
	Bt	60-80	5.0	0.08	0.06	67.5	6.3	26.3	8.5
	Bt	100-120	4.8	0.07	0.21	51.8	5.1	43.0	9.4
CM-3	Ap	0-20	5.3	0.08	0.87	91.2	6.2	2.6	3.3
	E	40-60	5.6	0.03	0.18	92.8	4.6	2.6	3.7
	E	120-140	5.3	0.02	0.05	94.0	5.4	0.6	4.1
	Bt1	140-160	5.2	0.03	0.06	90.0	5.5	4.5	5.4
	Bt2	160-180	5.3	0.07	0.05	84.4	6.3	9.3	6.3
CM-4	Ap	0-20	5.5	0.03	0.61	91.2	6.9	1.9	3.5
	E	60-80	5.1	0.02	0.19	92.8	4.3	2.9	3.5
	E	100-120	5.3	0.02	0.12	92.4	4.7	2.9	3.5
	E	140-160	5.5	0.03	0.08	91.6	4.7	3.7	4.9
	Bt	160-180	5.7	0.03	0.05	88.9	2.1	9.0	6.3

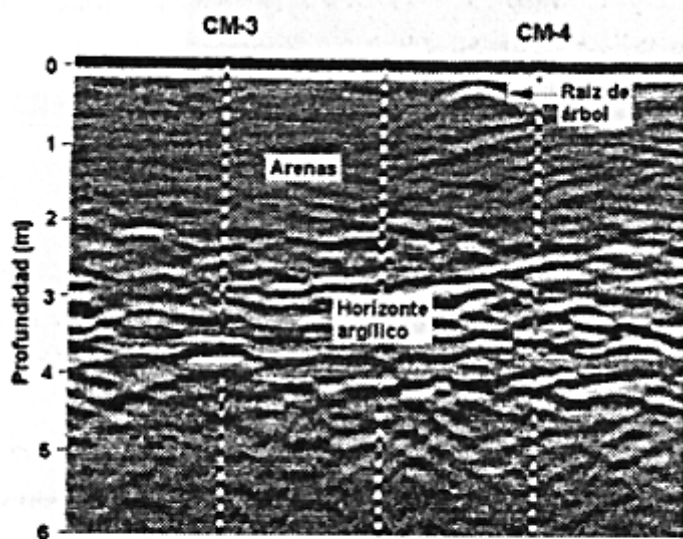


Figura 3. Perfil obtenido mediante GPR para los pedones CM-3 y CM-4 en el Condado de Madison (500 MHz, 80 ns).

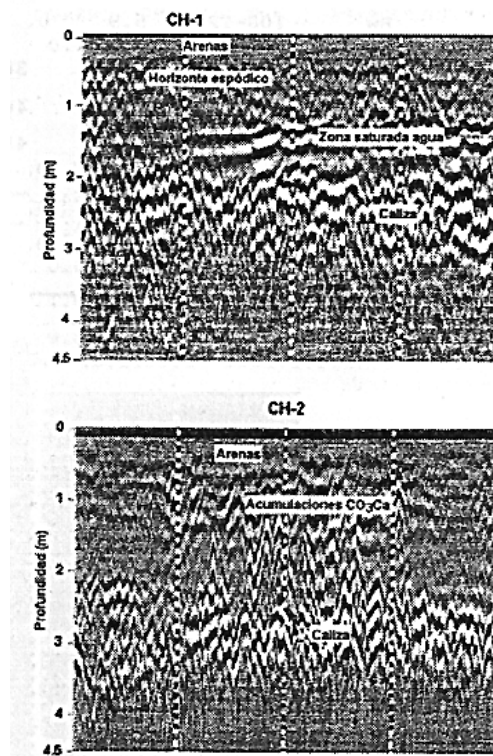


Figura 4. Perfil obtenido mediante GPR para los pedones CH-1 y CH-2 en el Condado de Hendry (500 MHz, 60 ns).

Tabla 3. Contraste entre medias en las profundidades de penetración del GPR

Diferencias	Valor (cm)	t	Probabilidad
PGPR ¹ - PGPR ²	-77.1	4.795	<0.0001

¹Profundidades de penetración de GPR estimada a partir de valores de Er obtenidos mediante TDR

²Profundidades de penetración de GPR estimada a partir de valores de Er referenciados