

Caracterización de depósitos de suelo utilizando geo-radar

FRANCISCO JAVIER MORENO V.

Departamento de Geociencias, Maestría en Geofísica, Universidad Nacional de Colombia

LUIS ALFREDO MONTES VIDES

Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias, Grupo de Investigación en Geofísica, Universidad Nacional de Colombia, lamontesv@unal.edu.co

RESUMEN

La técnica del geo-radar, o G.P.R. por su sigla en inglés (*Ground Penetrating Radar*), es una forma de prospección del subsuelo utilizando ondas electromagnéticas con frecuencias entre 10 y 1200 Mhz. Una imagen de geo-radar obtenida por reflexión contiene contrastes generados por la variación espacial de las propiedades electromagnéticas. La velocidad de las ondas electromagnéticas en un suelo depende fundamentalmente de la constante dieléctrica equivalente, la cual se puede correlacionar con la fábrica, la estructura y el contenido de agua. Por medio de pruebas en laboratorio se establecieron correlaciones para arena, recebo y arcilla.

PALABRAS CLAVE: GPR, RADAR, PROSPECCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

ABSTRACT

The radar technique prospects the subsoil with electromagnetic waves with frequencies between 10 and 1200 Mhz. A reflection radar image shows contrasts of the subsoil generated by its inhomogeneous electromagnetic properties. The velocity of the dielectric constant, correlated with mineral fabric, structure and water contained in rocks. Meanwhile lab assays, correlations between this properties for sand, cloy and a mixture of the, were established.

KEYWORDS: GPR, RADAR, ELECTROMAGNETIC PROSPECTING

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las características y disposición espacial del subsuelo es la plataforma de partida a la planeación de cualquier actividad que esté relacionada con la Ingeniería Civil Ambiental y con las disciplinas que involucren el recurso suelo.

El empleo de ondas electromagnéticas para la caracterización del subsuelo es una técnica en desarrollo en Estados Unidos, Canadá y Europa, ésta promete convertirse en una herramienta fundamental en la prospección debido a su versatilidad, rapidez y bajo costo, comparada con los tradicionales métodos invasivos.

Durante la primera mitad del siglo pasado se inició la investigación de las ondas electromagnéticas en el campo de las comunicaciones; en la segunda mitad se emplearon las ondas electromagnéticas para estudiar el subsuelo. El Said (1956) intentó

medir la profundidad de la tabla de agua. En los años 1960 a 1970 varios grupos de investigadores se dedicaron al estudio en zonas polares y glaciares; Bentley (1964) y Walford (1964).

Holser (1972), Cook (1973), Unterberger (1978) y Thierbach (1973) iniciaron la evaluación del subsuelo para la exploración de minas de carbón y sal.

La era espacial permitió un gran avance de estas técnicas; un radar similar al empleado en el estudio de las zonas polares fue utilizado para hacer medidas sobre la superficie lunar desde su órbita.

Durante el período de 1980 a 1995 se inició una gran explosión en el avance y comercialización del geo-radar: Geophysical Survey System Inc. en Estados Unidos, Mala Geosciences en Suecia, Era Technologies en el Reino Unido, Sensors and Software Inc. en Canadá e IDS en Italia, entre otros.

Las aplicaciones del geo-radar se pueden dividir en dos según las frecuencias de las antenas. Para aplicaciones en geología

donde la profundidad de penetración tiende a ser más importante que la resolución, se utilizan antenas con frecuencias menores a 500 Mhz. En ingeniería o en ensayos no destructivos se emplean antenas con frecuencias mayores a 500 Mhz.

Algunas de las áreas en las que se puede implementar son:

- El mapeo, la delimitación y el monitoreo de trayectorias y contaminantes en el subsuelo.
- Facilidades y utilidades enterradas que no tienen registro de construcción y se requiere conocer su ubicación espacial (acueductos, alcantarillados).
- La caracterización del subsuelo para obras longitudinales como vías, oleoductos, poliductos.
- Determinación de superficies de falla.
- Programas de control de calidad y exploración en los que con la menor inversión se obtenga la mejor información (pavimentos).
- Control de humedad del suelo para cultivos.
- En general, procedimientos y circunstancias que no permitan el ejercicio de técnicas invasivas.

EL GEO-RADAR

Un Georadar es un dispositivo electrónico, constituido por un generador de señal, una antena transmisora, una receptora, una unidad de control de altísima precisión (mide tiempos de viaje de orden de nanosegundos) con funciones de archivo de datos y un monitor. El transmisor genera un pulso de ondas a una frecuencia y ancho de banda según las características de la antena; ésta transmite el tren de ondas al subsuelo conforme a un patrón de radiación según su diseño. La antena transmisora es un transductor que convierte la corriente eléctrica en trenes de onda electromagnética y las transmite al subsuelo; la antena receptora capta las ondas electromagnéticas reflejadas, refractadas, difractadas o directas y las convierte en corriente. La unidad de control genera y administra los disparos de los pulsos en el transmisor y mide los tiempos de viaje de la onda en el subsuelo. Cada pulso generado y recibido es representado por una traza, de manera que al ir moviendo las antenas se generan consecutivas trazas que representan un corte del subsuelo a manera de un radargrama.

El sistema de radar permite tres modos de adquisición de datos o exploración: reflexión, sondeo variando el offset y tomografía.

MARCO TEÓRICO

Las ecuaciones de Maxwell, las cuales describen matemáticamente la física electromagnética y las relaciones constitutivas que cuantifican las propiedades geoelectricas del medio, son el fundamento para describir cuantitativamente las señales del geo-radar.

Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell predicen la variación de los campos eléctrico y magnético, los cuales son normales entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación.

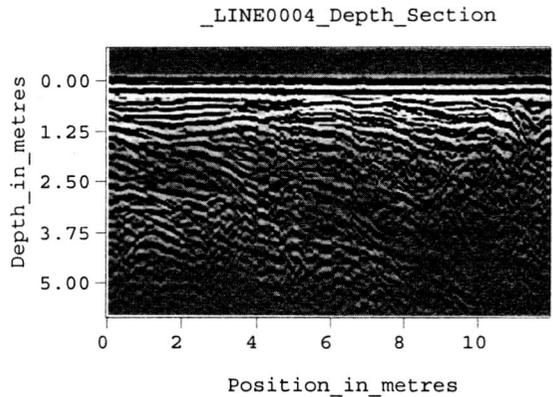
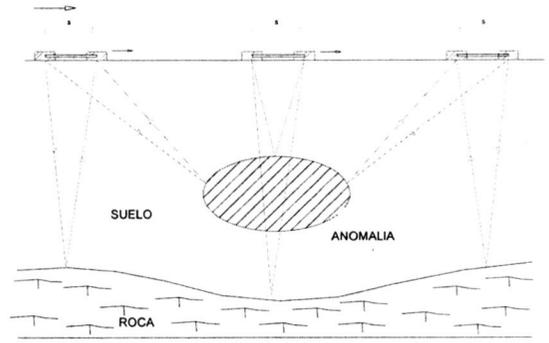
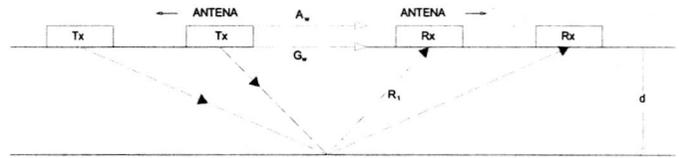


Figura 1. Método de reflexión



A : ONDA DIRECTA AIRE
G : ONDA DIRECTA TERRENO
R : ONDA REFLEJADA

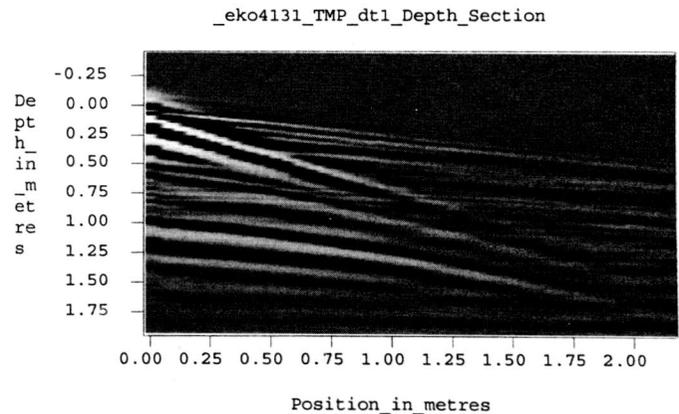


Figura 2. Método C M P

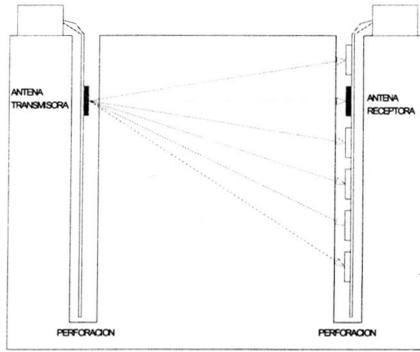


Figura 3. Método tomográfico

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = q \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (4)$$

donde

E = Campo eléctrico

B = Densidad flujo magnético (magnetización)

D = Desplazamiento eléctrico (polarización)

H = Intensidad de campo magnético

q = Densidad de carga

J = Densidad corriente eléctrica

Las ecuaciones constitutivas son el medio de cuantificar las propiedades físicas, eléctricas y magnéticas de los materiales; proveen una descripción de cómo los electrones, los átomos, y las moléculas responden en masa a la aplicación de un campo.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (σ) dada por la expresión

$$\bar{J} = \bar{E} \quad (5)$$

describe cómo las cargas libres fluyen para formar una corriente cuando un campo eléctrico está presente.

La PERMITIVIDAD DIELÉCTRICA ($\bar{\epsilon}$) expresa en la ecuación (6)

$$\bar{D} = \epsilon \cdot \bar{E} \quad (6)$$

describe cómo las cargas son forzadas a desplazarse en respuesta a un campo eléctrico y

la PERMEABILIDAD MAGNÉTICA ($\bar{\mu}$) a su vez

$$\bar{B} = \bar{\mu} \cdot \bar{H} \quad (7)$$

muestra cómo los momentos magnéticos atómicos responden a un campo magnético.

Las ecuaciones de Maxwell describen el acople entre los campos eléctrico y magnético cuando éstos varían en el tiempo. Cambios en los campos eléctricos generan campos magnéticos, los cuales inducen campos eléctricos. Esta continua sucesión de inducciones y variaciones resulta en campos que se desplazan a través del medio. Dependiendo de las magnitudes relativas de las pérdidas, los campos pueden difundirse o propagarse como ondas.

Matemáticamente, la ecuación de onda se obtiene partiendo de las ecuaciones de Maxwell y colocando el campo magnético en función del campo eléctrico.

$$\nabla \times \nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mu \bar{H}) \quad (8)$$

$$\nabla \times \nabla \times \bar{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \right) = -\mu \sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \quad (9)$$

$$\nabla \times \nabla \times \bar{E} + \mu \sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (10)$$

Propiedades de las ondas

Los campos electromagnéticos cuando se propagan como ondas pueden ser caracterizados por los frentes de onda o por trayectorias de rayo. El frente de onda es la superficie en la cual todas las señales están en fase; para un tren de ondas emitido por una fuente puntual, el frente de onda se define como la superficie a iguales tiempos de viaje. La trayectoria de rayo es perpendicular al frente de onda; los campos electromagnéticos cuando se modelan como rayos viajan según la trayectoria de éstos. Los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a la trayectoria del rayo.

Las propiedades de las ondas electromagnéticas son: velocidad de fase, V, atenuación, y la impedancia electromagnética, Z.

$$v = c / \left\{ (\epsilon_r \mu_r / 2) \left((1 + P)^2 + \right) \right\}^{1/2}$$

c = Velocidad de la luz en el espacio

ϵ_r = Constante dieléctrica relativa.

μ_r = Permeabilidad magnética relativa

(1 para los materiales no magnéticos).

P = Factor de pérdida $P = \sigma / \omega \epsilon$

σ = Conductividad

$\omega = 2\pi f$ donde f es la frecuencia

ϵ = Permitividad = $\epsilon_r \epsilon_0$

ϵ_0 = Permitividad del espacio libre

ϵ_0 = Permitividad del espacio libre ($8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m)

En materiales de baja pérdida $P \approx 0$

$$V = 0.3 / \sqrt{\epsilon_r} Z$$

$$\alpha = Z_0 \cdot \frac{\sigma}{2\sqrt{\epsilon_r}}$$

$$z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Z_0 = Es la impedancia del espacio libre

EXPERIMENTACIÓN

La metodología de investigación fundamentalmente consistió en medir la variación de la velocidad de las ondas electromagnéticas como función de la naturaleza del suelo, y de parámetros como la humedad, la densidad y la resistividad.

Para establecer un patrón de comportamiento y deducir relaciones matemáticas entre los parámetros fue necesario controlar las diferentes variables involucradas para cada tipo de suelo. Por ello se construyó una celda de prueba que consistió en un paralelepípedo en estructura de madera, reforzado con perfiles de acero. En una de sus caras se colocó una lámina de vidrio para tener control sobre el comportamiento interno de la masa del suelo. La celda tiene una capacidad aproximada de 3 m³. El experimento se inició con la serie de ensayos en arena, luego en recebo y finalmente en arcilla.

Una serie de ensayos comprendió una medición de velocidad, treinta y dos pruebas de humedad, dieciséis pruebas de densidad y una medición de resistividad. En la arena se realizaron once series, en el recebo seis y en la arcilla veinte. La variable que se cambiaba era la humedad o la compactación, y se medía el cambio en velocidad y resistividad.

Al terminar una serie de ensayos, el suelo se sacaba totalmente de la celda, se iniciaba un nuevo llenado con el mismo suelo al cual previamente se dosificaba sistemáticamente agua si se trataba de una variación de humedad o se compactaba con otra energía, de manera que cada serie de ensayos requería llenar y desocupar la celda para modificar la humedad o la compactación según fuera el caso.

Para la obtención de imágenes de radar se utilizó un equipo Sensors and Software Ekko 1000 de fabricación canadiense y un conjunto de antenas con frecuencia de 450 Mhz. Las antenas se colocaron inicialmente con una distancia de 0.25 m y para cada pulso se separaban entre sí 0.05m en forma equidistante a un punto central; la distancia máxima de separación entre antenas que permitía la celda fue de 2.50 m. La información obtenida se trasladó a un computador para así imprimir la matriz de datos tendiente al cálculo de la velocidad.

RESULTADOS

En la tabla adjunta se resumen los resultados de laboratorio obtenidos.

Dentro del rango de humedades experimentado (5% - 24%) se encontró una relación lineal entre la humedad y la velocidad con

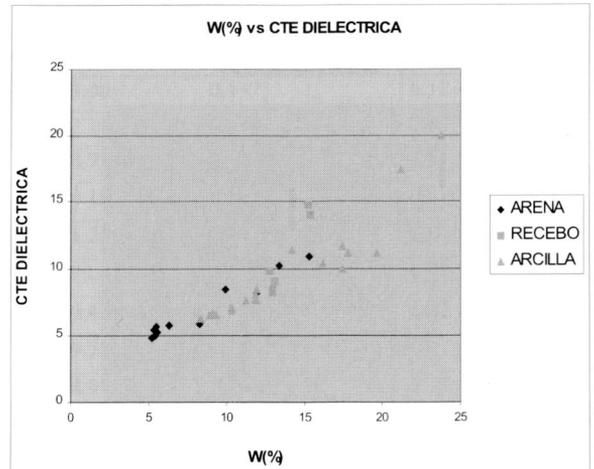


Figura 4

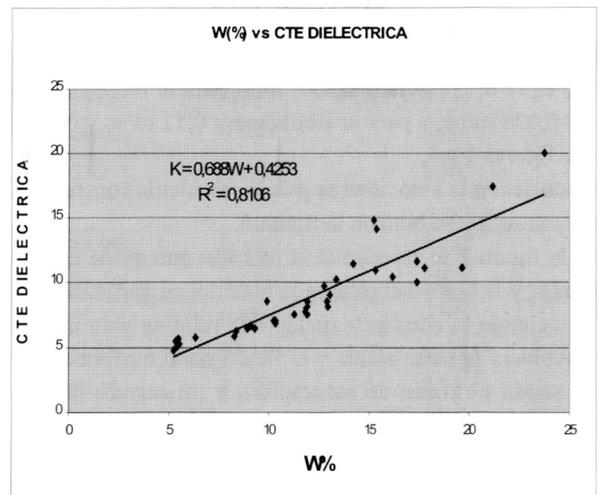


Figura 5

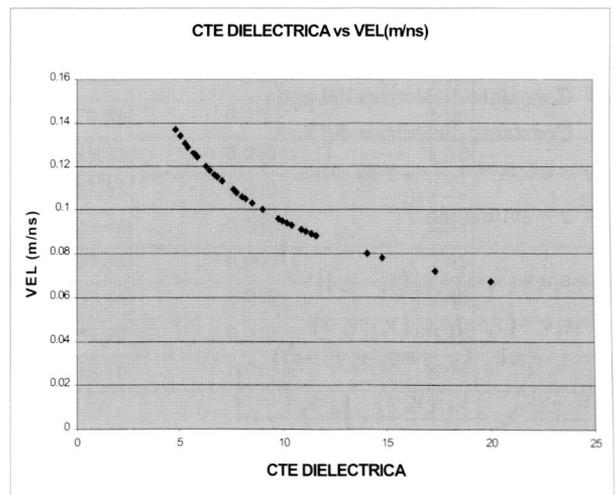


Figura 6

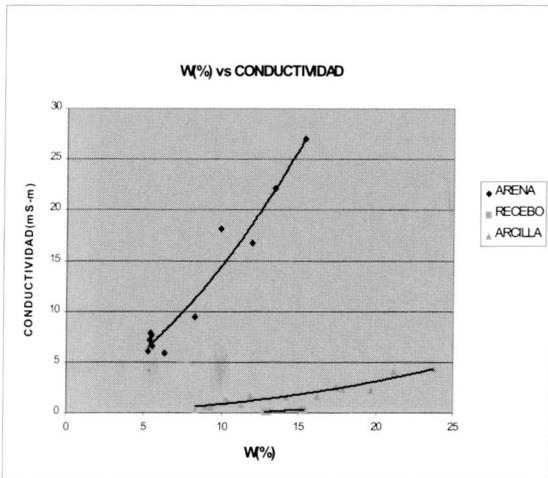


Figura 7

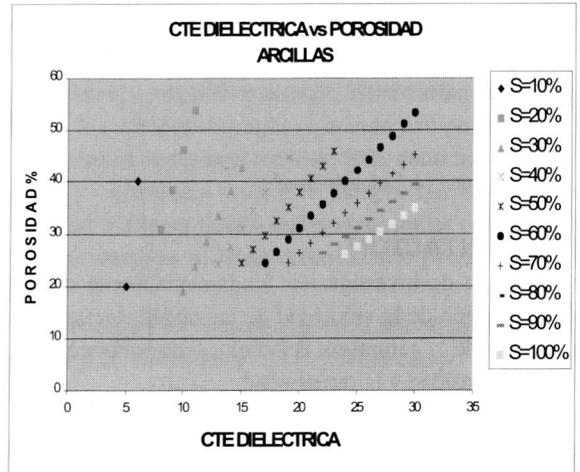


Figura 8

un coeficiente de correlación de 0,94; la velocidad para la arena fluctuó entre 0,137 m/ns y 0,091 m/ns; para el recebo entre 0,100 m/ns y 0,078 m/ns, y para la arcilla entre 0,12 m/ns y 0,067 m/ns. Véanse figuras 4 y 5.

Conociendo la velocidad se puede calcular la constante dieléctrica ($\epsilon_r = (0,3/V)^2$) y se obtiene la figura 6.

En la figura 7 se representa la relación que existe ente la conductividad y la humedad para cada material en particular.

Conociendo la constante dieléctrica relativa para un suelo, la cual involucra la parte sólida y el fluido poral que puede ser agua y aire según el grado de saturación, y utilizando la siguiente fórmula empírica propuesta para suelos se tiene:

$$\epsilon_r \cdot v_T = \epsilon_s \cdot v_s + \epsilon_f \cdot v_v$$

$$v_r = \text{Volumen total}$$

$$v_s = \text{Volumen de vacíos}$$

$$v_w = \text{Volumen de Agua}$$

$$\epsilon_s = \text{Constante dieléctrica de la parte sólida}$$

$$\epsilon_f = \text{Constante dieléctrica del fluido poral}$$

$$\epsilon_w = \text{Constante dieléctrica del agua}$$

$$\epsilon_A = \text{Constante dieléctrica del aire}$$

$$\epsilon_r \cdot v_T = \epsilon_s \cdot v_s + \epsilon_w \cdot v_w + \epsilon_A \cdot v_A$$

$$s = \frac{v_w}{v_v} \quad s = \text{saturación}$$

$$\epsilon_r \cdot v_T = \epsilon_s v_s + (v_v \cdot s) + \epsilon_A (v_v - v_w)$$

$$\epsilon_r \cdot v_T = \epsilon_s v_s + (v_v \cdot s) + \epsilon_A (v_v - v_v \cdot s)$$

$$\epsilon_r \cdot v_T = \epsilon_s \cdot v_s + \epsilon_w \cdot (v_v \cdot s + \epsilon_A \cdot v_v \cdot (1-s))$$

$$\epsilon_r = \left(\frac{v_r - v_v}{v_T} \right) \epsilon_s + \frac{\epsilon_w \cdot (v_v \cdot s)}{v_T} + \frac{\epsilon_A \cdot v_v \cdot (1-s)}{v_T}$$

$$n = \frac{v_v}{v_T} \quad n = \text{porosidad}$$

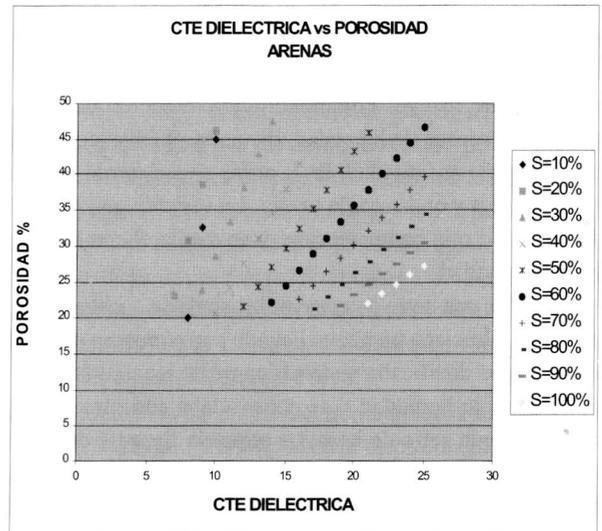


Figura 9

$$\epsilon_r = (1-n) \cdot \epsilon_s + \epsilon_w \cdot s \cdot n + \epsilon_A \cdot (1-s)n$$

$$\epsilon_r = \epsilon_s - n \cdot \epsilon_s + \epsilon_w \cdot s \cdot n + \epsilon_A \cdot n - \epsilon_A \cdot s \cdot n$$

Simplificando se obtiene la siguiente ecuación:

$$n = \frac{\epsilon_s - \epsilon_r}{\epsilon_s - \epsilon_w \cdot s - \epsilon_A (1-s)}$$

$$\text{Si: } \epsilon_s = 4.0 \quad \epsilon_w = 81 \quad \epsilon_A = 1$$

$$n = \frac{4.0 - \epsilon_r}{3 - 80 \cdot s}$$

Tabulando las expresiones anteriores, se obtienen las figuras 8 y 9 que permiten conocer la porosidad partiendo de ϵ_r , estimando un porcentaje de saturación.

CARACTERIZACIÓN DE DEPÓSITOS DE SUELO UTILIZANDO GEO-RADAR

	ENSAYO	DESCRIPCION	HUMEDAD W %	DENSIDAD (kg/m ³)	RESISTIVIDAD (Ohm-m)	VELOCIDAD (m/ns)	CONDUCTIVIDAD (mS-m)	CONTANTE DIELECTRICA ϵ_r
A R E N A	1	Wn	5.25	1649.56	163.40	0.137	6.12	4.80
	2	E1	5.42	1756.69	127.11	0.134	7.87	5.01
	3	E2	5.36	1777.50	138.73	0.129	7.21	5.41
	4	E3	5.48	1826.69	130.19	0.126	7.68	5.67
	5	W1	5.55	1382.50	151.24	0.131	6.61	5.24
	6	W2	6.35	1319.75	170.4	0.127	5.87	5.76
	7	W3	8.24	1618.81	105.43	0.124	9.48	5.85
	8	W4	11.91	1772.56	59.75	0.105	16.74	8.16
	9	E3	9.90	1873.10	54.98	0.103	18.19	8.48
	10	W5	13.39	1765.94	45.24	0.094	22.10	10.19
	11	W6	15.32	1830.75	37.01	0.091	27.02	10.87

R E C E B O	1	Wn	13.06	1834.75	8570.27	0.100	0.12	9.00
	2	E1	12.96	1795.38	12528.67	0.105	0.08	8.16
	3	E2	12.92	1923.88	8972.39	0.103	0.11	8.48
	4	E3	12.77	1956.69	8884.42	0.096	0.11	9.77
	5	W1	15.38	2118.81	4926.02	0.080	0.20	14.06
	6	W2	15.24	2206.19	3056.77	0.078	0.33	14.79

A R C I L L A	1	Wn	8.34	1553.50	3257.80	0.120	0.31	6.25
	2	E1	9.31	1640.19	1985.50	0.118	0.50	6.46
	3	E2	9.12	1666.56	1749.87	0.116	0.57	6.69
	4	E3	8.91	1707.81	1658.76	0.118	0.60	6.46
	5	W1	11.26	1555.75	1297.48	0.109	0.77	7.58
	6	E1	10.34	1646.44	810.85	0.115	1.23	6.81
	7	E2	10.23	1662.63	865.19	0.113	1.16	7.05
	8	E3	10.34	1663.63	850.43	0.113	1.18	7.05
	9	W2	11.90	1416.31	612.61	0.103	1.63	8.48
	10	E1	11.85	1526.56	696.49	0.106	1.44	8.01
	11	E2	11.90	1564.94	699.63	0.109	1.43	7.58
	12	E3	11.82	1605.50	639.63	0.108	1.56	7.72
	13	W3	14.19	1493.19	624.86	0.089	1.60	11.36
	14	W4	16.20	1410.17	633.03	0.093	1.58	10.41
	15	W5	19.66	1484.08	453.65	0.090	2.20	11.11
	16	E1	17.80	1557.75	429.46	0.090	2.33	11.11
	17	E2	17.40	1642.19	407.46	0.095	2.45	9.97
	18	E3	17.41	1653.75	407.15	0.088	2.46	11.62
	19	W6	21.14	1646.13	243.47	0.072	4.11	17.36
	20	W7	23.73	1747.60	225.56	0.067	4.43	20.05

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las correlaciones encontradas permiten evaluar la humedad, la porosidad y parámetros geoelectrónicos como la conductividad y la constante dieléctrica, una vez sea medida la velocidad de las ondas electromagnéticas en el suelo prospectado.

Existe una relación muy definida entre la humedad y la velocidad de las ondas electromagnéticas para los suelos estudiados, de manera que el Geo-radar, se constituye en una técnica de evaluación práctica y rápida de este parámetro.

Los datos presentan un buen grado de correlación; sin embargo, se deben ajustar con ensayos en terreno y de esta forma llegar a relaciones confiables que se puedan utilizar en el ejercicio profesional.

La prospección con Geo-radar permite conocer la constante dieléctrica del subsuelo, la cual se puede correlacionar con la litología facilitando los procesos de caracterización para las capas someras, de igual forma puede ser asociada a la naturaleza del fluido intersticial convirtiéndose en un medio de evaluación de la contaminación.

Para los niveles de compactación utilizados no se encontró variación significativa en la velocidad; sin embargo, el grado de compactación se puede asociar con la porosidad, y por tanto, se debe continuar investigando sobre este tema.

Se deben desarrollar proyectos que permitan modelar y estudiar la interacción de la permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética ante la influencia de ondas electromagnéticas en suelos.

El empleo de las ondas electromagnéticas en la caracterización y monitoreo de procesos relacionados con sedimentación,

consolidación y cementación en suelos, es un campo en pleno desarrollo que ofrece oportunidades de investigación.

REFERENCIAS

- ANNAN, P. A. *Ground penetrating radar workshop notes*, July, 2002.
- BUSSELLI, G., BARBER, C., DAVIS, G. B. and SALAMA, R. B. (1990). "Detection of groundwater contamination near waste disposal sites with transient electromagnetic and electrical methods". In: Ward, S. H. (ed), *Geotechnical and Environmental Geophysics*. Vol. 2: Environmental and Groundwater. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 27-39
- DANIELS, D. J., GUNTON, D. J. and Scott, H. F. (1998). *Introduction to subsurface radar*. IEE Proceeding, 135 (F,4): 278-320.
- DAS, B. M. (1983). *Advanced Soil Mechanics*, McGraw-Hill International Editions.
- DAVIS, J. L. and ANNAN, A. P. (1989). "Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy". In: *Geophysical Prospecting*, 37(5): 531-551.
- DOBRIN, M. B. and SAVIT, C. H. (1988). *Introduction to Geophysical Prospecting*, 4th edn. New York: McGraw-Hill.
- JOHNSON, R. W., GLACCUM, R. and WOJTASINSKI, R. (1979). "Application of ground penetrating radar to soil survey. Soil survey". *Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings*, 39, 2-4 October: 68-72.
- REYNOLDS, JOHN M. (1998). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. New York: John Wiley and Song.
- SANTAMARINA, Carlos. *Soils and Waves*, primera edición 2001. John Wiley and Sons Ltd.
- SARRIA, Alberto. (1991). *Introducción a los métodos geofísicos en la ingeniería civil*, 2a. Edición, Facultad de Ingeniería Uniandes.
- SHERIFF, R. E. (1991). *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*, 3rd ed. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists.