

ANÁLISIS DEL SUBSUELO UTILIZANDO TÉCNICAS GEOFÍSICAS. SISTEMA GEORADAR RAMAC/GPR

Jorge Martín Gutiérrez

Ingeniero en Geodesia y Cartografía. Ing. Técnico en Topografía.

Dto Expresión Gráfica en Arquitectura e Ingeniería.

Universidad de La Laguna. , jmargu@ull.es

RESUMEN

En este artículo se describen las técnica GPR (Ground Penetrating Radar). Un sistema basado en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas en el suelo y capar de producir una imagen de los elementos que hay bajo el mismo, así como la posibilidad de deducir el tipo de material que tenemos bajo nuestros pies. Se trata de una técnica de aplicación en estudios geofísicos, geológicos, ingenieriles...

1. INTRODUCCION.

El Ground Penetrating Radar (GPR) es empleado como una técnica no destructiva en las investigaciones poco profundas del subsuelo, y con muy buenos resultados para la detección de objetos enterrados, y cartografía del subsuelo. La alta precisión de los estudios con GPR, requieren un conocimiento en el campo de las ondas electromagnéticas. En este trabajo hemos realizado un análisis de los resultados obtenidos por GPR, de una zona que hemos preparado a conciencia. Hemos creado un banco de pruebas, en el que se han enterrado objetos a profundidad conocida y cubiertos por un material también conocido, de esta forma se controla el comportamiento del sistema, analizando la precisión de los resultados que se pueden llegar a obtener.

2. FUNDAMENTO DEL SISTEMA GPR.

El "georadar", consiste básicamente en una unidad emisora de ondas electromagnéticas y otra unidad receptora, junto con un sistema de registro digital. A partir de los tiempos de retardo de las ondas reflejadas y de la velocidad de propagación de las ondas en el material por el que se deslizan las antenas, se deduce la profundidad a la que se encuentra el cuerpo reflector.

El radar es un sistema de detección que se empieza a utilizar durante la Segunda Guerra mundial para la localización de aviones o barcos; su funcionamiento básico consiste, en todos los casos, en la emisión de señales de determinadas frecuencias para detectar las reflexiones que se producen en los objetos de interés.

El georadar es un radar diseñado para que el medio por el que se propaga la energía sea el subsuelo o cualquier otro medio material. La prospección con georadar se basa en la emisión y detección de ondas electromagnéticas que se propagan por un medio heterogéneo. La incidencia de esta energía en las inhomogeneidades del medio provoca las reflexiones, refracciones y difracción de las ondas, las cuales son captadas por la antena receptora que capta esta energía electromagnética tras su propagación por el medio material, que normalmente será el subsuelo terrestre.

La prospección con georadar detecta los cambios que sufren las propiedades electromagnéticas de los materiales del suelo, estas propiedades son definidas por una serie de parámetros que juntamente con las características de la onda emitida, determinan la propagación de la energía por el medio.

El objetivo del método de prospección con georadar es el conocimiento de estructuras superficiales y la detección de objetos enterrados, siendo un método de alta resolución y no destructivo.

La operación de trabajo del georadar es similar a la sísmica de reflexión en lo que respecta a la adquisición y el procesamiento de los datos, se diferencian en el rango de frecuencias de las ondas utilizadas. El georadar emplea ondas de frecuencias mayores que las utilizadas en sísmica, mientras que en georadar se trabaja con frecuencias de ondas entre 10 MHz y 1000 MHz, en prospección sísmica se sitúa entre los 10 Hz y los 1000 Hz. También es notoria la diferencia que en la prospección sísmica, la propagación de las ondas es función de las propiedades mecánicas de los materiales, mientras que en la prospección con radar la propagación de las ondas lo es en función de las propiedades electromagnéticas de los materiales: conductividad, Permitividad dieléctrica y Permeabilidad magnética. Las reflexiones de las ondas se producen debido a los contrastes de estas propiedades.

El georadar genera una imagen del subsuelo con altísima resolución lateral y vertical permitiendo no solamente la identificación de objetos singulares, sino caracterizar el entorno. Este el método, moderno, tiene su éxito en

aplicaciones e investigaciones del subsuelo de forma no invasiva, es decir, sin necesidad de realizar excavaciones o algún otro tipo de intervención destructiva. Por esto es un método que no afecta el medio ambiente y es excelente para las fases de planificación y desarrollo de proyectos industriales. Esta tecnología no necesita establecer contacto físico de ningún tipo (electrodos) con el suelo, es rápido y de fácil aplicación en todos los ambientes.

La profundidad de penetración y la resolución observada depende del tipo de antena usada para una adquisición en particular. En aplicaciones de tipo geológico, las antenas usadas son antenas no blindadas o no apantalladas, del inglés un-shielded, que permiten investigar hasta profundidades de 30-60 m. También permite investigar áreas urbanas y de alta resolución (con antenas blindadas o apantalladas, de su nombre en inglés Shielded), estas antenas permiten un mejor control del ruido y de las reflexiones desde el aire y una alta calidad en la imagen radar con un alcance en la profundidad de 5-10 m.

3. FUNDAMENTOS TEORICOS DEL RADAR DE SUBSUELO.

3.1. Origen y formación de las ondas electromagnéticas.

Las cargas eléctricas al ser aceleradas originan ondas electromagnéticas.

El campo E originado por la carga acelerada depende de la distancia a la carga, la aceleración de la carga y del seno del ángulo que forma la dirección de aceleración de la carga y la dirección al punto en que medimos el campo (sen θ).

Un campo eléctrico variable engendra un campo magnético variable y este a su vez uno eléctrico, de esta forma las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío sin soporte material.

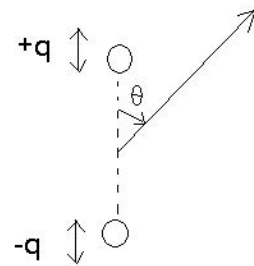


Fig.1. Cargas eléctricas.

3.2. Ecuaciones de Maxwell.

La forma básica para describir los fenómenos electromagnéticos relacionados con la óptica ondulatoria son las ecuaciones de Maxwell. Los métodos de prospección, se explican, teniendo en cuenta por un lado los conceptos de óptica geométrica, y por otro la teoría de campos electromagnéticos cuyas ecuaciones como ya señalamos fueron formulados por Maxwell, mediante las cuales se relacionan los campos eléctrico y magnéticos.

En el sistema CGS Gauss se escriben estas ecuaciones para el campo eléctrico y magnético:

$$\boxed{\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}} \quad \boxed{\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}} \quad \boxed{\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 4\pi\rho} \quad \boxed{\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0} \quad (1)$$

Donde H es el campo magnético, E es el campo eléctrico, D es el vector desplazamiento, B es el vector inducción magnética, j es la densidad de corriente, ρ es la densidad de carga, y c es una constante de proporcionalidad (velocidad de la luz en el vacío). Las ecuaciones de Maxwell se complementan con las denominadas relaciones constitutivas:

$$\boxed{\vec{D} = \epsilon \vec{E}} \quad \boxed{\vec{B} = \mu \vec{H}} \quad \boxed{\vec{j} = \sigma \vec{E}}$$

Donde ε es la constante dieléctrica, μ es la permeabilidad magnética y σ es la conductividad eléctrica. En un medio dieléctrico homogéneo, isotropo y sin carga, ρ = 0, σ = 0, ε y μ = ctes.

Estas relaciones constitutivas se obtienen de la siguiente forma:

Define el tipo de medio en el que se efectúa la propagación del campo electromagnético, los vectores de las relaciones (1), desplazamiento D, es el vector campo eléctrico, y la inducción magnética B es el vector campo magnético.

➤ Medio Lineal:

En un medio lineal las relaciones entre las componentes del vector desplazamiento y del vector campo son relaciones lineales, esto es, puede escribir matricialmente que:

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

La matriz cuadrada de paso ε se llama “matriz dieléctrica del medio”.

Con una relación análoga respecto al vector campo magnético en los medios que son lineales:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix}$$

La matriz cuadrada de paso, μ se llama "matriz de inducción del medio".

➤ Medios homogéneos:

Un medio se dice que es homogéneo si tiene las mismas propiedades electromagnéticas en todos sus puntos, esto es, si las matrices dieléctrica y de inducción son constantes.

$$\begin{aligned} \epsilon &= \text{const} \\ \mu &= \text{const} \end{aligned}$$

➤ Medios isótropos:

Un medio se dice que es isótropo si todas las direcciones son equivalentes en la propagación del campo. En un medio lineal e isótropo existe una proporcionalidad directa entre las componentes del vector desplazamiento y el vector campo eléctrico, o bien, entre las componentes del vector inducción magnética y el campo magnético:

➤ Medios dulces o HLI:

Los medios que presentan estas tres características, es decir, homogeneidad, linealidad e isotropía (HLI), se denominan

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon \end{bmatrix}$$

"medios dulces". El ejemplo más simple de medio dulce o HLI es el vacío.

Constante dieléctrica e inducción magnética del vacío:

$$\epsilon_0 = \begin{bmatrix} \epsilon_0 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_0 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_0 \end{bmatrix} \quad \mu_0 = \begin{bmatrix} \mu_0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix}$$

Relaciones vectoriales o constitutivas:

$$\boxed{\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}} \quad \boxed{\vec{B} = \mu_0 \vec{H}}$$

Teniendo en cuenta las relaciones constitutivas, las ecuaciones de Maxwell se simplifican:

$$\boxed{\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{c \partial t}} \quad \boxed{\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\mu \partial \vec{H}}{c \partial t}} \quad \boxed{\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0} \quad \boxed{\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0}$$

Cuando un campo electromagnético cambia de medio, las componentes normales y tangenciales de éste verifican las relaciones siguientes:

Componentes Normales

$$\begin{aligned} \vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) &= 4 \pi \rho_s \\ \vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) &= 0 \end{aligned}$$

Componentes tangenciales

$$\begin{aligned} \vec{n} \wedge (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) &= 0 \\ \vec{n} \wedge (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) &= \frac{4 \pi}{c} \vec{j}_s \end{aligned}$$

Madrid, 19-22 Octubre 2004

Donde el vector n , es el vector normal a la superficie, y ρ_s y j_s son las densidades superficiales de carga y de corriente, respectivamente. Los subíndices 1 y 2 hacen referencia a los campos en el medio original y en el medio en el que se transmiten los campos, respectivamente. Si las densidades de carga y corriente son cero, $\rho_s = 0$ y $j_s = 0$, entonces se verifican las siguientes relaciones de continuidad:

Componentes normales

$$D_2^n = D_1^n$$

$$B_2^n = B_1^n$$

Componentes tangenciales

$$E_2^t = E_1^t$$

$$H_2^t = H_1^t$$

Los superíndices n y t hacen referencias a las componentes normales o tangenciales.

3.3. Parámetros electromagnéticos de un medio.

Se ha visto en el apartado anterior que las ecuaciones de Maxwell ligan los campos eléctrico y magnético con las fuentes que los producen, a partir de una serie de parámetros constantes para cada medio determinado. Estas constantes definen electromagnéticamente el medio: conductividad, la Permitividad dieléctrica y la permeabilidad magnética. Estos tres valores son complejos.

Conductividad.

La conductividad de un medio nos proporciona una medida de la respuesta de sus cargas libres en presencia de un campo eléctrico externo, siendo el factor de proporcionalidad entre el campo libre aplicado y la densidad de volumen de corriente debido al movimiento de estas cargas libres.

Las unidades de medida de la conductividad en el sistema internacional, (SI), son mohs/metro o el equivalente de Siemens/metro. La conductividad de un medio es la inversa de su resistividad (mediada en Ohmios metro, Ωm).

Se pueden distinguir:

- Materiales conductores (Valores para la conductividad mayores de 105 S/m)
- Materiales semiconductores. (Valores para la conductividad entre 10⁻⁸ S/m y 105 S/m)
- Materiales aislantes (Valores para la conductividad menores de 10⁻⁸ S/m)

El contenido de agua en el material y la composición química de los mismos, determinan la conductividad de los mismos. La temperatura también afecta a la conductividad, pues afecta directamente a la movilidad de los iones del material (conductividad electrolítica).

En general, la conductividad es un parámetro que puede variar, en un mismo medio, ya que no depende solo de los cambios de materiales del medio.

Permitividad dieléctrica.

Es una constante de proporcionalidad entre la intensidad del campo eléctrico externo aplicado y el vector desplazamiento eléctrico.

La permitividad dieléctrica proporciona una medida de capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico. Proporciona un valor de la respuesta estática del material cuando está en presencia de un campo eléctrico externo.

Permeabilidad magnética.

Este parámetro relaciona la inducción magnética con la intensidad de campo magnético. La mayor parte de los materiales que nos encontramos en los estudios con georadar (excepto aquellos que contengan materiales ferromagnéticos) se cumple que la permeabilidad magnética se aproxima a 1, y por lo tanto no depende de la frecuencia del campo magnético.

4. EQUIPOS Y METODOS DE ADQUISICION DE DATOS.

El equipo utilizado para realizar los trabajos prácticos ha sido un Georadar RAMAC/GPR de la casa Mala Geoscience.

4.1. Características físicas del equipo.

Este modelo de equipo georadar es dedicado principalmente para aplicaciones en ingeniería.



Main Office

Malå GeoScience, Skolgatan 11
S-930 70 Malå, Sweden
Phone: +46 953 345 50, Fax: +46 953 345 67
E-mail: sales@malags.se

Madrid, 19-22 Octubre 2004

Está formado por:

1. Unidad Central. CU I
2. Ordenador portátil, con el software informático “Ramac” instalado, que junto con la pantalla del ordenador permite la visualización de los registros durante la adquisición de datos. Incorpora disco duro para el almacenamiento de los registros.
3. Antena. Monoestática * (Montaje foto 1) y Biestática * (Montaje foto 2).
4. Cable de conexión de la antena con la unidad de control. (Fibra óptica)
5. Odómetro. Rueda conectada a la antena (Montaje foto 1) . Carrete de Bobina de hilo (Montaje foto 2).
6. Cable puerto paralelo, de conexión entre ordenador portátil y unidad central.

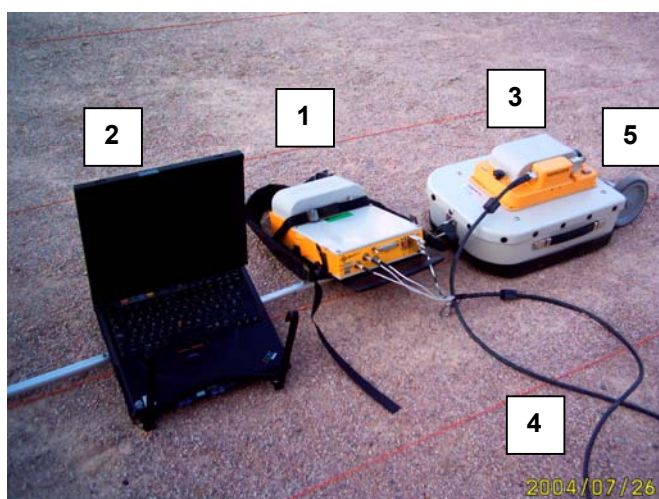


Foto 1. Montaje con antena de 500MHz.

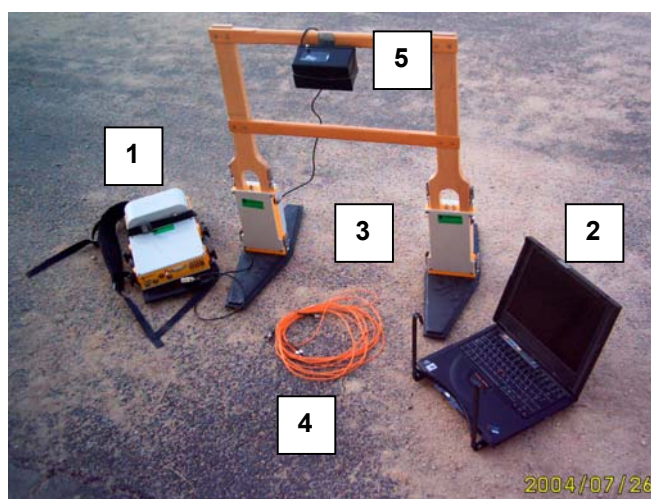


Foto 2. Montaje con antena 200MHz

* Modo Monoestático: En este tipo de antena se emite y recibe una onda electromagnética de una frecuencia dada. El modo monoestático es la posibilidad de reflexiones múltiples y por lo tanto la repetición del patrón del objetivo

* Modo Biestático: En este tipo de antena, la transmisora es separada de la unidad receptora. La ventaja de este tipo es la posibilidad de “iluminar” el subsuelo en forma inclinada y aumentar la posibilidad de resolución en objetos enterrados.

El cable de conexión entre las antenas y la unidad central es de 4 metros de longitud, lo que puede permitir realizar métodos de “CPM” de hasta 8 mts de separación.

Los odómetros que disponemos son dos, según la antena que se utilice.

Para la antena de 500MHz, es una rueda que convierte el giro de la misma en distancia. foto 3

Para la antena de 200 y 50 Mhz, respectivamente, se utiliza un odómetro que consiste en una bobina de hilo, la cual se desenrolla con el desplazamiento de las antenas, y al desenrollarse, esto se convierte en distancia. (foto 4)



Foto 3. Odómetro Rueda.



Foto 4. Odómetro bobina de hilo.

La Unidad Central.

La unidad central es la parte fundamental del sistema RAMAC/GPR. Esta unidad es compatible con cualquier antena de RAMAC/GPR. Esta unidad de control opera con el software informático GPR.exe, para controlar los tiempos de envío de señales eléctricas que la antena convierte en ondas electromagnéticas y recibir las señales reflejadas, en forma de registros de radargramas.



Foto 5. Unidad Central.

Antenas.

Las antenas, son si cabe la parte más importante del equipo. Estas actúan como un transductor electromagnético que transforma los impulsos eléctricos que recibe de la unidad central en una serie de pulsos u ondas electromagnéticas de corta duración que se emiten en el medio a estudiar. Otra función de las antenas es captar la energía reflejada y transformada en pulsos eléctricos que envía a la unidad central.

Cada antena se caracteriza por su frecuencia central y por la duración del pulso emitido. Las señales radiadas por una antena presentan un espectro de amplitudes centrado en una frecuencia determinada. A esta frecuencia se le llama frecuencia central de la antena. La duración de esta señal radiada es un parámetro que determina la resolución de la antena.

Hemos de distinguir entre antenas apantalladas y no apantalladas, también denominadas blindadas o no blindadas.

Antenas apantalladas

Las antenas son direccionales, están apantalladas en toda su superficie excepto en aquella por la que se produce la emisión y recepción de la señal. El apantallamiento es una característica importante cuando se realiza el trabajo en el interior de un edificio o en un área cerrada o parcialmente cerrada. Las señales que alcanzan las superficies apantalladas se atenúan fuertemente y no se registran en el radargrama. Esto mejora la relación señal/ruido al eliminar los elementos procedentes del exterior que puedan producir reflexiones.

Estas antenas se utilizan para la obtención de registros de alta resolución. Como hemos señalado en el apantallamiento su uso queda limitado a zonas urbanas, cerradas o semicerradas donde la existencia de coches, líneas eléctricas, o cualquier elemento urbano pueda producir reflexiones no deseadas.

Todas las antenas de este tipo son ligeras de peso, y tienen un dispositivo electrónico permutable entre la antena y las ruedas del codificador (odómetro). Estas antenas, tienen la posibilidad de poder ser operable por una sola persona.

Modelos de antenas apantalladas

Antena apantallada de 100 MHz

Dimensiones: (L x W x H);

1.25 x 0.78 x 0.20. Peso 25.5 Kg

Se obtienen datos óptimos en ambientes ruidos. Permitiendo una resolución de penetración relativamente profunda y de alcance medio.



Antena apantallada de 250 MHz

Dimensiones: (L x W x H);

0.78 x 0.44 x 0.16. Peso 8 Kg

Se obtienen datos óptimos en ambientes ruidos. Permitiendo una resolución de penetración de aprox 4 m. Esta antena junto con la de 500 MHz son las mas utilizadas para la detección de uso genera.



Antena apantallada de 500 MHz

Dimensiones: (L x W x H);

0.5 x 0.33 x 0.16. Peso 5 Kg

Se obtienen datos óptimos en ambientes ruidos. Permitiendo una resolución de penetración de aprox 2.5-3 m.



Antena apantallada de 800 MHz

Dimensiones: (L x W x H);

0.5 x 0.33 x 0.16. Peso 5 Kg

Se obtiene una resolución muy buena para investigaciones superficiales, es decir poca profundidad. Utilizado para estudio de capas de material en caminos y carreteras y en ciertas estructuras

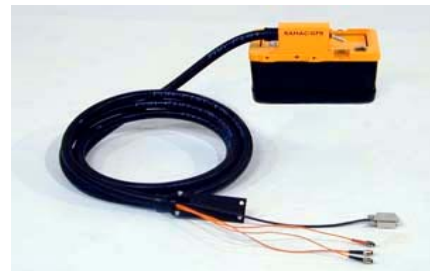


Antena apantallada de 1000 MHz

Dimensiones: (L x W x H);

0.24 x 0.16 x 0.12. Peso 2.4 Kg

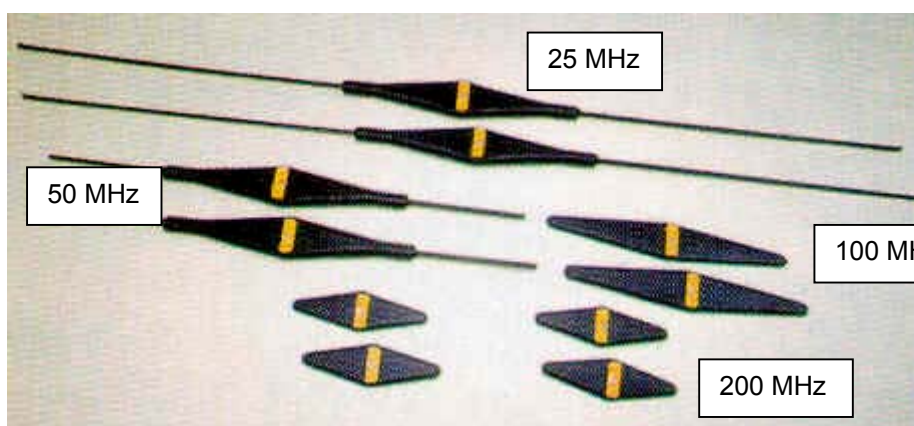
Es una antena de alta resolución para la obtención de una alta calidad, en inspecciones superficiales. Es utilizada en inspecciones del pavimento y de estructuras.



Antenas no apantalladas

Las antenas no apantalladas son de baja frecuencia, y son utilizadas para la obtención de una mayor profundidad de penetración. Las ondas electromagnéticas que emiten estas antenas, pueden reflejarse en los objetos de la superficie, por ello que no sea aconsejable su uso en zonas urbanas, donde tiene influencias el cableado, los vehículos, etc.

Modelos de antenas no apantalladas.



Antena no apantallada de 25 MHz

Dimensiones: (L x W x H);
 4.06 x 0.20 x 0.07. Peso 3.85 Kg cada una.



Es una antena de baja frecuencia diseñada para la penetración posible más profunda. Esta diseñada con las barras desmontables para un transporte más cómodo, de las mismas.

Antena no apantallada de 50 MHz

Dimensiones: (L x W x H);
 2.06 x 0.20 x 0.07. Peso 2.65 Kg cada una.



Es una antena de baja frecuencia utilizada para la penetración media dentro de su categoría. Está diseñada con las barras desmontables para un transporte más cómodo. Puede ser utilizada por una persona en campo abierto usando los separadores de madera (caballete).

Antena no apantallada de 100 MHz

Dimensiones: (L x W x H);
 1.04 x 0.16 x 0.04. Peso 1.10 Kg cada una.



Se optimiza su uso para zonas de terreno rugoso, por la posibilidad de tener las antenas emisor y receptor muy próximos.

Antena no apantallada de 200 MHz

Dimensiones: (L x W x H);
 0.54 x 0.16 x 0.04. Peso 0.55 Kg cada una.



Es una antena de alto rendimiento y diseñada para poder operar una persona sola en cualquier clase de terreno.

4.2. Métodos de Adquisición de los datos.

Con las antenas monoestáticas pueden realizarse tres formas de adquisición de datos:

- Adquisición de datos mediante perfiles.
- Adquisiciones puntuales.
- Adquisición de datos por sondeos.

Con las antenas biestáticas además de los métodos anteriores, también se pueden aplicar:

- Técnicas del punto medio común (CPM).
- Transiluminación o tomografía.
- En pozos de sondeo estas antenas permiten realizar estudios entre dos pozos. (Cross-hole).

En función de caso a estudiar y de los resultados que se deseen, realizaremos un método u otro.

Adquisición de perfiles.

Para efectuar un perfil se desplaza la antena (monoestática) o las dos antenas sin variar la separación existente entre ellas (biestáticas) a lo largo de una línea. Al realizar este levantamiento, se le puede acoplar al sistema un GPS de forma que se realiza a la vez el trabajo georeferenciado.

Durante el desplazamiento se emite un elevado número de pulsos por segundo.

Se pueden emitir desde 1 hasta 100 pulsos cada segundo. Esto permite que la adquisición de datos, aunque sea en realidad puntual se pueda considerar continua por la cantidad de trazas que se tienen en todo el perfil, dependiendo siempre de la velocidad de desplazamiento de la antena. Este desplazamiento debe realizarse a una velocidad lo más constante posible, siendo conveniente utilizar un odómetro durante la adquisición de datos.

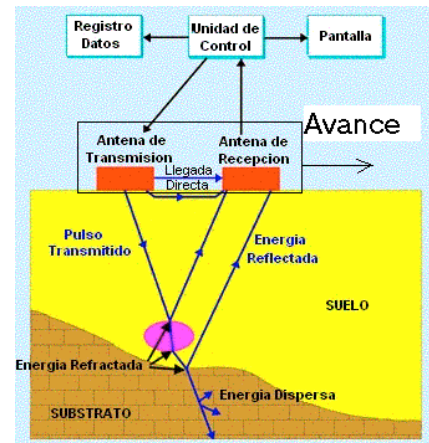


Fig 2. Esquema básico funcionamiento georadar con antena monoestática

La antena puede estar situada tocando la superficie del medio que se desea estudiar, en el caso de las antenas apantalladas y monoestática. La antena biestática, es preciso sea levantada aproximadamente unos 5 centímetros del suelo.



Foto 6. Toma de perfiles con ant. Monoest. Apant. 500MHz



Foto 7. Toma de perfiles con antena biest. no apant. 200MHz

NOTA: Pueden obtenerse registros largos de forma rápida colocando, por ejemplo, las antenas sujetas a un coche que se desplaza a una velocidad constante (los equipos de última generación permiten una exhaustiva adquisición de datos a una velocidad de 80 Km/h). La reflexión en estos casos puede considerarse casi vertical.

Adquisiciones puntuales.

La adquisición de datos de forma puntual se realiza situando la antena (antena monoestática) o las dos antenas a una determinada distancia entre sí (antena biestática), en un punto dado del área de estudio. En dicho punto, y sin efectuar ningún desplazamiento de las antenas, se realiza la emisión de energía y la adquisición de datos.

De esta forma tenemos información del interior del medio situado en la vertical del punto donde se ha ubicado la antena. En el caso de trabajar con dos antenas biestáticas separadas entre sí una cierta distancia la información es la correspondiente a la zona central entre ambas en la que se produce la reflexión. Esta forma de adquisición de datos se suele realizar cuando el terreno impide otro tipo de prospección que implique desplazamiento de las antenas (por ejemplo en zonas donde la existencia de obstáculos que impide o dificulta el desplazamiento uniforme de las antenas).

Punto medio común "Common Mid Point" .

Conocidos también por el nombre de punto común en profundidad ("Common Depth Point", "CDP") o punto de reflexión común ("Common Reflection Point", "CRP"), este tipo de estudios se realiza con antenas biestáticas desplazando la emisora y la receptora en direcciones opuestas, respecto a un punto central entre ambas. Las dos antenas deben quedar siempre equidistantes a dicho punto, y al realizarse la adquisición de datos se obtiene un registro que, representado en una gráfica distancia-tiempo, tiene la forma de una hipérbola si únicamente tenemos un reflector bajo las antenas.

La ecuación de esta hipérbola depende del tiempo de propagación, de la distancia entre antenas, de la velocidad de propagación de la onda por el medio (y por lo tanto de sus características electromagnéticas) y de la profundidad a la que se localiza la superficie reflectora.

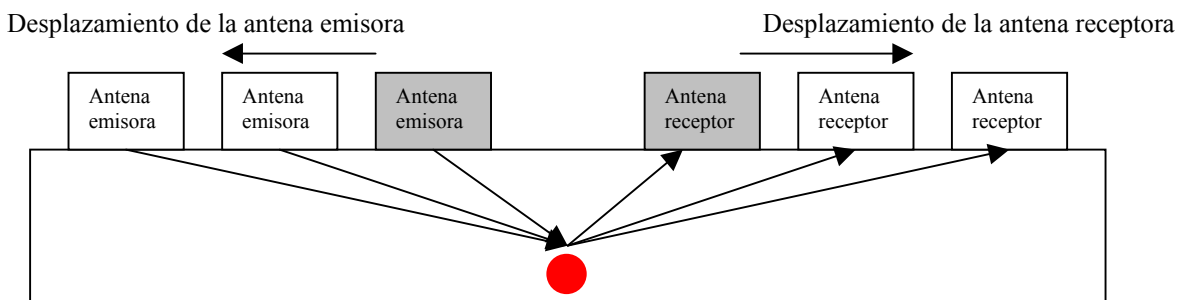


Figura 3. Obtención de datos con CMP.

A partir de los datos conocidos de distancia entre antenas y de tiempos de propagación, es posible obtener los parámetros del medio (velocidad efectiva de propagación y profundidad del reflector). En el caso de tener más de una superficie reflectora bajo las antenas, el resultado en la gráfica distancia-tiempo es una hipérbola por cada una de las superficies reflectoras.

Este método de prospección permite obtener una aproximación de las velocidades efectivas de propagación de la onda en diferentes materiales.

Los registros que resultan, contienen información de diferentes ondas electromagnéticas, de manera que se puede analizar:

- la onda directa que se ha propagado por el aire
- la onda directa que se propaga por el primer medio
- las diferentes reflexiones que quedan registradas con forma de hipérbolas.
- Las refracciones de aquellas ondas que han incidido en la discontinuidad con ángulo crítico se observan en los registros como rectas.



Foto 8. Toma datos CMP con antena biestática no apantallada 200MHz

La detección de estas ondas refractadas críticamente en las diferentes interfaces de los medios permite estimar velocidades de propagación como la inversa de la pendiente de cada una de las rectas registradas.

Hay que tener en cuenta que solo se producen ondas refractadas cuando la velocidad de los medios en contacto aumenta con la profundidad, lo que quiere decir que la permitividad relativa disminuye. No se producen onda refractada si la velocidad del medio inferior es menor que la del medio superior, produciéndose este caso a menudo porque un aumento del contenido de agua de un medio hace que la velocidad de propagación de la onda electromagnética disminuya.

Otros métodos.

Transiluminación v tomografía.

Estos métodos de estudio se aplican a muros y medios que tienen dos superficies paralelas en las que se puedan situar las antenas. Suele aplicarse, con antenas de alta frecuencia, a elementos constructivos: muros, columnas, etc.; y con

antenas de baja frecuencia a túneles (siempre que existan dos túneles paralelos), a minas (realizando el estudio entre dos galerías paralelas), etc. El estudio de pozos de sondeo que se comenta más adelante es una variación de la transiluminación.

En la transiluminación se coloca la antena emisora sobre una de las superficies y la receptora en la superficie opuesta (figura 10).

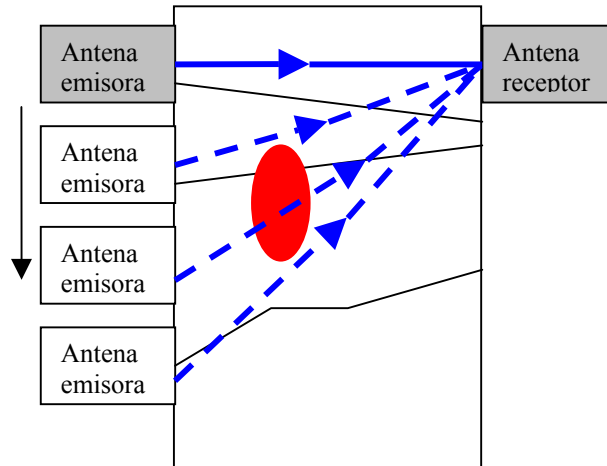


Fig 4. Adquisición de datos. Método transiluminación.

Una de las antenas permanece fija sobre una de las superficies mientras que la otra se desplaza a lo largo de la superficie opuesta. La antena receptora capta la onda que se propaga de forma directa por el medio. Las variaciones en la velocidad de propagación dan información de los cambios laterales. La posición de ambas antenas y la distancia existente entre ambas debe ser conocida en todo momento, de tal forma que se puede conocer la velocidad de propagación de la onda para cada una de estas posiciones. También es posible efectuar un cálculo de atenuaciones si además de realizar medidas de tiempo de propagación se efectúan medidas de amplitud de las ondas.

Este método permite realizar tomografías con GPR (figura 11). Con la tomografía se pueden obtener imágenes bidimensionales de variaciones de velocidad dentro de un mismo medio. Estas variaciones de velocidad se corresponden con cambios o variaciones suaves de la Permitividad dieléctrica efectiva, que a su vez se relaciona con cambios de material o variaciones en las condiciones de éste (humedad, zonas de fractura, compactación, etc.). También se realizan tomografías en las que se analizan los cambios de amplitud en la onda, trabajando sobre atenuaciones en lugar de hacerlo sobre velocidades.

Para obtener estos resultados se miden los tiempos de propagación de la onda entre el receptor y el emisor. En estudios tomográficos el plano entre las antenas emisora y las receptoras se divide en celdas (figura 11).

Cada registro es una función de la velocidad y de la longitud de cada celda que atraviesa la onda durante su propagación. Partiendo de unos valores iniciales para las velocidades de cada celda y los tiempos de propagación dentro de cada una de ellas (para el tramo de cada trayectoria que intersecta con la celda), se realiza la inversión de datos. Es necesario un sistema de ecuaciones sobredimensionado que se obtiene efectuando una medida para cada posición de la antena emisora y de la receptora.

Los valores de la velocidad asociada a cada celda base se ajustan mediante un proceso iterativo realizando la suma de tiempos esperados para cada trayectoria según el modelo de celdas y comparando con el resultado experimental.

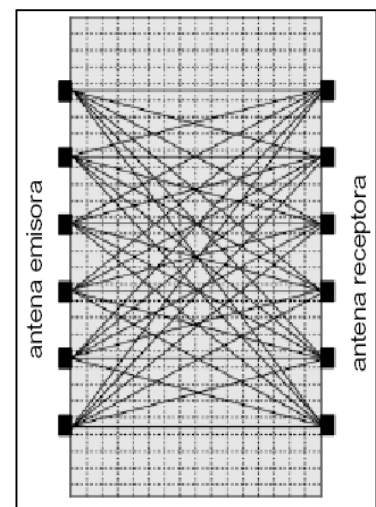


Fig.5. celdas para realizar estudios tomográficos.

El resultado final de distribución de velocidades por el interior del medio se obtiene cuando la diferencia entre los tiempos calculados y observados es mínima. El resultado final es un corte bidimensional del medio, entre la zona de emisión y la de recepción, en el que se aprecian las variaciones de velocidad. Esto permite determinar zonas de velocidad anómala.

Reflexión refracción de "Wide An le Reflexion and Refraction". "WARR").

Este método de estudio se realiza con antenas biestáticas. Consiste en dejar fija una de las dos (la emisora o la receptora) y desplazar la otra aumentando la distancia entre ambas. En la figura 13 se presenta un esquema de este

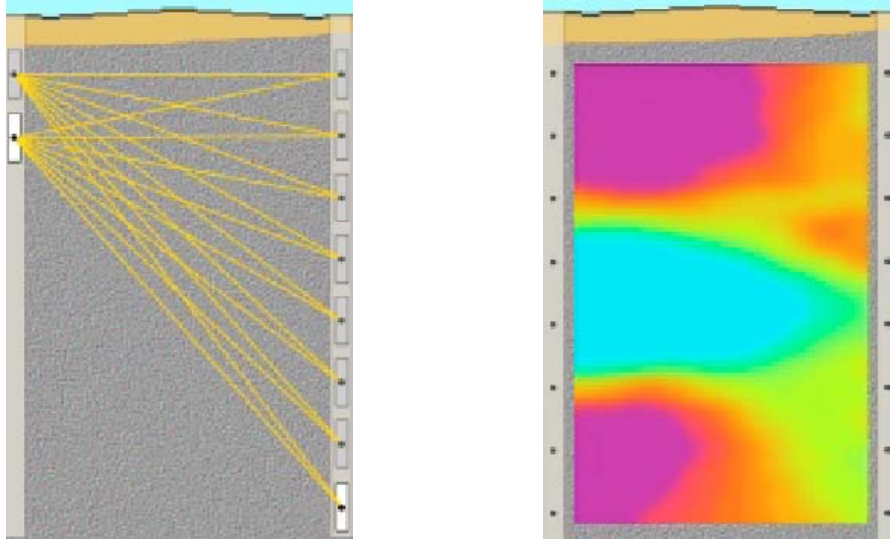


Fig.6. Resultados de Tomografía GPR.

método de adquisición de datos. Este tipo de aplicación se realiza en medios donde las superficies reflectoras son, aproximadamente, planas y paralelas a la superficie. En este caso, realizando la hipótesis de medios homogéneos (sin variaciones diferenciales de velocidad en la propagación de las ondas) es posible estimar las velocidades verticales de cada material entre discontinuidades. La Permitividad dieléctrica efectiva del medio se calcula una vez conocida la velocidad de propagación de la onda.

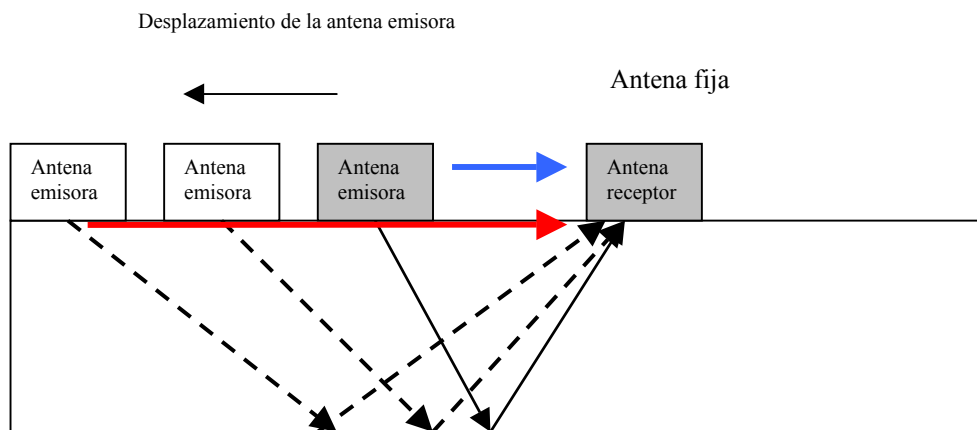


Fig 7. Adquisición de datos con método WARR. Ondas directas (Rojo), onda aérea (azul), ondas reflejadas (negro)

Los registros obtenidos mediante reflexión de gran ángulo, contienen diferentes eventos: la onda aérea (onda que se propaga directamente por el aire de una antena a otra), la onda directa (que se propaga por el medio superior), las ondas reflejadas (una por cada contraste electromagnético brusco en el medio) y las ondas refractadas críticamente siempre que se produzcan las condiciones adecuadas para que se generen (registradas como rectas en el radargrama, una por cada discontinuidad electromagnética del medio siempre y cuando la velocidad de propagación sea mayor en el medio inferior que en el superior). La onda aérea se propaga con una velocidad próxima a $c=30$ cm/ns. La onda directa lo hace con la velocidad del primer medio, igual que la primera reflexión. Si existen reflexiones posteriores, las ondas registradas contienen información acerca de la velocidad de todos los medios que atraviesan durante su propagación. Los resultados de este método se representan en gráficas tiempo- distancia. Hay que tener en cuenta que una de las fases registradas en los radargramas es la onda directa por el aire. Los datos se procesan de forma similar a los de sísmica de reflexión.

Sondeos.

En estudios de sondeos también es posible utilizar los dos tipos de antenas: monoestáticas y biestáticas y un tercer tipo denominadas antenas borehole.

En algunos casos cuando existen dos sondeos paralelos, el tipo de dispositivo que puede emplearse es similar al utilizado para una tomografía o transiluminación.

En el caso de realizar un estudio de un único sondeo con una antena monoestática (figura 14a) se debe desplazar ésta por el pozo. Los registros se realizan de forma similar a los de perfiles. Hay que tener en cuenta la direccionalidad de la antena, ya que los radargramas pueden ser el resultado de las reflexiones en una única dirección o de reflexiones en todas las direcciones.

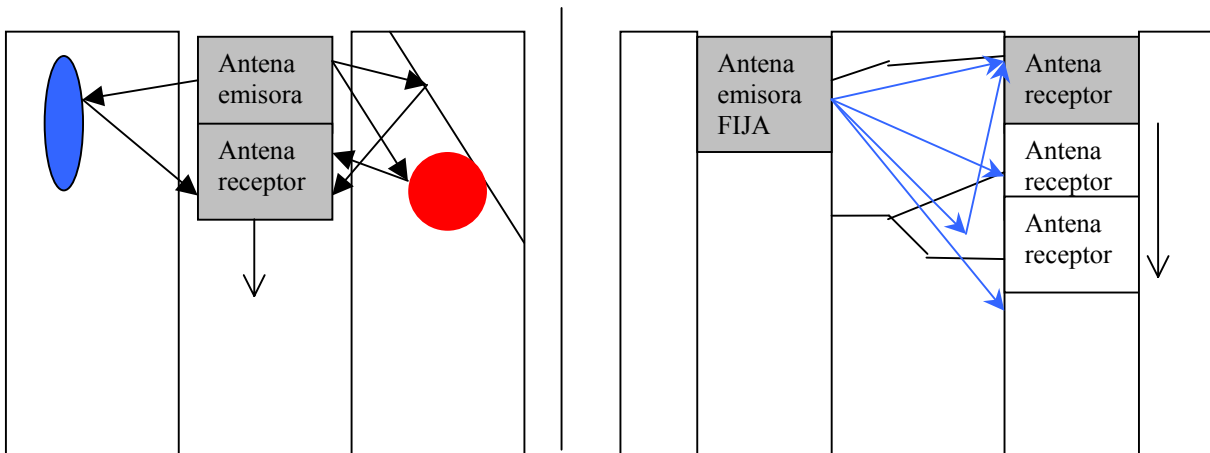


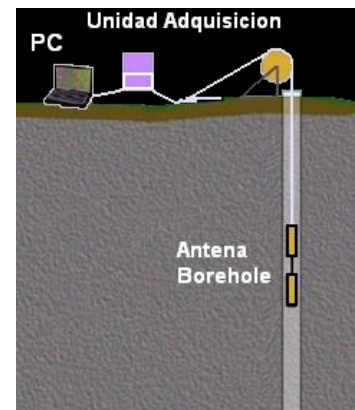
Fig 8a. Esquema de sondeo con antena monoestática.

Fig 8b. Esquema de sondeo con antena biestática

Con antenas biestáticas se puede proceder según el esquema de la figura 8b .

Las **antenas borehole**, mas conocida como sistema “Borehole Radar GPR” consiste en un transmisor y un receptor contruidos en sondas separadas, las sondas están conectadas mediante una fibra óptica a la unidad de control / adquisición diseñada para generar las ondas electromagnéticas en un tiempo determinado y realizar la adquisición de los datos. Los datos son almacenados y visualizados normalmente en un PC - unidad de interfaz. El borehole radar puede ser utilizado de diferentes modos: reflexión, crosshole, surface-to-borehole y direccional mode. Hoy día están disponibles en los mercados sistemas con frecuencias que van desde los 100 Mhz hasta los 300 Mhz.

Fig 9. Esquema de sondeo con antena borehole



La decisión sobre cual antena usar está en función de la relación entre resolución / penetración necesitada y el objeto de estudio. Cuanto mayor sea la resolución necesitada, mayor será la frecuencia de antena a utilizar. Por el contrario a mayor frecuencia usada menor es la penetración de la señal.

Los modos para utilizar estas antenas son:

- modo de crosshole
- modo surface-to-borehole

*** Sondeos. Modo de crosshole**

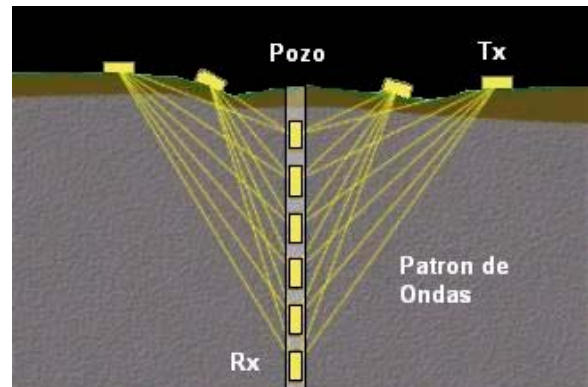
Las sondas transmisoras y receptoras del radar son bajadas en el mismo pozo con una distancia fija de separación entre ellas. Las antenas usadas comúnmente son las antenas dipolo, las cuales irradian y reciben señales reflejadas en un espacio de 360 grados (onmidireccionales).

La interpretación de Borehole radar es similar a los datos de GPR con la excepción del espacio de interpretación. En los estudios superficiales de GPR todas las reflexiones son originadas de un espacio representado por un plano mientras que en el pozo las reflexiones son recibidas de un radio de 360 grados. Es imposible determinar la orientación de un

reflector usando datos de un solo pozo si una antena utilizada es del tipo dipolo es utilizada. Lo que puede ser determinado es la distancia del reflector y en el caso donde el reflector es un plano, en ángulo entre el plano y el pozo.

***Sondeos. Modo surface-to-borehole**

Los sistemas GPR estándar pueden ser usados para estudios de superficie a pozo junto con el sistema borehole. El transmisor estándar de GPR es posicionado a diferentes distancias del pozo en la tierra y la sonda del receptor de borehole es bajada dentro del pozo. Es posible compilar imágenes del medio entre la sonda en el pozo y el transmisor en superficie en sus diferentes posiciones. Sin embargo, las medidas de superficie a pozo son más comúnmente usadas para estudios de velocidades. La unidad de control utilizada para GPR es acoplada a las antenas de borehole de 100/150 y 250/300 Mhz para investigaciones geotécnicas, ambientales y de aguas subterráneas entre otras. La profundidad estándar de operación de estas antenas es de hasta 100 metros de profundidad.



4.3. Procesamiento de Datos.

Muchos factores limitan el desempeño del Georadar, como por ejemplo, la atenuación de las ondas irradiadas, ruidos externos, ruidos instrumentales, etc. Por esto, antes de interpretar cualquier tipo de datos de georadar es necesario realizar un procesamiento de los datos, con el objeto de mejorar la imagen, aumentar la resolución y la relación señal-ruido.

A pesar de que en muchos casos el georadar es usado en forma empírica visualizando en el campo una imagen procesada automáticamente con filtros estándar en la unidad de control, es necesario procesar los datos en función de parámetros como, las características de la unidad GPR, el entorno geológico y los objetos a investigar.

Los ruidos y las interferencias encontradas en los perfiles de georadar se deben a una variedad de fuentes en las que se incluyen:

- 1) Objetos en la superficie del terreno, sobre los cuales la antena tiene que pasar.
- 2) cables aéreos de alta tensión, postes de luz o semáforos, árboles, edificaciones, etc.
- 3) objetos enterrados.
- 4) señales electromagnéticas de alta frecuencia, generadas por transmisores externos como antenas microondas, teléfonos móviles, etc.

Algunas de estas fuentes pueden ser eliminadas o minimizadas con ayuda del procesamiento de los datos, pero para poder hacer un buen procesado se tienen que tomar notas en campo sobre la presencia de cualquiera de estos elementos generadores de ruido para luego saber a qué corresponden y posteriormente eliminarlos.

El procesamiento de los datos involucra una serie de pasos a seguir. Estos pasos los podemos agrupar en tres etapas:

- I. Pre – procesamiento
- II. Ganancia
- III. Filtrado

Pre-procesamiento

Antes de iniciar el procesamiento de los datos de georadar, se tienen que realizar una serie de pasos que hemos definido como pre-procesamiento de los datos.

El primer paso a aplicar a unos datos crudos es el llamado filtro DC – Removal. Este se aplica debido a que gran parte de la energía de la señal de la onda de aire y de la onda terrestre recibida está saturada, es decir, contiene bajas frecuencias.

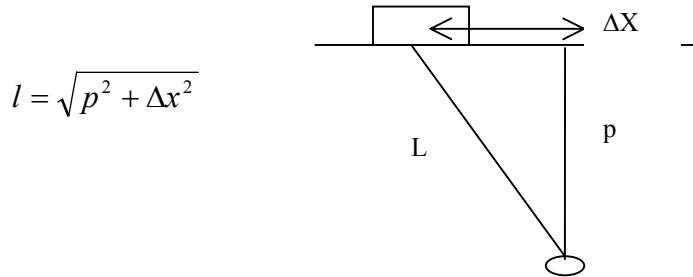
Dentro de este pre – procesamiento, se puede incluir el Cálculo de la Velocidad de propagación de las ondas de georadar en el terreno. El conocimiento de la velocidad permite realizar la transformación de los datos de tiempo a profundidad y definir la real profundidad de los objetos investigados. Existen muchas técnicas matemáticas para hacer este cálculo, pero la más común es el cálculo de las velocidades a partir de las distintas hipérbolas de reflexión presentes en el radargrama. La forma de una hipérbola de reflexión va a estar definida por la velocidad de la onda, así que adaptando hipérbolas sintéticas a los datos, se puede obtener información de la velocidad de propagación de las ondas en el subsuelo.

v, es la velocidad de propagación

p , la profundidad del objeto reflector

Δt , es el tiempo que tarda la onda desde que sale del emisor, se refleja en el objeto y llega al receptor, es decir el tiempo que tarda en recorrer dos veces la distancia entre antena y objeto enterrado. incremento

ΔX , la distancia horizontal entre un punto de la hipérbola y su punto máximo, tenemos entonces:



Ecuación de la velocidad: $V = \text{espacio} / \text{tiempo}$

$$V = \frac{2l}{\Delta t} \longrightarrow V = \frac{2\sqrt{p^2 + \Delta x^2}}{\Delta t}$$

Simplificando: $V^2 = \frac{4 * (p^2 + \Delta x^2)}{\Delta t^2} \longrightarrow \frac{V^2 * \Delta t^2}{4} = (p^2 + \Delta x^2)$

Despejamos :

$$\Delta x^2 = \frac{1}{4} V^2 \Delta t^2 - p^2$$

Expresión que adopta la forma de ecuación de una recta:

$$\Delta x^2 = a(\Delta t)^2 - p^2 \longrightarrow \begin{aligned} a &= \frac{1}{4} V^2 \\ b &= -p^2 \end{aligned}$$

Los parámetros a y b son conocidos por calculo de la recta de ajuste.

La velocidad y la profundidad de los objetos se puede calcular a partir de la siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{4} V^2 \\ b &= -p^2 \end{aligned} \longrightarrow \begin{aligned} V &= 2\sqrt{a} \\ p &= \sqrt{-b} \end{aligned}$$

Calculo de velocidad y profundidad

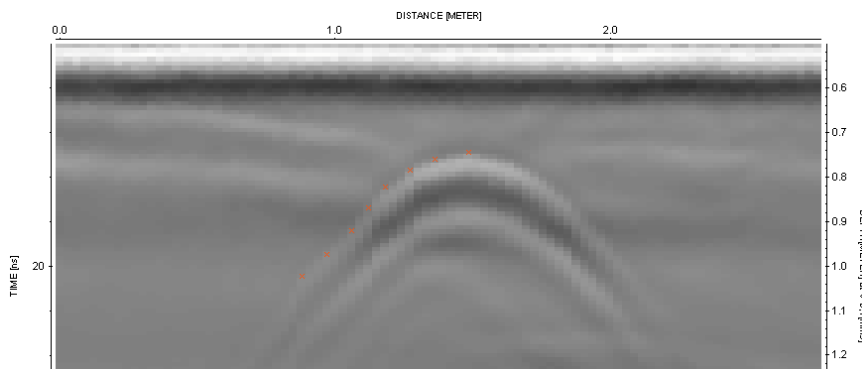


Fig 10. Marcas (distancia/tiempo) para obtener un ajuste lineal a la semi-hiperbola

Tiempo ns	x
3,746	0
4,163	0,10044
4,995	0,20089
6,244	0,47712
7,493	0,64035
9,575	0,87892
11,24	1,09237

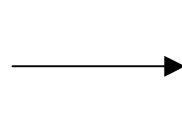
t^2	x^2
14,032516	0
17,330569	0,01008819
24,950025	0,04035679
38,987536	0,22764349
56,145049	0,41004812
91,680625	0,77250037
126,3376	1,19327222

.a = 0.0108

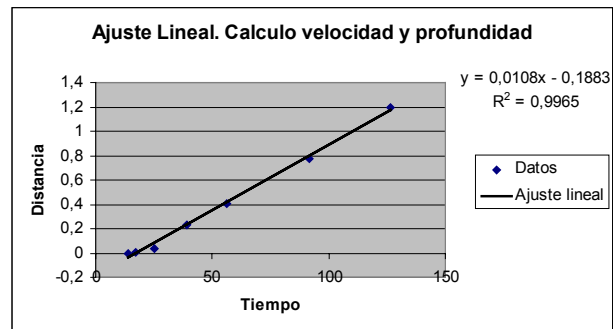
.b= -0.1883

$$V = 2\sqrt{a}$$

$$p = \sqrt{-b}$$



V = 0.20 m/ns
P = 0.43 m



La velocidad de la onda en este material es de 20 m/ns y la profundidad a que se encuentra el objeto es de 43 cm, resultado que se esperaba obtener por ser muy próximo al ya conocido.

Ganancia

A medida que la señal de radar penetra en el suelo, se produce una atenuación de la misma. Esta puede ser corregida aplicando ajustes de ganancia a cada una de las trazas. Existen muchos modelos para calcular este tipo de ajuste, entre estos la Ganancia Lineal y Exponencial AGC, direccional (X,Y). Todas ellas tienen el mismo objetivo pero diferentes aplicaciones, dependiendo del caso de estudio.

Filtraje

La aplicación de Filtros a la información intenta eliminar o reducir aquellas señales que no corresponden a eventos relacionados con la geología y que son considerados ruido. Este proceso es extremadamente importante y no puede ser completamente automatizado, siendo muy importante la experiencia del interprete para optimizar y resaltar la información contenida en los datos.

1. Tubo metálico.
2. Muro piedras
3. Bobina cable eléctrico.
4. Tubo de PVC 110 mm
5. Bidón metálico
6. Separación de capa material 1 y material 2.

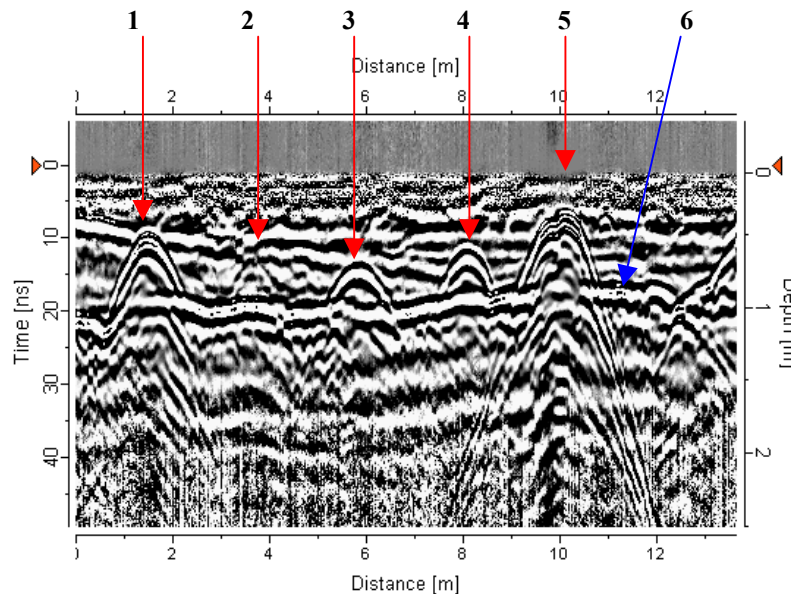


Fig 11. Radargrama, con filtros aplicados (DC removal, subtrac Mean Trace, AutomaticGainControl)

Madrid, 19-22 Octubre 2004

5. APLICACIONES.

El GPR es aplicado en la ingeniería civil (estructural-vial), en estudios del medio ambiente, así como aplicaciones geológicas, exploración minera, geotecnia y arqueología entre otras. En particular, algunas de las aplicaciones son:

- Detección de elementos metálicos y no-metálicos (tuberías, cables, etc.)
- Identificación de cavidades y estructuras enterradas (tanques, objetos militares, túneles, etc.)
- Inspección de suelos industriales y urbanos .
- Inspección de construcciones (puentes, muros, etc)
- Inspección del pavimento de autopistas, pistas de aeropuertos y ferroviarias.
- Clasificación del substrato (estratificación, profundidad substrato, etc.) y condiciones de facturación del subsuelo
- Determinación de espesores en zonas de relleno o aluvional
- Mapeo de aguas subterráneas (acuíferos, etc.)
- Medio Ambiente (mapeo y delineación de terrenos y fluidos contaminados)
- Inspección de sitios arqueológicos y estudios forenses/seguridad policiales

6. CONCLUSIONES.

El georadar representa una excelente herramienta para investigaciones no invasivas y no destructivas. Algunos factores, relacionados al entorno geológico y estructural a investigar no son controlados por el usuario y limitan fuertemente el uso del georadar. Otros factores, instrumentales y la modalidad de adquisición de datos pueden ser controlados.

Con relación al ambiente del entorno de trabajo, el georadar tiene sus mejores aplicaciones en ambientes secos con limitada presencia de agua y arcillas.

Las características óptimas de una unidad georadar son:

- Tener una alta resolución por medio de una alta capacidad de escaneo por segundo (>500 muestras / segundo) y antenas de alta sensibilidad.
- Tener una amplia gama de antenas para garantizar el uso del sensor apropiado en la condición apropiada.
- Usar un georadar multicanal para:
 - reducir el tiempo de adquisición con mayor cobertura espacial.
 - aumentar la capacidad de resolución de objetos enterrados usando contemporáneamente antenas de diferentes frecuencias y arreglos diferentes que garantizan por un lado explorar a diferentes profundidades, y por otro optimizar la caracterización del subsuelo.
- Usar una unidad que permita el procesamiento y el uso de software especializado por el mejoramiento de la señal e interpretación espacial y geo-referenciada de los datos (GPS).

En relación con la adquisición y procesamiento:

- Se necesita definir el objetivo de estudio en función del ambiente donde se necesita investigar (urbano, sub urbano y campo), esto para la decisión sobre el tipo de instrumentación a usar y el diseño de los parámetros de adquisición (orientación de las líneas y su espaciamento).
- Usar personal especializado en las diferentes fases del proyecto (diseño, ejecución y procesamiento de los datos). El georadar es conceptualmente como una sismica a reflexión, una Laparoscopia o Ultrasonido medico, a pesar de su aparente facilidad de uso, el éxito de un estudio es condicionado a la comprensión de todos los factores involucrados en la investigación y no puede ser simplificado al solo marcar una anomalía en el piso por parte de personal no calificado.
- El producto de la investigación georadar tiene que ser un documento gráfico del estudio ejecutado y una cartografía sintética de los resultados.

7. REFERENCIAS.

- Paniagua, J, del Rio, M and Rufo, M. "Test site for the analysis of subsoil GPR signal propagation". X international conference on Ground penetrating Radar. June 2004. Delf. The Netherlands.
- Davis, J. L., and Annan, A. P., 1986. "High resolution sounding using ground probing radar". Geoscience Canada, Vol. 13(3), p. 205-208.
- Davis, J. L., and Annan, A. P., 1989. "Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy". Geophysical prospecting, Vol. 37, p. 531-551.
- Mellett, J. S. (1995). "Ground penetrating radar applications in engineering, environmental management, and geology." J. of Applied Geophysics, 33(1-3), 157-166.