

APLICACIONES DEL GEORADAR DE SUBSUELO EN OBRAS CIVILES

Bernardo Caicedo Hornaza*, Elkin Mancera Carmona**, Julián Alfonso Tristáncho ***

RESUMEN

El radar de subsuelo o Georadar es una técnica no destructiva, que esta basada en la emisión y propagación de ondas electromagnéticas en un medio, con la posterior recepción de las reflexiones que se producen en sus discontinuidades. El Georadar se ha convertido en una herramienta tecnológica con un gran presente en aplicaciones de ingeniería civil y en muchas otras áreas de investigación que necesitan un conocimiento preciso del subsuelo. En este artículo se realiza una breve descripción de la técnica de Georadar aplicada en la inspección de obras civiles, recorriendo desde sus aspectos teóricos de funcionamiento, hasta trabajos prácticos realizados.

PALABRAS CLAVES: Georadar, GPR, estructura de pavimentos, detección no destructiva, redes hidráulicas, reflexión

1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción se enfrenta actualmente a un mercado de competencia, donde prima la calidad y el costo; por eso la falla de cualquier elemento y/o miembro estructural puede ocasionar perdidas o retrasos importantes en el avance de las obras. Es entonces donde las técnicas no destructivas para la inspección de obras civiles, se convierten en una poderosa herramienta para hacer un diagnóstico de alta calidad y relativo bajo coste.

La técnica de Georadar o GPR (Ground Penetrating Radar) es una técnica no destructiva, relativamente reciente, pues pese

a que los primeros ensayos datan de las primeras décadas del siglo XX. Solo hasta la década de los 70's se logró el desarrollo de un método práctico. Los primeros estudios fueron realizados en el área de la geología y glaciología, pero rápidamente se pasó al campo de la ingeniería civil.

Las primeras etapas de la investigación fueron encaminadas a la determinación de las propiedades electromagnéticas de los materiales a investigar, y los rangos de frecuencias que presentaban un funcionamiento óptimo, en resolución y penetración. Ya a finales de los 80's e inicio de los años 90's se completa el diseño y la construcción de los primeros equipos, tales como se conocen en la actualidad.

* Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. e-mail: bcaicedo@uniandes.edu.co

** Ingeniero Civil, Investigador CIMOC, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. e-mail: elelkin@hotmail.com

*** Ingeniero Mecánico, Investigador, CIMOC, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. e-mail: jutrista@uniandes.edu.co

Con el desarrollo técnico y tecnológico alcanzado, los campos de investigación en aplicaciones prácticas, se expandieron rápidamente, creándose congresos internacionales sobre el tema y sus aplicaciones en geofísica. Uno de los congresos más importantes a nivel mundial es el «*International Conference on Ground Penetrating Radar*», el cual se realiza cada 2 años desde 1986. En el congreso del año 2002, realizado en Santa Barbara, USA, se tuvo una participación de 24 países y una agenda dividida en sesiones con aplicaciones en:

- Arqueología
- Construcción e inspección
- Detección de minas
- Evaluación de materiales
- Glaciología
- Hidrología
- Ingeniería
- Puentes y pavimentos

A partir de la agenda de este congreso, se puede ver la importancia y alcance en diferentes campos, que el Georadar tiene en la actualidad.

2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

La técnica de Georadar está basada en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas. Los principios de funcionamiento de un Georadar no difieren mucho de los de un Radar común, lo que cambia es el medio de propagación; el primero es un material sólido (generalmente no homogéneo), mientras que en el segundo se trata aire (material homogéneo). La incidencia de la energía de una onda electromagnética sobre las heterogeneidades, provocará fenómenos de reflexión, refracción y difracción que serán detectados por la antena receptora. Por lo tanto lo que un GPR detectará, son los cambios en propiedades de los materiales del subsuelo, pues estas propiedades, junto con las características de la onda, serán las que rigen la propagación de la energía por el medio.

2.1. Propagación y retrosección de Ondas

Los principios físicos que rigen el comportamiento de las ondas electromagnéticas al ser propagadas son: la óptica geométrica y la teoría de campos electromagnéticos. A partir de estos dos conceptos es posible llegar a un modelo de propagación y atenuación de la onda. Las variables que rigen este modelo son las propiedades electromagnéticas del medio de propagación (material en estudio), como lo son la conductividad, permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética (ver Tabla 1).

Material	Conductividad σ (mS/M)	Velocidad v (m/ns)	Atenuación α (dB/m)
Aire	0	0.3	0
Agua	0.01	0.033	2.10 ⁻³
Arena Seca	0.01	0.15	0.01
Caliza	0.5-2	0.12	0.4-1
Granito	0.01-1	0.13	0.01-1

Tabla 1. Propiedades electromagnéticas de los materiales

En la Figura 1 y la Figura 2 se puede observar la simulación realizada en Gpr2dmax®, el cual simula el comportamiento de una onda electromagnética que viaja a través de un cubo de concreto, en el centro de este cubo se encuentra tubo metálico de 10 cm. Es importante anotar que esta simulación corresponde a una simulación bidimensional.

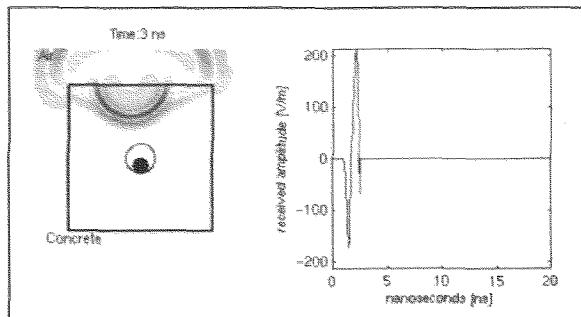


Figura 1. Propagación inicial del frente de onda

La primera etapa es la generación de la onda por la antena transmisora, el frente de onda atraviesa un espacio vacío (aire), y luego choca

con el material en estudio. De este primer choque se produce un reflexión inmediata la cual llega a la antena receptora del radar. En la parte derecha de la Figura 1, se puede observar la energía percibida por la antena receptora a través del tiempo; esta gráfica es conocida como TRAZA.

La segunda etapa es viajar a través del medio homogéneo, sin presentar ningún cambio significativo en la señal recibida por la antena. En el momento que el frente de onda llega hasta la tubo metálico se presenta una reflexión significativa, la cual retorna hacia el GPR y es percibida por la antena receptora. Como se puede observar (Figura 2), la señal en la traza presenta un nuevo pico que se puede ubicar fácilmente.

Si se toma el tiempo que transcurrió entre la emisión de la señal y la llegada de la reflexión, se puede calcular la profundidad del objeto reflector, conociendo la velocidad de propagación que presenta el medio, mediante una relación muy sencilla de velocidad sobre la mitad del tiempo medido, pues tiene que recorrer dos veces el mismo trayecto uno de ida y uno de vuelta.

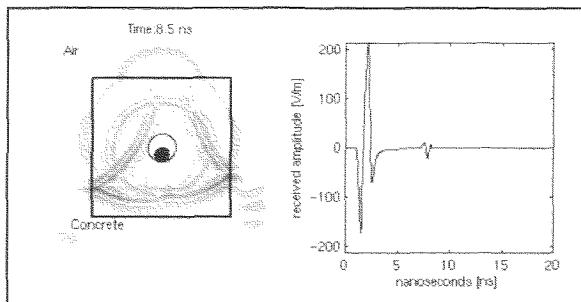


Figura 2. Reflexión del frente de onda

Al igual que las transmisiones de radio frecuencia (ondas de radio como el AM y el FM) la magnitud de la frecuencia central de oscilación de la antena, determina su capacidad de penetración y su resolución. Es así que si se tiene una antena con frecuencia de oscilación alta (por ej.: 800 o 1000 MHz), se generan longitudes de onda de amplitud baja, lo que implica buena resolución, pero baja penetración. Si se

elige una antena con una frecuencia baja (por ej.: 100 o 250 MHz) la penetración aumenta, pero se disminuye la resolución, que puede dar el equipo. En la Tabla 2 se encuentran los valores de penetración, a una perdida de resolución máxima del 25 %, para diferentes frecuencias de las antenas.

Frecuencia central (MHz)	Penetración(m)
1000	0.5
500	1.0
200	2.0
100	5.0
10	50.0

Tabla 2. Penetración promedio de antenas de diferentes frecuencias

La información que estos Radagramas aportan es variada, pero principalmente se trabaja con tiempos de llegada. El tipo de estudio de subsuelo más básico consiste en determinar velocidades de propagación promedio, y junto con los tiempos de propagación registrados para cada evento, localizar la discontinuidad en la que se ha producido la reflexión, determinando tanto su situación horizontal como la profundidad a la se encuentra.

2.2. Analogía con la reflexión sísmica

La técnica de GPR, es similar a la sísmica de reflexión, pues los fenómenos asociados con la propagación de la energía son básicamente los mismos. La diferencia se fundamenta en la frecuencia de las ondas y el método de propagación, que utiliza cada técnica. Mientras los GPR generalmente utilizan un rango de frecuencia del orden de 10 a 1000 MHz y como método de propagación las características electromagnéticas de los materiales; la reflexión sísmica rara vez sobrepasa los 1000 Hz y su propagación se basa esencialmente en las propiedades mecánicas de los suelos.

Otro aspecto importante es que mientras la sísmica de reflexión, es una técnica de baja ve-

locidad de ensayo, debido al método de generación de las ondas (golpe o explosión) y a los sensores de medición (Geofonos); la técnica de Georadar en cambio, al usar una señal electromagnética, y con los sistemas electrónicos de alta velocidad de la actualidad es capaz generar una serie de ondas en unos pocos nanosegundos y procesarlos en el orden de milisegundos, haciendo que la técnica pueda ser considerada continua y de alta velocidad. La similaridad entre estas dos técnicas de reflexión, llega a tal punto que es posible hacer el procesado de los datos recolectados por un GPR, con software que fue diseñado originalmente para sistemas de reflexión sísmica y viceversa.

2.3. Descripción de los equipos

En la Figura 3 se muestran los componentes principales, de un Georadar, cada unidad esta encargada en realizar una serie de tareas, como se describe a continuación:

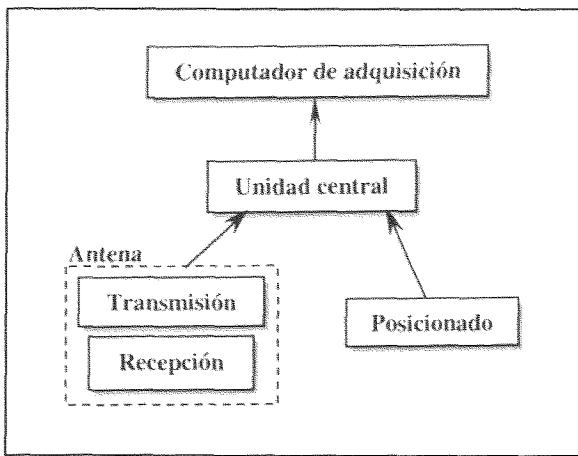


Figura 3. Estructura típica de un Georadar

- **Antena:** Es la encargada de generar los pulsos electromagnéticos y recibir las reflexiones ocasionadas. Existen dos tipo de antenas: las monoestáticas y biestáticas. Las primeras están compuestas por una solo elemento encargado de transmitir, comutar y recibir, mientras la biestáticas la componen dos elementos separados.

- **Unidad central:** Controla el comportamiento de la antena y realiza la transmisión de datos a algún medio de grabación.
- **Sistema de posicionado:** Posicionan al Georadar de acuerdo a una referencia topográfica dada. Generalmente se utilizan dos métodos: Odómetros para ubicación lineal o GPS para tener una ubicación tridimensional.
- **Computador de adquisición:** Su función principal es la de almacenar los datos en un medio magnético y mostrar las mediciones realizadas.

2.4. El Ramac X3M®

A finales de 2001 el CIMOC (Centro de Investigación en Obras Civiles) de la Universidad de Los Andes adquirió a la compañía sueca MALA Geoscience, una unidad de Georadar X3M (Figura 4) con una antena biestática acorazada de 800 MHz. Este equipo tiene como características principales su confiabilidad, fácil manejo y modularidad. Todos los proyectos prácticos descritos en este artículo se realizaron con este equipo.

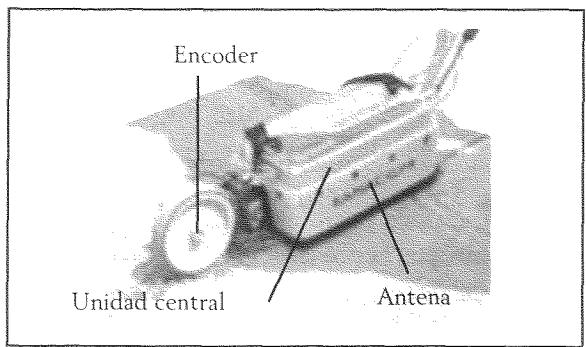


Figura 4. Georadar RAMAC - X3M

El X3M utiliza un encoder u odómetro como medio estándar de ubicación, y adicionalmente puede ser adicionando un GPS, al computador de adquisición para realizar tareas de sincronización de posición. El sistema puede generar intervalos pulsos electromagnéticos de acuerdo, a uno de los siguientes criterios: tiempo, distancia o pulso manual. Esto permite administrar de una mejor manera la memoria utilizada y la resolución de la medición.

3. PROCESAMIENTO DE DATOS

Los registros almacenados de las mediciones en el computador, son conocidos como RADAGRAMAS. Los Radagramas son una representación gráfica de las Trazas generadas cada vez que se produce un pulso electromagnético, durante la medición. Como ya se describió, las Trazas corresponden a un vector de energía recibida por reflexión vs tiempo transcurrido desde la generación del pulso.

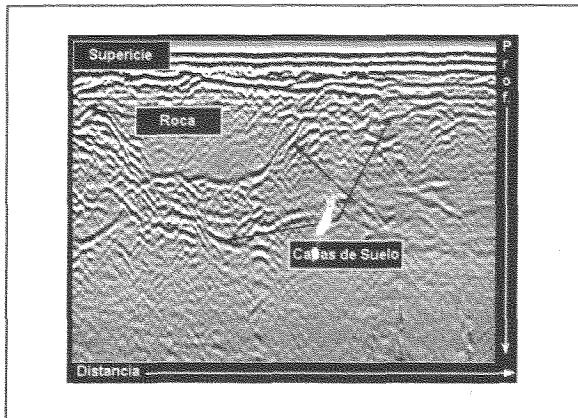


Figura 5. Radagrama típico

En un Radagrama se utiliza una paleta de colores para agrupar los rangos de energía recibidos, como se puede ver en la Figura 5, Figura 7 y Figura 10, cada uno de estos Radagramas utilizan distintas paletas.

En ocasiones es posible realizar las interpretaciones directamente en campo, pero generalmente es necesario realizar un largo proceso de interpretación. En este proceso se busca resaltar las anomalías que corresponden a las señales de interés y disminuir o eliminar el ruido. Es de suma importancia anotar que el trabajo realizado en escritorio depende del trabajo realizado en campo, si se tiene una buena información de campo, donde se describa todas las posibles anomalías que fueron registradas, el trabajo de oficina se hace mucho mas sencillo y eficaz.

El procesado de la información puede ser resumido en los siguientes pasos:

1. Ubicar radagramas para las zonas de interés.
2. Descartar anomalías producidas durante la medición.
3. Selección de escala y paleta
4. Aplicación de filtros pasa banda.
5. Correcciones estáticas.
6. Aplicar ganancias a la señal (Filtros transversales)
7. Realizar stacking. (Filtros longitudinales)
8. Obtención de tiempos de propagación para cada anomalía.
9. Calculo de profundidades a partir de las velocidades de los medios.
10. Correlación de resultados con la información existente, o resultados de otros métodos.
11. Interpretación final de los resultados.

Una importante etapa es la selección de los filtros y el ajuste de sus parámetros, por eso a continuación se realizara una breve descripción de los principales filtros existentes.

3.1. Filtros transversales

Los filtros transversales afectan al Radagrama solo en el eje Y (eje temporal), lo que quiere decir que es aplicado independientemente sobre cada una de las trazas. Se busca eliminar el ruido electrónico inherente de cada traza. Se utilizan algoritmos de filtrado en frecuencia, para eliminar las bandas de ruido de la señal medida. Entre los principales filtros de este tipo están:

- *Correcciones estáticas*: Correcciones debidas al cambio de topografía.
- *Ganancias*: Amplificación de la señal, para disminuir el efecto de la attenuación.
- *Pasa Banda*: Elimina una banda de ruido de cada uno de los registros.

3.2. Filtros longitudinales

Este tratamiento de la señal se aplica, en la dirección X (eje espacial), del Radagrama. El objetivo de estos filtros es la eliminación del ruido de fondo en la medición, ocasionado ge-

neralmente por la irregularidad del terreno (presente en unas cuantas trazas) o por reflectores externos (presente en casi todas las trazas). Los algoritmos utilizados son estadísticos y sus principales filtros son:

- *Stacking*: Lee el numero indicado de trazas y calcula el promedio, sustituyendo el original por este.
- *Eliminar traza promedio*: Calcula la traza promedio de todo el Radagrama y la resta a todas las trazas.
- *Eliminación de fondo*: Aplica horizontalmente un filtro pasa altas. Destaca solamente los puntos con un cambio muy fuerte en el Radagrama.

4. DETERMINACION DE ESPESORES EN PAVIMENTOS

4.1. Metodología

Tan solo, hace dos años se introdujo el uso de Georadares en la determinación de los espesores de las estructuras de los pavimentos como herramienta para determinar el deterioro vial y su periodo de mantenimiento; campo en el cual resulta muy práctico el uso de métodos no destructivos para llevar a cabo la medición de las mismas, de una manera rápida y sin ocasionar daños que en algunas ocasiones pueden ser el inicio de deterioros futuros.

Inicialmente es importante tener claro que las propiedades electromagnéticas de los materiales varían de acuerdo a las condiciones *in situ*, grado de compactación, humedad, composición química, condiciones atmosféricas, etc; por lo cual no es posible ubicarlos, en rangos que nos permitan definir sin ningún tipo de incertidumbre a que material corresponde el tipo de señal recibida.

Por lo anteriormente mencionado se realizan calibraciones antes de tomar las mediciones definitivas con el Georadar.

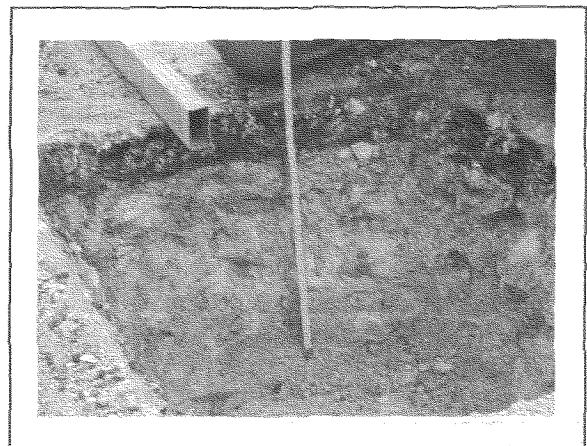


Figura 6. Apique de calibración, estructura asfáltica

Para la realización de las calibraciones se toman medidas con el Georadar, y posteriormente por intermedio de apiques o núcleos (Figura 6). De esta manera se miden los espesores de la estructura de pavimento de forma directa (*en campo*), y de forma indirecta (Georadar). Este proceso se repite cuantas veces sea necesario hasta llegar a una calibración que satisfaga las expectativas y necesidades de las mediciones futuras.

4.2. Levantamiento de la información

Para obtener los rendimientos adecuados en campo se adapta el equipo a un vehículo que lo arrastra sobre las vías a medir a velocidad baja (<10 km/h, depende en gran parte de la capacidad del equipo de adquisición de datos).

4.3. Resultados obtenidos

De la medición se obtienen perfiles continuos de las estructuras de pavimento, encontrando en ellos niveles constantes en amplitud de las trazas que conforman el radagrama (Figura 7); cada uno de estos niveles corresponde a una capa de la estructura. De igual manera se pueden presentar cambios significativos en las amplitudes que determinan posibles anomalías en la estructura y/o presencia de otros elementos en la misma.

El procesamiento de la información obtenida se realiza mediante el programa Reflex®, el cual tiene un módulo especializado para determinar espesores de capa. Para ello es necesario ubicar las amplitudes pico, y realizar un trazo sobre ellas, determinando el tiempo de retrospección de la onda. Reflex® permite aplicar diferentes velocidades a cada una de estas retrospecciones de acuerdo a las calibraciones realizadas, y con ello se genera un reporte final de espesores.

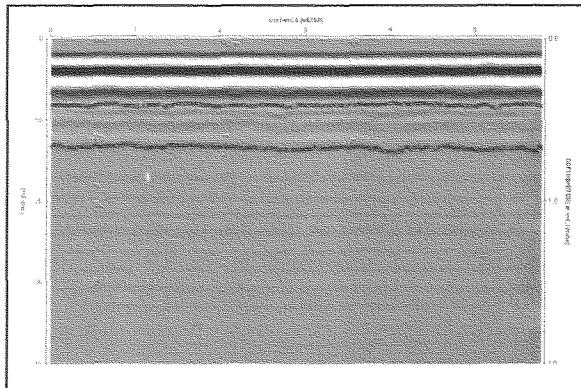


Figura 7. Determinación de capas de pavimento mediante REFLEX-W ®

5. DETECCIÓN DE REDES

La detección de tuberías es una de las aplicaciones mas extendidas del Georadar. Su aplicación es directa pues se tiene un elemento inmerso con propiedades electromagnéticas muy diferentes (concreto, PVC, Hierro colado, etc..) al del material huésped (suelo o material relleno). Para la realización de estos levantamientos de redes, el equipo es acondicionado en forma de carro portátil, para ser arrastrado en forma manual por el operario (Figura 8).

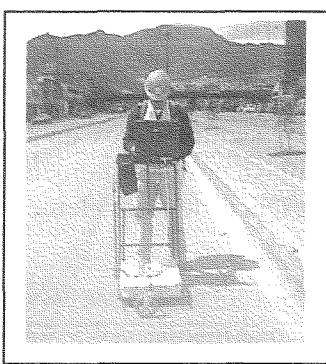


Figura 8.
RAMAC-X3M en operación sobre la
Avenida Calle 13 –
Bogotá

Cuando el Georadar pasa sobre un objeto de perfil circular, se presenta un efecto fácilmente apreciable sobre el Radagrama. Este efecto consiste en la generación de parábolas, que son proporcionales al diámetro de la tubería que se esta detectando.

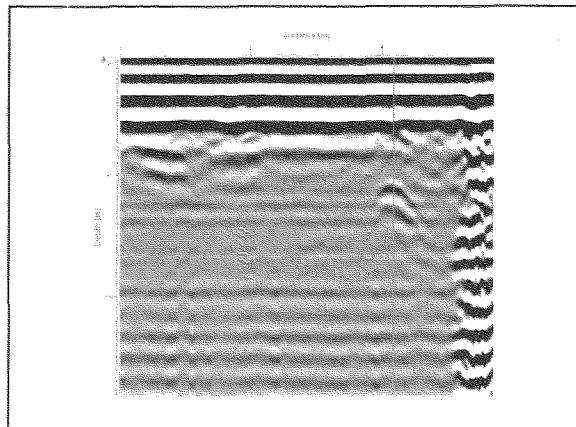


Figura 9. Tubería detectada Avenida Calle 13 –
Bogotá

5.1. Detección de redes clandestinas

Las redes clandestinas, son un importante factor de perdida , en los acueductos municipales. El problema de detectar estas irregularidades, es la necesidad de utilizar métodos destructivos y sus costos asociados, tanto en personal como en material. El uso del Georadar como método de inspección, presenta como principales ventajas el ser un ensayo no destructivo y una velocidad de medición alta.

La metodología propuesta, es la ejecución de un censo, ubicando a los posibles infractores, para luego realizar la inspección mediante Georadar. Se plantea la realización de dos mediciones por cada predio (antes y después del contador). El objetivo de estas dos mediciones, es el de cubrir la mayoría de las posibles formas de fraude y además tener un respaldo de la primera medición.

En la Figura 10 se puede observar un Radagrama típico de la medición de un predio. Se aprecia una tubería de 4in, que corresponde a una red de alimentación. A dos metros y medio se en-

cuentran dos reflexiones seguidas, de un diámetro no mayor a 1 in, lo cual indica la presencia de dos tuberías de alimentación para un solo predio.

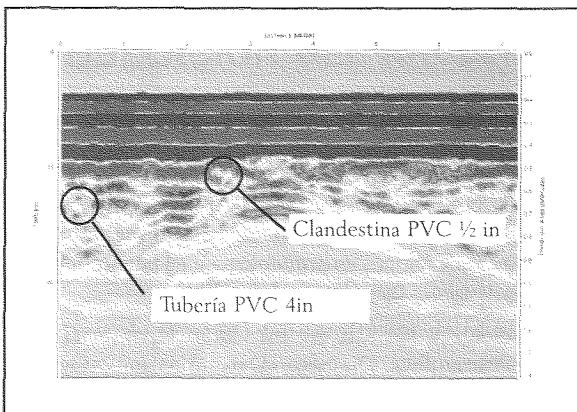


Figura 10. Detección de tuberías clandestinas, Barrio Quindío - Bogotá (REFLEX ®)

5.2. Levantamiento tridimensional de redes

La ciudad de Ibagué, presentaba hace unos pocos meses un índice de agua no facturada del orden 30%; para solucionar este problema, la alcaldía y la empresa de acueducto (IBAL), realizaron un levantamiento y monitoreo completo de la red de acueducto de la ciudad.

Uno de los puntos de estudio fue la planta de tratamiento de agua «LA POLA», planta construida a finales de la década de los 50's, ampliada y actualizada a mediados de los 70's y principios de los 90's. Los cambios realizados no fueron debidamente documentados, provocando un alto nivel de incertidumbre, frente a la distribución del líquido tratado. Al hacer un balance de masa a la entrada de la planta, contra la cantidad de líquido a la salida, se encontró una discrepancia importante. Por lo cual se planteo la necesidad de realizar un levantamiento de redes, y así verificar que estaba pasando con el agua no registrada.

La metodología que fue llevada a cabo, consistió en la generación de Radagramas, en cortes paralelos a una distancia fija (en este caso de 5 m). Para ello se realizó un levantamiento topo-

gráfico y se dividió en una cuadricula de 5 x 5 m, por donde luego se realizó la medición con el Georadar. A partir de los cortes medidos y de un trabajo de geofonía realizado anteriormente, se ubicó cada una de las tuberías y accesorios de la planta, con sus diámetros respectivos. Cada Radagrama se convirtió en un corte bidimensional y al hacer una interpolación de la tubería entre cada uno de estos cortes, se creó un levantamiento tridimensional de las tuberías ubicadas (Figura 11).

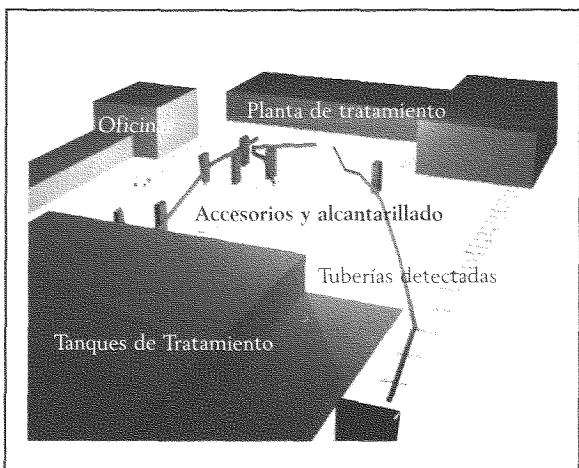


Figura 11. Levantamiento tridimensional de la Planta LA POLA - Ibagué

6. POSIBLES APLICACIONES

El uso de georadar para solucionar problemas en la ingeniería civil, es cada vez más extendido. La accesibilidad que estos equipos presentan, son cada vez mayores, pues los costos asociados disminuyen, además los desarrollos en hardware y software los hacen más eficientes en cuanto a manejo y análisis. A continuación se describen algunas aplicaciones de esta técnica.

6.1. Análisis estructural

Debido al alto contraste electromagnético entre el concreto y el acero, mediante un estudio de Georadar es posible determinar la estratificación y distribución de las varillas de refuerzo para cualquier estructura. De igual manera es posible determinar la existencia de grietas den-

tro de la estructura, debidas al proceso constructivo o desgaste del mismo.

6.2. Investigación sobre túneles

Una de las preocupaciones mas grandes en el mantenimiento de túneles es la ubicación de vacíos y zonas débiles (de espesor bajo), pues el progreso de estas puede provocar el colapso del túnel. El Georadar es una eficaz herramienta pues es capaz de determinar los vacíos, zonas de debilitamiento y otras heterogeneidades, antes que se conviertan en un serio problema.

6.3. Taludes y muros

El objetivo es la búsqueda de zonas débiles, vacíos y fallas no visibles en el exterior. Adicionalmente es posible determinar donde el incremento de humedad, puede iniciar un proceso de rápida degradación e incremento de empujes.

6.4. Estudio de suelos

Esta técnica puede ser usada como complemento a las exploraciones de campo, las cuales se realizan de manera puntual a muy altos costos. Realizando mediciones con el Georadar se obtiene una estratigrafía continua del perfil encontrando los cambios en el mismo que no pueden ser detectados por las perforaciones.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La técnica de GPR, es similar a la sísmica de reflexión, pues los fenómenos asociados con la propagación de la energía son básicamente los mismos.
- La selección del equipo (principalmente la antena) es de fundamental importancia, de acuerdo a las necesidades de resolución vs máxima penetración.
- El trabajo de campo y sus anotaciones, son la etapa de mayor cuidado en el momento de utilizar el Georadar.
- La técnica del Georadar, al igual que la mayoría de los ensayos geofísicos, necesitan te-

ner un nivel de información alto de la zona a medir, para poder descartar efectos o ruidos ya conocidos de los resultados finales.

- La alta heterogeneidad de las capas de subsuelo presentes en los medios de estudio, impiden al Georadar tener un alto contraste.

8. REFERENCIAS

- Gracia Pérez , Vega; «Radar de subsuelo, Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico»; Barcelona – Julio 2001.
- Sensors & Software inc. Ekko Update, «TIPS - Plastic Water Pipe Diameter Determination», October 2001
- K.J Sandmeir, «REFLEXW User Manual», Germany 2001
- Sensors & Software inc. «Ground Penetrating Radar, Survey Desing», 1999
- García García, Francisco; «Primeros Estudios de las Formaciones Sedimentarias Sumergidas de la Albufera de Valencia por Georadar», Valencia 2002
- Giannopoulos, Antonis; «GprMax2D model» <http://www.civ.ed.ac.uk/~agianno>
- IDS Ingegneria Dei Sistemi S.p.A; «Radar Investigation Realized on the Bridge « Regina Margherita » in Rome – Italy», 2000
- IDS Ingegneria Dei Sistemi S.p.A; «Search for Cavities and Detonators in the Grimsel Tunnels (Switzerland) - Snam Gas Pipeline Netherlands/ Italy», 1999
- «Geo-Radar & no Dig Technologies -Some Applications»; Complimentary data from INSET s.r.o., 1999

Paginas de Internet:

- <http://www.terraplus.com/sramac.htm>
- <http://www.malags.com>
- <http://www.g-p-r.com>