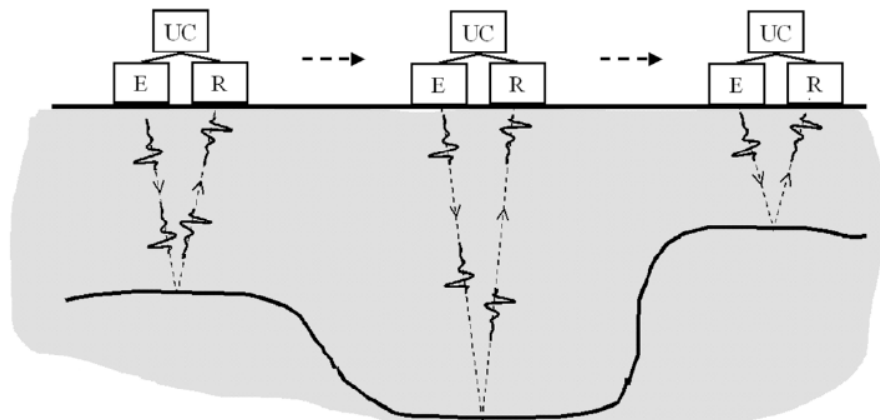


Georadar GPR (Ground Penetrating Radar)

1. Introducción.

El **radar de subsuelo** o **georadar GPR** es un método de prospección basado en la emisión y propagación de ondas electromagnéticas en un medio, con la posterior recepción de las reflexiones que se producen en sus discontinuidades. Estas discontinuidades son cambios bruscos de los parámetros electromagnéticos del subsuelo, es decir, de la conductividad, la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética. Los registros que se obtienen son similares a los obtenidos cuando se realizan estudios de sismica de reflexión, con la diferencia de que, en el caso del **Georadar (GPR)**, se trabaja con frecuencias mucho más altas y la emisión de pulsos se puede realizar muy rápidamente. Por este motivo, aunque se trata de registros puntuales (trazas) o **radargramas** pueden llegar a considerarse casi registros continuos.



La información que estos **radargramas** 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. La profundidad que se puede alcanzar depende tanto de las condiciones de medio analizado como del equipo utilizado.

Los **radargramas** también pueden aportar información si analizamos las amplitudes de los distintos eventos. Este parámetro y la velocidad dependen del medio y permiten caracterizarlo.

Se trata, simplificando mucho, de una técnica no destructiva que utiliza ondas electromagnéticas para determinar superficies reflectoras en el interior de los medios. El equipo consiste en un sistema de control (computadora) conectado a unas antenas que se desplazan sobre la superficie del medio que se desea analizar.

Estas antenas son las encargadas de emitir energía hacia el interior del medio y de registrar las ondas que provienen de las reflexiones producidas en las discontinuidades interiores.

El desarrollo que han experimentado las técnicas de prospección con **georadar GPR** ha ampliado los campos de aplicación abriendo las puertas a nuevos estudios y posibilidades. Debido al gran interés en los estudios superficiales altamente resolutivos del subsuelo este desarrollo se está realizando muy rápidamente. Las cada vez más numerosas aportaciones que se realizan en este campo contribuyen a este espectacular avance. Son muchos los ejemplos de estas aportaciones que van desde estudios de casos concretos hasta simulaciones por ordenador, pasando por ensayos experimentales y desarrollo de programas informáticos y de equipos.



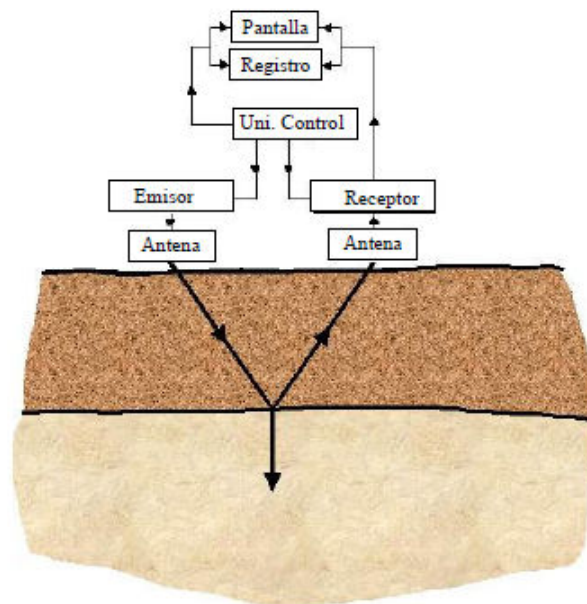
Los Georadares puede ser integrados con sensores GPS, desde uno de mano hasta aquellos más complejos de navegación cinemática satelital en tiempo real (GNSS-RTK). Para la mayoría de las aplicaciones, las posiciones GPS se registran constantemente mientras se hace el estudio topográfico. En terreno, o en la oficina, a medida que los puntos de interés son identificados, estos son registrados para consultas y pueden tener números y descripciones asignados. Estos puntos pueden ser exportados para su uso a hojas de cálculo, bases de datos, SIG y software de CAD.

Para ciertas aplicaciones especializadas tales como lagos y terrenos con topografía muy irregular, se utilizan receptores GNSS RTK de manera de Georeferenciar cada exploración realizada por el sistema con un mayor grado de precisión.



2. Componentes de un Sistema Georadar GPR.

Un sistema GPR se compone básicamente de una antena emisora, otra receptora, una unidad de control y un portátil para registrar y visualizar los perfiles



2.1 Unidad de control.

Su función principal es el control y la coordinación entre los diferentes elementos que forman el GPR. En primer lugar, la unidad central coordina entre la emisión de las ondas electromagnéticas y la recepción de las reflexiones a través las antenas correspondientes. En el caso de emisión de pulsos controlados por tiempo, este se controla mediante un reloj interno que puede discriminar hasta intervalos de $2 \cdot 10^{-5}$ s. Si la emisión se controla por distancia, la orden de disparo se controla mediante un odómetro. Como la duración del pulso se encuentra entre 1 y 10ns (para frecuencias de 1 GHz y 100 MHz), en cualquiera de los casos se puede decir que el sistema está casi todo su tiempo en silencio, a la espera de poder detectar las reflexiones del subsuelo, cuyo retraso es directamente proporcional a la profundidad del elemento reflector.

El proceso de recepción de señales es algo más complejo, ya que los circuitos electrónicos receptores no son suficientemente rápidos como para poder registrar, en unos cuantos ns, la historia de las reflexiones. De modo que es necesario, para reconstruir la señal, recurrir a una técnica de muestreo.

La unidad central, en los primeros sistemas, permitía visualizar los impulsos en tiempo real, bien mediante un osciloscopio que llevaban incorporado, o bien mediante el envío de la señal al monitor del propio GPR. En los sistemas GPR más recientes, la unidad central digitaliza los impulsos recibidos de la antena receptora y se transfiere a un portátil a través el puerto paralelo (ECP) mediante un cable de comunicación estándar.

Este proceso se produce al mismo tiempo que se realizan los registros de campo. Los datos se visualizan con un programa de control y procesamiento especial para cada modelo de GPR. En general, los programas de GPR permiten controlar los principales parámetros de la configuración de adquisición de los registros radar (tipo de antena usada, ventana de tiempo del registro, frecuencia de muestreo, intervalo entre cada traza, número de apilamiento, etc.). Estos parámetros se eligen en función de la resolución y profundidad de investigación deseados. Los programas disponen también de una serie de herramientas para el tratamiento de datos, filtros, amplificación y corrección de señales.

Además de los programas básicos hay programas específicos para realizar un procesamiento e interpretación más eficaz de los perfiles GPR.

2.2 Elemento de Antenas.

Las antenas son una parte fundamental del equipo ya que son los elementos encargados tanto de emitir el pulso electromagnético como de recibir la energía reflejada. Se conectan con la unidad de control mediante un cableado que puede ser metálico u óptico. Este último tipo de cableado es el más adecuado para antenas de baja frecuencia (por debajo de los 100MHz), ya que el cableado metálico genera corrientes parásitas que se manifiestan en la señal como ruido electrónico de fondo. Las antenas se utilizan para realizar dos funciones básicas en la prospección con GPR: deben irradiar la energía que se les suministra en forma de potencia, con la direccionalidad y las características adecuadas a la aplicación pensada, y deben captar la parte de la energía reflejada. La capacidad de direccionalidad de las antenas es fundamental, por cuanto permite mejorar la relación señal/ruido y obtener registros nítidos con un rango más elevado (mayor profundidad de estudio).

En general las antenas se pueden definir en dos modos: monoestático y biestático. En el modo monoestático el emisor y receptor se encuentran a distancia fija. Pueden diferenciarse dos tipos: antenas de conmutación y antenas con dos dipolos. Las primeras tienen una única espira (o dipolo) que actúa como emisor y receptor de energía. Para ello se incluye un conmutador que va modificando su actuación. Al inicio de cada traza, la antena funciona emitiendo el pulso de energía de corta duración, pasando inmediatamente a funcionar como receptora (Pérez, G. V., 2001). Tras un tiempo de recepción, que varía de un tipo de antena a otra, vuelve a conmutar la función. En la antena con dos dipolos el primero actúa como emisor, mientras que el otro actúa como receptor. La separación de los dipolos es constante y se desplazan juntos dentro de la misma carcasa que cubre Principios y aplicación del GPR en ecología, geotécnica y arqueología.

Las antenas monoestáticas permiten realizar con facilidad perfiles, siendo utilizadas en trabajos que requieren mayor rapidez, un número elevado de perfiles o una estructura de malla para poder analizar el medio, es decir, agrupaciones de perfiles paralelos y cruzados. El principal problema que presenta esta configuración se debe a las reflexiones múltiples y por lo tanto la repetición del patrón del objeto.

En el modo de antena biestática se puede variar la distancia de separación entre los dipolos emisor y receptor. Esta característica permite calcular velocidades aparentes de propagación de la onda, utilizando técnicas iguales a las que se emplean en prospección sísmica, con estudios de punto medio común (“CMP”). También se utilizan estas antenas para estudios puntuales, obteniendo una traza en cada punto de estudio. Su resolución en superficie es menor con respecto a la configuración monostática.

3. Beneficios de los Sistemas Georadares GPR.

A partir de las definiciones y descripciones anteriores podemos destacar algunos beneficios de la tecnología GPR.

- **No Destructivo:** las ondas de frecuencia no causan ningún daño en el subsuelo, el medio ambiente o la gente de los alrededores.
- **Sin perturbaciones:** Hace poco ruido y no molesta a las personas circundantes durante su uso.
- **Fácil de implementar:** Múltiples opciones de tamaño que son fáciles de usar, se puede almacenar, mover y utilizar en casi cualquier lugar con pocas limitaciones.
- **Robusto:** Materiales resistentes diseñados para soportar las condiciones cotidianas asociadas a sus aplicaciones adecuadas.
- **Una mejora a los métodos anteriores:** similar a tener una trinchera de prueba o perforación a lo largo de toda la longitud del proyecto sin la excavación innecesaria.
- **Elimina los residuos:** Señala áreas para realizar pozos de prueba o perforaciones de muestra en lugar de utilizar el método SWAG, minimizando datos inútiles o engañosos.

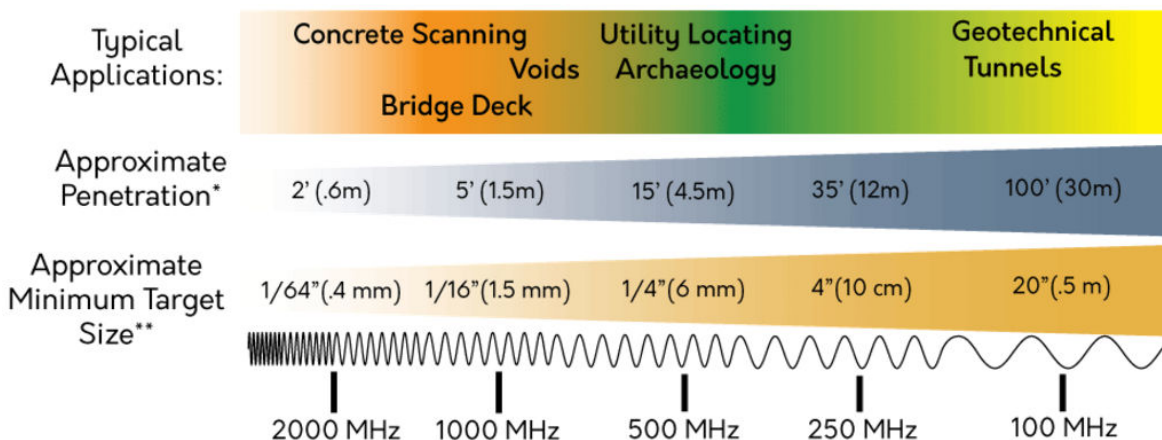
4. Criterios de selección para Sistemas Georadares GPR.

La elección de un sistema Georadar de penetración terrestre (GPR) depende en gran medida en que tan profundo necesitamos detectar objetos. En este punto, entre menor sea la frecuencia de las antenas, mayor es la profundidad de detección. En cambio, mientras mayor sea la frecuencia, mayor es la resolución de detección, es decir, el nivel de detalle del análisis.

En cuanto a los sistemas existentes en el mercado, los sistemas Georadar ofrecen distintos modelos tanto como sistemas de frecuencias individuales como sistemas de frecuencia múltiple. Sin embargo, es importante hacer notar que mientras más frecuencias se se puedan utilizar, más perspectivas de aplicación se tienen de forma de poder garantizar la óptima interpretación de los datos.

Los tipos de sistemas GPR Todo-en-uno son un tipo de solución que presenta una buena relación costo/beneficio para la mayoría de los usuarios finales. Los sistemas todo-en-uno también son más maniobrables y fáciles de usar. Las diversas opciones de software hacen posible que el uso de estas unidades sea tan simple como encender y avanzar, sin embargo, también mantiene diversas opciones y capacidades específicas para los usuarios más avanzados, en especial para aquellos que buscan mayores capacidades y opciones para interpretación de datos complejos.

Con el objeto de poder mostrar una relación de la frecuencia relacionado con los distintos tipos de aplicación, a continuación se adjunta una gráfica que despliega la relación de frecuencia y tipo de detección según profundidad.



5. Aplicaciones de los Sistemas Georadares GPR.

Debido al principio de operación de los Sistemas GPR, existen diversos campos de aplicación de esta tecnología en los cuales el Sistema Georadar puede aportar importantes resultados para los objetivos finales que buscan los distintos campos de aplicación. A continuación se describen algunos de ellos. Las evaluaciones precisas utilizando [Georadar](#) permiten un uso más eficiente del espacio, el tiempo y los recursos. Es menos invasivo en el sentido que puede localizar tuberías y servir como una poderosa ayuda visual en el diagnóstico sin necesidad de excavar, hacer sondeos o perforación de cualquier tipo.

5.1 Detección de servicios públicos.

En este tipo de aplicaciones los sistemas GPR pueden detectar los siguientes tipos de objetos:

- TUBOS DE ARCILLA
- TUBOS DE PLÁSTICO O PVC
- TUBOS DE HORMIGÓN
- TUBOS TRANSITE
- TUBOS METÁLICOS
- CONDUCTOS CABLES
- POZOS (MANHOLES)
- CAJAS DE AGUA
- CONEXIONES ILEGALES O DESCONOCIDAS
- LÍNEAS DE FIBRA ÓPTICA
- VÁLVULAS DESAPARECIDAS

5.2 Evaluación estructural.

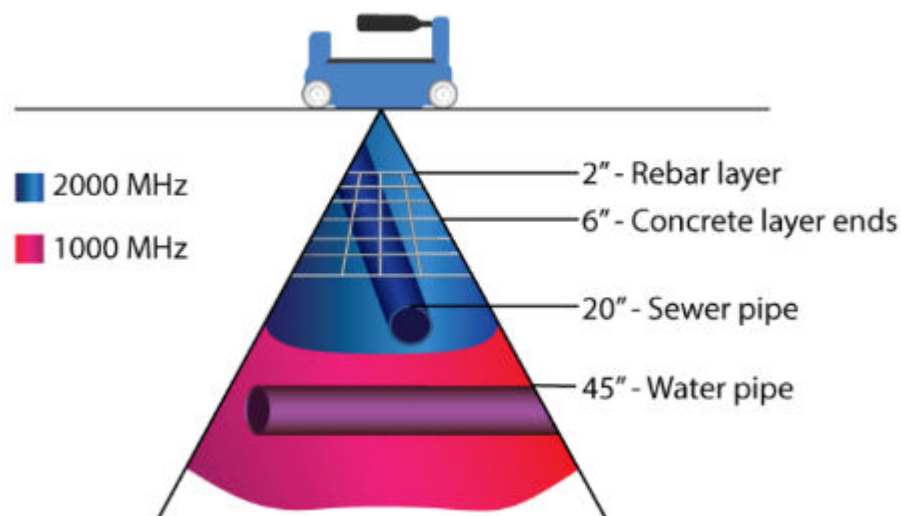
En este tipo de aplicaciones los sistemas GPR pueden detectar los siguientes tipos de objetos:

- REFUERZOS
- AGRIETAMIENTOS
- VACIOS
- INFILTRACIONES DE AGUA
- ESPESOR DE LOSA O PARED
- ESPESOR DE ASFALTO

Las estructuras, tanto nuevas como antiguas necesitan una amplia variedad de rangos de frecuencias de Georadar para evaluar daños y la integridad en un número de diferentes resoluciones.

Si se desea llegar a mayores profundidades, se deberán usar frecuencias más bajas. Profundidades más cortas pueden significar frecuencias más altas para una mayor resolución, lo que significa un mayor nivel de detalle en los datos de radar. Una combinación de frecuencias es la mejor opción, ya que ofrece detalle en la resolución y profundidad. Una frecuencia le dará un conjunto de datos, dos frecuencias le dará dos conjuntos de datos, y así sucesivamente. Más frecuencias le permiten interpretar con mayor precisión la información que el dispositivo de imágenes del subsuelo le entrega.

Un ejemplo de ello es el escaneo del hormigón, que a menudo utilizan frecuencias altas (típicamente alrededor de 2000 MHz) para tomar imágenes de alta resolución. La mayoría de los escáneres de concreto no van más allá de la capa inicial de hormigón.



En el análisis de la cubierta de los puentes, el Georadar es reconocido como la opción no destructiva más rápida en la inspección y análisis de los tableros de puentes. Es una herramienta útil como un vistazo inicial sobre qué tipo de daños necesitarán remediación. La corrosión y la degradación de las barras de refuerzo de hormigón se pueden observar con exploraciones de Georadar, y estos hallazgos pueden ser refinados y confirmados con análisis adicionales tales como los ensayos de concentraciones de iones cloruro y la extracción de muestras de núcleo. Sin Georadar, los ingenieros a menudo no saben por dónde empezar la perforación o corte en el primer lugar. Usualmente el deterioro de las barras de refuerzo es el indicador más común de los puntos de tensión en el puente que necesitan ser reparados. Los datos del Georadar permite visualizar el deterioro de estos puntos en contraste con las barras de refuerzo sustancialmente intactas. Más allá del sonido percusivo y cadena de arrastre, el Georadar se puede utilizar para evaluar más específicamente en que zona de las barras de refuerzo se necesita tomar una mayor

atención y para planificar la sustitución de las barras de refuerzo y el hormigón correctamente.

5.3 Aplicaciones arqueológicas.

El proceso de muestreo y excavación suele ocupar mucho tiempo y ser costoso. En la Arqueología, más que en ninguna otra de las actividades para las que se utiliza el Georadar, uno debe ser crítico de los datos entregados por los instrumentos y se debe tener en cuenta una serie de condiciones para excavar en busca de artefactos y huesos. En segundo lugar, sin la articulación de formas en los datos subterráneos, uno no puede estar seguro de qué es exactamente lo que pueden encontrar cuando cavan. Aquí es donde el Georadar hace el trabajo por un arqueólogo que necesita datos sólidos, interpretables y que se pueden presentar en una variedad de maneras para poder asegurar una perspectiva cultivada.

En este tipo de aplicaciones los sistemas GPR pueden detectar los siguientes tipos de objetos:

- LOCALIZACIÓN DE ARTEFACTOS
- MAPEO DE ESTRUCTURAS
- ESTUDIOS DE TUMBAS

5.4 Aplicaciones medio ambientales.

Ya que el Georadar proporciona a los científicos una imagen de lo que hay debajo de la superficie de la Tierra, esta tecnología puede desempeñar un papel importante en la protección de nuestro medio ambiente para las generaciones futuras.

Una de las aplicaciones más importantes de Georadar es la ubicación de las amenazas que potencialmente podrían causar efectos perjudiciales sobre el medio ambiente y las especies vulnerables de plantas y animales.

En este tipo de aplicaciones los sistemas GPR pueden detectar los siguientes tipos de objetos:

- TAMBORES ENTERRADOS
- LÍMITES DE RELLENOS SANITARIOS
- LÍMITES DE ESCOMBROS
- NIVELES ALTOS DE SATURACIÓN

5.5 Aplicaciones humanitarias y militares.

En este tipo de aplicaciones los sistemas GPR pueden detectar los siguientes tipos de objetos:

- MINAS TERRESTRES
- EXPLOSIVOS ENTERRADOS
- BUNKERS
- TÚNELES
- CAJAS CON ARMAS.

5.6 Aplicaciones para geotecnia.

En este tipo de aplicaciones los sistemas GPR pueden detectar los siguientes tipos de objetos:

- CAPAS DE ESTRATOS
- AGUA SUBTERRÁNEA
- MASA DE RAICES
- SUELO PERTURBADO
- MADERA ENTERRADA
- BEDROCK
- ROCAS
- CAMBIOS EN LA DENSIDAD
- REEMPLAZO DE RELLENOS

5.7 Aplicaciones para usos policiales.

En este tipo de aplicaciones los sistemas GPR pueden detectar los siguientes tipos de objetos:

- CONTRABANDO
- UBICACIÓN DE OBJETOS OCULTOS EN PAREDES
- OBJETOS ENTERRADOS

- INVESTIGACIÓN FORENSE

6. Planificación de un estudio topográfico con Georadares GPR.

Hay tres aspectos importantes de destacar para una topografía con Georadar GPR, cuya selección depende de los resultados deseados y si se requieren resultados en tiempo real o si se desea un procesamiento posterior a la ejecución de mediciones.

Si el objetivo es identificar uno o más objetivos, la manera más fácil de lograrlo es examinar el sitio a ser estudiado buscando cualquier pista como arquetas, sumideros, válvulas, etc. Si los hay, estos pueden servir como un excelente punto de partida para la investigación. Típicamente con este método, se movería el radar a través del medio que es investigado hasta detectar el objeto en la pantalla, Luego la idea es determinar el centro exacto del objeto y marcarlo en el suelo o registrar las coordenadas GPS del punto. Logrado esto, se podría mover por sobre este objeto y repetir este proceso esencialmente rastreando el objetivo. Este método se recomienda para resultados en tiempo real.

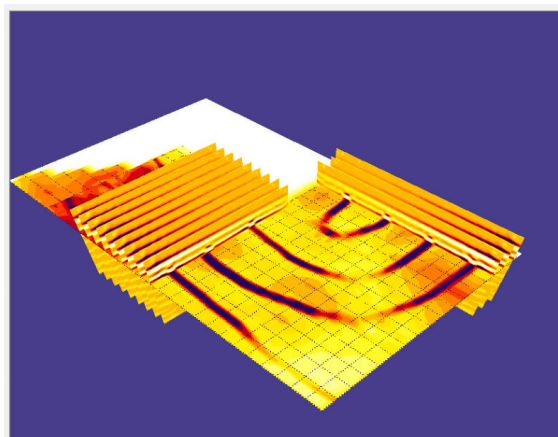


Un “mark out” se logra generalmente mediante el escaneo de un sitio en un patrón de rejilla. Cuando se observa un objetivo, el operador coloca una marca en el suelo. Esto es por lo general en la forma de una marca de pintura de spray u otro símbolo distintivo. Dado que los datos del radar solamente revelan que un objetivo que se encuentra en la tierra tiene una composición diferente que el material circundante, no es posible en una sola pasada poder determinar si el objetivo es una roca, tubería u otro tipo de objetivo. La forma más fácil de diferenciarlos es hacer otro pase y ver si el objetivo continúa o no. Uno puede elegir entre poner marcas en cada objetivo y conectar los puntos más adelante o inmediatamente moverse y hacer otro pasada por el objetivo para determinar si es lineal o no.



Los datos 3D pueden ser útiles para sitios más complejos con muchos objetivos. La generación de los datos 3D requiere que los datos se recopilen en una malla regular en direcciones perpendiculares y también por lo general requiere un cierto grado de post-procesamiento. La cantidad de datos para post-procesamiento requerido aumenta a medida que la uniformidad del medio siendo investigado disminuye. Además, existe una correlación práctica entre la uniformidad del medio siendo investigado y la claridad de las imágenes que se puede esperar sean producidas a través de post-procesamiento. Además, las presentaciones 3D utilizables por lo general requieren que los datos sean obtenidos en una cuadrícula mucho más densa que lo que es necesario con la presentación de datos 2D.

En muchos casos, el número de líneas del estudio se duplica o cuadruplica. Por estas razones, los datos 3D tiende a ser utilizados con más frecuencia en los estudios topográficos de menor escala de pisos de concreto y paredes, más que en estudios de campo a gran escala.



6. Aspectos de seguridad en el uso de Georadares GPR.

Las emisiones electromagnéticas de los sistemas de Georadar GPR en los distintos fabricantes no constituyen un peligro para la seguridad o salud en condiciones normales de operación. Las emisiones normalmente están muy por debajo de 10 mW / cm² (100 W / m²) nivel especificado por la United States Occupational Safety and Health Administration (OSHA) y las regulaciones similares en otras jurisdicciones. A continuación se muestran los datos de la densidad de poder promedio a 50 mm:

Frecuencia de Antena [MHz]	Densidad de poder promedio [W/m ² @ 5cm]	Especificación de Seguridad (OSHA) [W/m ²]
100	< 0.001	100
250	< 0.001	100
400	< 0.001	100
500	< 0.001	100
900	< 0.001	100
1000	< 0.001	100
2000	< 0.001	100