

USO DEL GEORRADAR EN APLICACIONES MILITARES: CASO PARTICULAR DE DETECCIÓN DE TÚNELES SUBTERRÁNEOS

Xavier NÚÑEZ NIETO
Ingeniero y profesor
Centro Universitario de la Defensa
Escuela Naval Militar de Marín

Mercedes SOLLÁ CARRACELAS
Doctora y profesora
Centro Universitario de la Defensa
Escuela Naval Militar de Marín

Henrique LORENZO CIMADEVILA
Doctor y profesor en la Universidad de Vigo
Departamento de Ingeniería de los Recursos
Naturales y Medioambiente

Alexandre NOVO LAMOSO
Doctor y Geosystems Business Manager
at IDS North America/GPR Division, Canadá

Introducción



A técnica del georradar o radar de subsuelo, internacionalmente conocido como GPR, se puede considerar una técnica de teledetección cercana y prospección relativamente reciente, a pesar de que la teoría que rige sus principios de su funcionamiento fue desarrollada ya a finales del siglo XIX. La carencia de medios tecnológicos de la época ralentizó su desarrollo y popularización, desde que J. C. Maxwell y H. R. Hertz enunciaron las leyes físicas que explican el fenómeno de transmisión de las ondas electromagnéticas a través de los medios. No sería hasta 1935 cuando Sir Robert Wattson-Watt, considerado por muchos como el padre del radar, propusiese y demostrase el funcionamiento de su radar de tierra, que posteriormente desarrollaría junto al radar aerotransportado, convirtiéndose en un sistema militar defensivo muy eficaz para el seguimiento de bombarderos durante la Segunda Guerra Mundial. Posteriormente el estudio del georradar cayó en un cierto olvido hasta la década de los 50, cuando un accidente aéreo, el incidente *Lost Squadron* (1942), causado por no detectar una capa de hielo, despertó nueva-

mente el interés de los científicos en la aplicación del radar como metodología prospectiva del subsuelo. A partir de los años 70 comienza el despeje de la popularidad del radar de penetración terrestre, llevándose a cabo los primeros estudios en investigaciones lunares, Geología y Glaciología (se realizan, entre otras, prospecciones con radar a bordo de helicópteros, como el modelo militar ruso *MI-8*, para el estudio de suelos glaciales), y de ahí se produce el salto al campo de la Ingeniería Civil (1970-1990). En las últimas décadas del siglo XX, paralelamente al rápido crecimiento de la informática y las nuevas tecnologías de la comunicación, se diseñan y fabrican los primeros equipos modernos, que posteriormente se han ido desarrollando y mejorando hasta alcanzar los avanzados sistemas de prospección GPR de que disponemos hoy en día.

En la actualidad, la aplicación del georradar como técnica no destructiva se presenta como una metodología prospectiva ampliamente reconocida dada su idoneidad en diversos campos de estudio: Arqueología, Geología, Glaciología, Hidrología e Ingeniería Civil. Asimismo, resulta de interés destacar, atendiendo a un punto de vista militar, que a los diversos sectores anteriormente mencionados se suma también la aplicación del radar de subsuelo al concepto de Seguridad y Defensa, que a su vez incluye: detección de minas y UXO (munición no explotada), localización y caracterización de túneles, galerías, pasadizos, trincheras y zulos subterráneos, rescate de seres vivos en zonas catastróficas, así como aplicaciones forenses.

Uno de los campos en que más ha evolucionado la técnica es en la detección de minas y explosivos enterrados. Para ello, existen organizaciones militares, universidades, organizaciones de desarrollo industrial y tecnológico, además de compañías privadas, que han desarrollado programas específicos de investigación y desarrollo, tales como el International Advanced Robotics Programme (IARP) para el diseño de vehículos exclusivos focalizados en el problema del desminado humanitario (1) (2). Entre los robots de desminado que incluyen sensores GPR de detección se encuentran el Mine Hunter Vehicle y el ALIS —ambos realizados por la Universidad de Tohoku—, el FORE-SIGHT (Canadá), el Geocenter Radar System (USA), el NIITEK GPR (USA) y el MINDER Mine Detection System (UK).

En este trabajo se presentan algunos de los principios básicos del método, junto con las ventajas, limitaciones y aplicabilidad del mismo. Para ilustrarlo se ha incorporado un caso de estudio de detección de túneles subterráneos,

(1) ARMADA, M.; FERNÁNDEZ, R.; MONTES, H.; SARRIA, J.; SALINAS, C.: *Robots móviles para tareas de desminado humanitario*. Centro de Automática y Robótica CAR, Universidad Tecnológica de Panamá, 2013.

(2) DANIELS, D.: «A review of GPR for landmine detection». *Sensing and Imaging: An International Journal*, vol. 7, núm. 3, 2006.

que incluye la localización y caracterización geométrica, además del empleo de técnicas de visualización 3D para una mejor comprensión del espacio ocupado.

Fundamentos del georradar y aplicabilidad

El georradar es una técnica no destructiva orientada al estudio del subsuelo superficial y que se fundamenta en la capacidad de las ondas de radar de baja frecuencia (10 MHz-2,5 GHz) para propagarse a través de medios poco conductivos. El método emplea una antena emisora para dirigir pulsos electromagnéticos de 1-20 ns de duración hacia el interior del terreno. Este frente de ondas es parcialmente reflejado al encontrar una discontinuidad o un cambio de material en el subsuelo, pudiendo ser detectado en la superficie mediante una antena receptora dispuesta a tal efecto. Al ir desplazando el sistema sobre la superficie del terreno será posible registrar la historia de reflexiones detectadas en el subsuelo bajo la línea de desplazamiento del equipo. De esta forma se obtienen los llamados radargramas, similares a los registros clásicos de sismica de reflexión, pero con la gran diferencia de que, en el caso del radar, la propagación de las ondas está condicionada por las características electromagnéticas del medio de propagación.

Las antenas GPR han sido diseñadas para emitir un pulso de muy corta duración con el fin de mejorar la resolución vertical del método. Habitualmente este pulso está constituido por $1\frac{1}{2}$ -2 períodos de la frecuencia nominal que caracteriza la antena. Su corta duración en el dominio de los tiempos (Dt) lleva asociado un aumento inversamente proporcional de la aportación de sus componentes frecuenciales (Df) según la relación $Dt=1/Df$. Así, la mayor parte de las antenas GPR han sido diseñadas

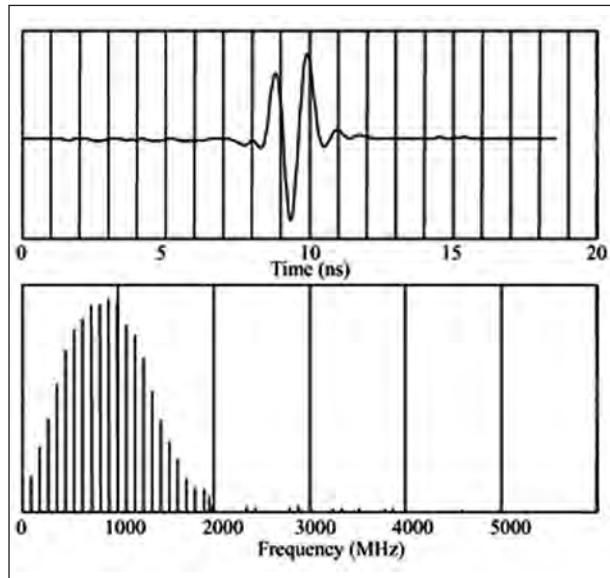


Figura 1. Forma de la señal (arriba) y espectro (abajo) del impulso generado por una antena de georradar de 900 MHz.

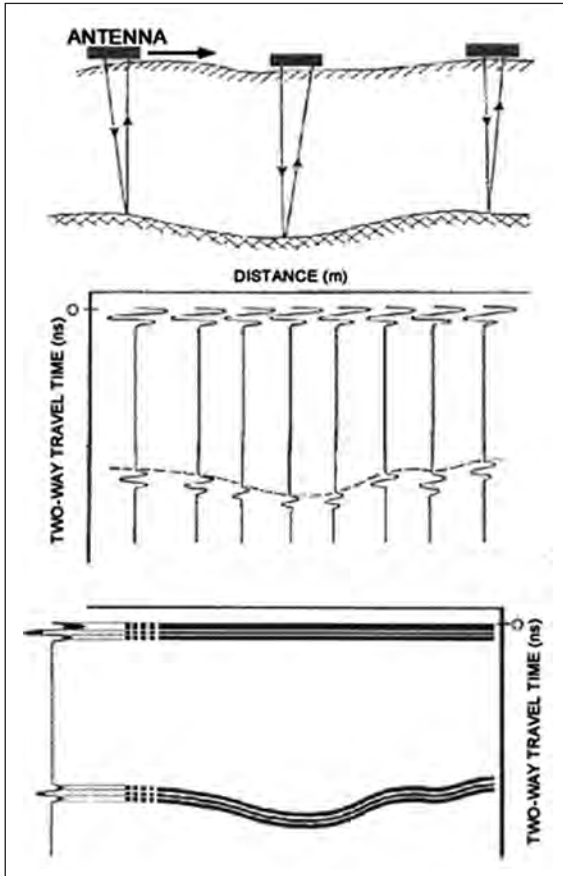


Figura 2. Proceso de adquisición (arriba), radargrama en formato *wiggle* (centro) y formato *line scan* (abajo).

amiento de la antena. De esta forma, el eje de abscisas de los radargramas, o registros de georradar, representará el movimiento de la antena en una determinada dirección, mientras que el eje de ordenadas muestra el tiempo de retardo (*twt*) entre la emisión del pulso y la detección de las reflexiones en la superficie por parte de una antena receptora, siendo este, por lo tanto, un viaje de ida y vuelta, tal y como se escenifica en la figura 2.

para operar con un ancho de banda similar a su frecuencia central y una duración inversamente proporcional a su centro de frecuencias. En la figura 1 se muestran tanto la forma de la señal como el espectro del impulso generado por una antena de 900 MHz (frecuencia central o nominal). Una descripción pormenorizada de las características de las señales GPR puede encontrarse en los trabajos de Annan (2003) (3) y Daniels (2004) (4).

La adquisición de datos con el georradar suele realizarse orientando la antena hacia el subsuelo y registrando las reflexiones detectadas tras la emisión del impulso electromagnético, obteniendo así una traza. Al desplazar la antena sobre la superficie del terreno se irá detectando y almacenando el conjunto de reflexiones existentes bajo la línea de desplaza-

(3) ANNAN, A. P.: *Ground Penetrating Radar: Principles, Procedures & Applications*. Sensors & Software Inc, Mississauga, 2003.

(4) DANIELS, D.: *Ground Penetrating Radar*, 2.ª edición. IEE, Londres, 2004.

Si la velocidad (v) de propagación de las ondas en el medio es conocida, el eje temporal de ordenadas puede ser transformado a profundidades (z) a través de la simple relación $z = v \cdot twt/2$.

Como se ha comentado, la antena emisora genera un impulso de corta duración que es transmitido al terreno; mientras tanto, la antena receptora permanece activa tratando de detectar la energía reflejada en los elementos presentes en el subsuelo. La técnica es, en principio, similar a la del sónar o a los métodos de sísmica de reflexión —salvo el empleo de ondas electromagnéticas—, y en ocasiones los usuarios prefieren interpretar los radargramas con la misma apariencia de los perfiles sísmicos (*wiggle plot*). La velocidad de procesamiento de los sistemas radar permiten almacenar muchos más datos que los métodos sísmicos, que deben ser considerados puntuales. Los equipos de georradar disponen de relojes internos de 50-100 KHz que les permiten procesar gran cantidad de pulsos, con los cuales generan varias trazas por segundo. Por este motivo, si la antena se desplaza a baja velocidad es preferible transformar las trazas individuales en un formato de áreas de barrido (*line scan*), el cual ofrece una sensación de continuidad que facilita la interpretación, tal y como se ha mostrado en la figura 2.

Cuando el pulso emitido detecta una discontinuidad electromagnética (por ejemplo, un cambio en las propiedades del medio de propagación o una capa de material diferente), parte de la energía es reflejada de vuelta, mientras que el resto continúa su camino a través del nuevo medio. La energía reflejada en la interfaz de dos medios depende del contraste entre sus impedancias. Así pues, para garantizar la obtención de buenos resultados al aplicar la técnica en un determinado entorno será necesario que se den, de forma simultánea, los siguientes factores: que exista suficiente contraste electromagnético entre ambos medios y, sobre todo, que el medio de propagación sea suficientemente resistivo para no atenuar dramáticamente la señal emitida. Estos medios poco conductivos son los susceptibles de ser estudiados mediante la técnica del georradar. Por lo tanto, la naturaleza del suelo juega un factor decisivo en ese aspecto, ya que los medios conductivos (por ejemplo, arcillas húmedas) pueden llegar a atenuar totalmente la señal, haciendo inútil la aplicación del método.

Algunas de las aplicaciones más comunes dentro del ámbito militar donde el georradar ha demostrado ser una técnica de gran utilidad son: detección de minas y explosivos enterrados, detección de plumas de contaminación, localización de bidones y/o depósitos enterrados, localización de estructuras enterradas, posicionamiento de túneles y/o galerías subterráneas, control de pavimento en firmes e integridad de pistas de aterrizaje, patologías en la construcción, batimetrías en agua dulce, etcétera.

Caso de aplicación: detección de túneles subterráneos

Descripción

Se hizo una prospección con georradar en las instalaciones de la Escuela Naval Militar de Marín, en una zona donde se conoce la existencia de un túnel subterráneo. El túnel, de geometría simétrica, consta de un pasillo central y ramificaciones laterales (figura 3A), con una trifurcación hacia el final del mismo (figura 3B). Se trata de una construcción antigua de hormigón en la que se han observado problemas de humedad y condensación (figura 3C), que pueden deberse al mal estado de las conducciones de agua que transcurren por el interior del mismo.



Figura 3. Imágenes detalle del túnel: A) Pasillo central y ramificaciones laterales; B) Trifurcación al final del túnel central, y C) Evidencias de condensación en el interior de una de las ramificaciones laterales.

Método y metodología de trabajo

Para llevar a cabo el estudio georradar se utilizó un sistema RAMAC/GPR de la compañía Malå Geoscience. Se empleó una antena apantallada de 500 MHz, estableciéndose, como parámetros de ajuste para la toma de datos, una distancia entre trazas de 20 cm, una ventana de tiempos (tiempo de retardo) de 75 ns y 512 muestras por traza. El equipo se mueve sobre un carro adaptado y equipado con una rueda taquimétrica (odómetro) que proporciona la distancia entre trazas para generar el impulso, e informa, además, de la longitud total de los perfiles radar producidos.

Para una mejor interpretación y visualización de los datos obtenidos se han considerado metodologías de adquisición y procesamiento en tres dimensiones (3D). Para ello, se realizaron perfiles paralelos en dirección X a lo largo de toda la zona de estudio, con un espaciado entre perfiles de 20 cm. La malla prospectada final correspondió a un rectángulo de 20 x 40 m (figura 4A), con una profundidad de propagación de la señal de aproximadamente cinco metros en aire.



Figura 4. A) Zona a prospectar, y B) Equipo georadar utilizado y componentes: unidad de control, antena apantallada de 500 MHz (emisor y receptor), portátil y rueda taquimétrica (odómetro).

Un sistema de georadar está constituido, esencialmente, por los componentes que pueden observarse en la figura 4B. Las antenas, que operan en modo biestático (una antena emite y la otra recibe), están situadas dentro de una estructura apantallada. En cada antena está situado un transductor que es el encargado de interpretar las órdenes de emisión-recepción que le llegan de la unidad de control a través de fibra óptica. Las antenas de un sistema son intercambiables y deben seleccionarse en función de la profundidad deseada para la prospección y de la resolución demandada. Para alta penetración (10-30 m) se utilizan antenas de 50-200 MHz; para estudios de los primeros 3-5 m del subsuelo se emplean antenas de 500 MHz, que proporcionan un buen compromiso entre penetración y resolución; en estudios de alta resolución se emplean antenas de alta frecuencia (800 MHz-1.5 GHz) que difícilmente penetran más allá de un metro, pero permiten localizar elementos centimétricos.

La unidad de control es el corazón del sistema desde la que se configura la adquisición de datos, se gestionan las antenas y se da salida a los datos adquiridos. Por regla general, la unidad se configura mediante un *software* instalado en un ordenador portátil, el cual sirve, además, para almacenar la información y para visualizarla en tiempo real.

Resultados georadar

La figura 5 muestra el modelo GPR 3D generado, que nos permite identificar la estructura interna del túnel. Este procesado 3D permite la extracción de perfiles 2D en ambas direcciones, longitudinal y transversal, con el fin de

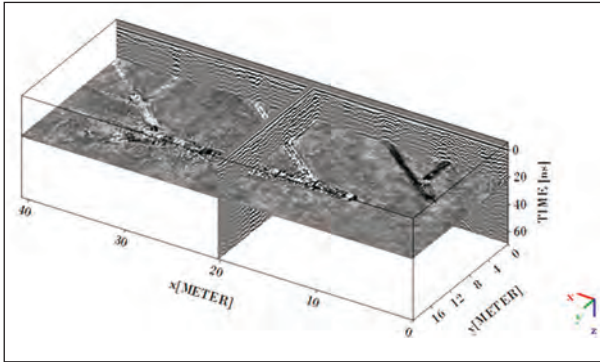


Figura 5. Modelo GPR 3D generado con el *software* ReflexW: *time-slice* a 3.5 m de profundidad, mostrando la distribución estructural interna del túnel.

mejorar y comprender las correlaciones espaciales entre los distintos elementos estructurales en profundidad. Observando la *time-slice*, o corte horizontal, generado a 3.5 m de profundidad de la figura 5 se pueden identificar la galería central, ramificaciones laterales y trifurcación al final del pasillo central. Sin embargo, aunque el túnel presenta una

geometría simétrica en cuanto a ramificaciones laterales, tal y como se ha visto en la figura 3A, no se observan las ramificaciones de uno de los laterales del mismo, excepto la que corresponde a la trifurcación. Esto se puede deber a una mayor acumulación de humedad en esa zona, según lo anteriormente citado en el apartado de descripción (figura 3C), que produce una atenuación de la señal electromagnética y consecuente pérdida de información.

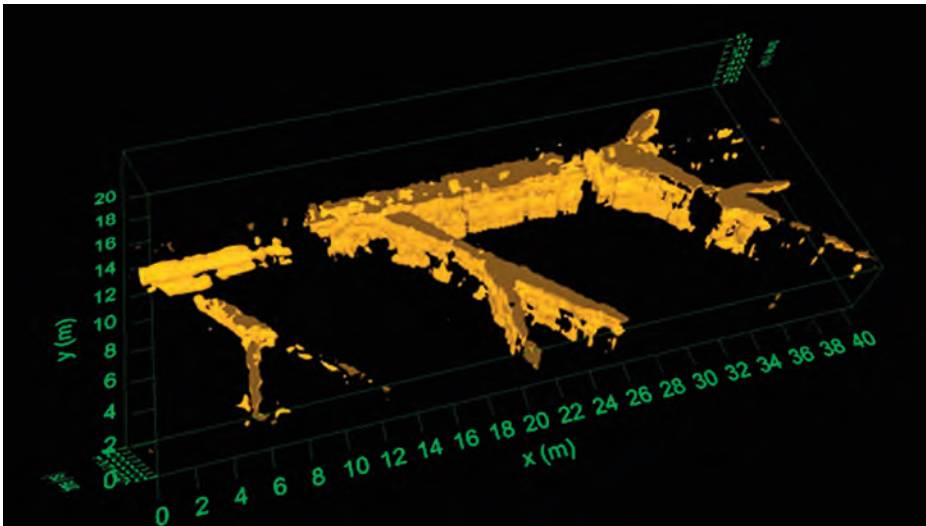


Figura 6. Isosuperficie generada con el *software* GPR-SLICE.

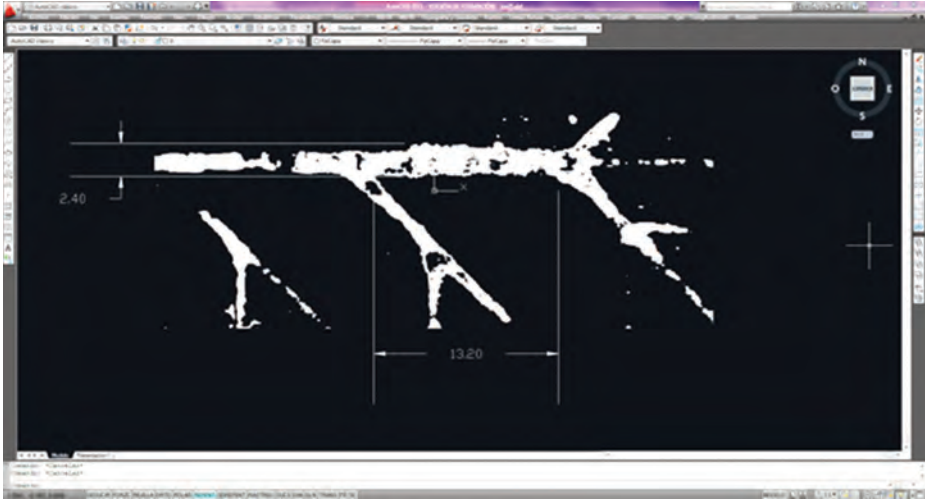


Figura 7. Imagen *dxf* exportada en AutoCAD mostrando diversas dimensiones del túnel.

Se presenta además una metodología avanzada de visualización 3D que permite la reconstrucción volumétrica de los túneles, consiguiendo, asimismo, una mejor interpretación de los resultados obtenidos y de fácil comprensión, ya que las imágenes 3D proporcionan una visualización absolutamente precisa e intuitiva de la realidad localizada bajo tierra. En la figura 6 se presenta la isosuperficie (5) generada, con el *software* GPR-SLICE, a partir del modelo 3D, con la representación volumétrica del túnel.

El *software* GPR-SLICE permite también exportar este volumen en formato CAD, lo que habilita el dimensionado del túnel de manera precisa (figura 7).

Se demuestra que el GPR es una herramienta no destructiva, idónea para la caracterización y reconstrucción de espacios bajo tierra, como es el caso de túneles subterráneos. Asimismo, la metodología 3D propuesta ha mostrado su potencial como herramienta de apoyo a la interpretación y dimensionamiento de dichas construcciones.

(5) Por isosuperficie se entiende una superficie que representa puntos de un valor constante (amplitud) dentro de un volumen de espacio en tres dimensiones.



Submarino *Tramontana* durante SINKEX 2004.
(Foto: proporcionada por J. Sammarín Costa).