

Universidad de Granada
Secretariado de Extensión Universitaria
Aula de Ciencia y Tecnología

Desenterrando el pasado: El uso del georrádar y otras técnicas



**José A. Peña
Teresa Teixidó**

22 Abril 2013



ugr | **Universidad
de Granada**

**Instituto Andaluz de
Geofísica**





Este documento es la adaptación escrita de la conferencia presentada en el ciclo de conferencias de Divulgación Científica que organiza el Aula de Ciencia y Tecnología, del Secretariado de Extensión Universitaria de la Universidad de Granada.

1. ¿QUÉ ES LA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA?

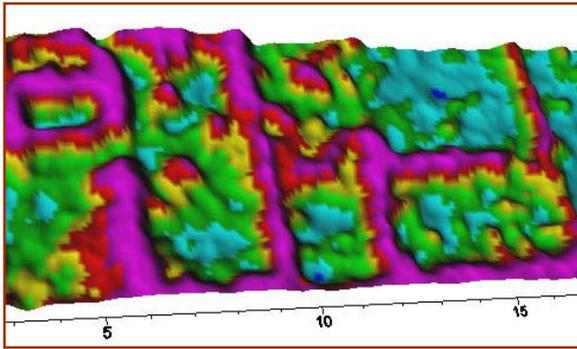
Se suele definir la prospección geofísica como una rama de la física aplicada que consiste en el empleo de un conjunto de métodos físico-matemáticos que se aplican a la exploración del subsuelo, su ámbito de aplicación va desde el conjunto de la Tierra hasta unos pocos cm, en función del método empleado o del modo en que se aplica determinado método.

A fin de mostrar las capacidades y limitaciones que poseen los métodos geofísicos de superficie para extraer información del subsuelo, es necesario enumerar tres principios fundamentales que rigen en estos métodos.

- 1- Cualquier método geofísico mide el contraste de una determinada propiedad física entre el objeto buscado y los materiales que lo envuelven. Si no hay diferencia en el valor de la propiedad medida (densidad, constante dieléctrica relativa, resistividad, velocidad de las ondas sísmicas, temperatura...) entre el objeto buscado y su entorno, éste no puede detectarse con un método basado en esa determinada propiedad.
- 2- Cada método geofísico tiene una resolución limitada que no permite detectar más allá del rango del experimento. Por ejemplo, el objeto más pequeño detectable por el radar está limitado, entre otros factores, por la frecuencia central de la antena y por la profundidad.
- 3- En la mayoría de los casos hay una relación inversa entre la resolución y la profundidad, si se desea más profundidad es a costa de perder resolución y viceversa.

La praxis de la geofísica implica: la medida en el campo de parámetros del subsuelo desde la superficie, el procesado de estos datos en el laboratorio con técnicas físico-matemáticas, y la elaboración de modelos. Luego estos modelos deben interpretarse, ya que están limitados por el método de medida empleado y por el método matemático utilizado de modo que siempre van a representar distribuciones aproximadas y suavizadas de una determinada propiedad física en el interior del subsuelo, podría decirse que son imágenes del terreno obtenidas con otros ojos y que no tienen porqué coincidir con lo que veremos cuando excavemos.





A pesar del gran desarrollo tecnológico la naturaleza continua imponiendo restricciones a las medidas y a las metodologías. Los modelos que la geofísica obtiene siempre son imágenes suavizadas de la realidad.

Otro condicionante que debe mencionarse es que los métodos geofísicos no siempre se pueden aplicar, hay problemas que no tienen solución geofísica, sea por el tamaño de los objetos buscados, sea por las condiciones locales. Por ejemplo, es inútil hacer una prospección magnética en un lugar que ha funcionado como vertedero, o hacer una prospección rádar sobre unas arcillas empapadas de agua salobre. Tampoco tiene sentido aplicar el método por el método, en algún caso es más barato excavar si de antemano se sabe exactamente donde hay que hacerlo.

Pero aún con estas limitaciones, los métodos geofísicos son una importante herramienta de trabajo en la investigación arqueológica debido a que presentan ciertas ventajas:

- ✓ Son métodos no destructivos, en ningún caso se produce una alteración permanente del terreno; es decir pueden proporcionar una información valiosa de los primeros metros de subsuelo sin tocar una sola piedra. De modo que se puede obtener información, más allá de la que proporcionan la foto aérea y la prospección superficial, sobre una extensa superficie porque aunque no se tengan los medios o la oportunidad de excavarla.
- ✓ Su aplicación es mucho más barata que la excavación arqueológica. Explorar media ha por magnetometría o 1.500 m² con rádar 3D, cuestan aproximadamente lo mismo que excavar 1 m³ usando un sistema de registro medianamente exigente.
- ✓ Pueden usarse como herramientas para la planificación, cuando las disponibilidades presupuestarias son limitadas; como suele suceder casi siempre en la investigación arqueológica. Excavar un pequeño sector un metro a la derecha o a la izquierda puede ser la diferencia entre un resultado positivo y una pérdida de tiempo y recursos.





2. MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA MÁS USUALES EMPLEADOS EN ARQUEOLOGÍA

Los métodos de prospección geofísica pueden clasificarse de muchas maneras, una clasificación bastante extendida es la que se propone a continuación.

- ✓ Métodos pasivos. Son aquellos que no introducen ninguna perturbación en el terreno.

Prospección gravimétrica, basada en las diferencias del campo gravitatorio local.

Prospección magnética, basada en las diferencias del campo magnético local.

- ✓ Métodos activos. Miden la respuesta a una perturbación introducida en el terreno.

Prospección eléctrica, introduce una corriente continua en el terreno.

Prospección sísmica, produce perturbaciones elásticas.

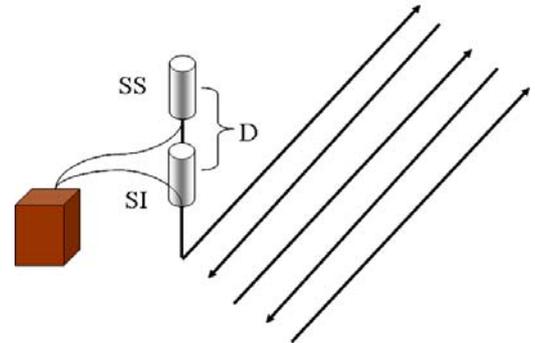
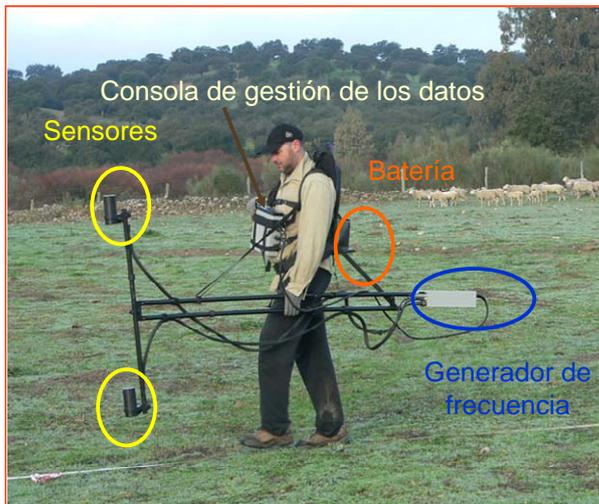
Prospección radar, introduce trenes de pulsos de radiofrecuencia.

2.1. Prospección Magnética

El método magnético es muy utilizado en arqueología, en especial en grandes yacimientos ya que la toma de datos es bastante rápida y puede explorarse una gran extensión de terreno al día. El método consiste en detectar las variaciones locales en el campo magnético terrestre debidas a la presencia de estructuras subsuperficiales.

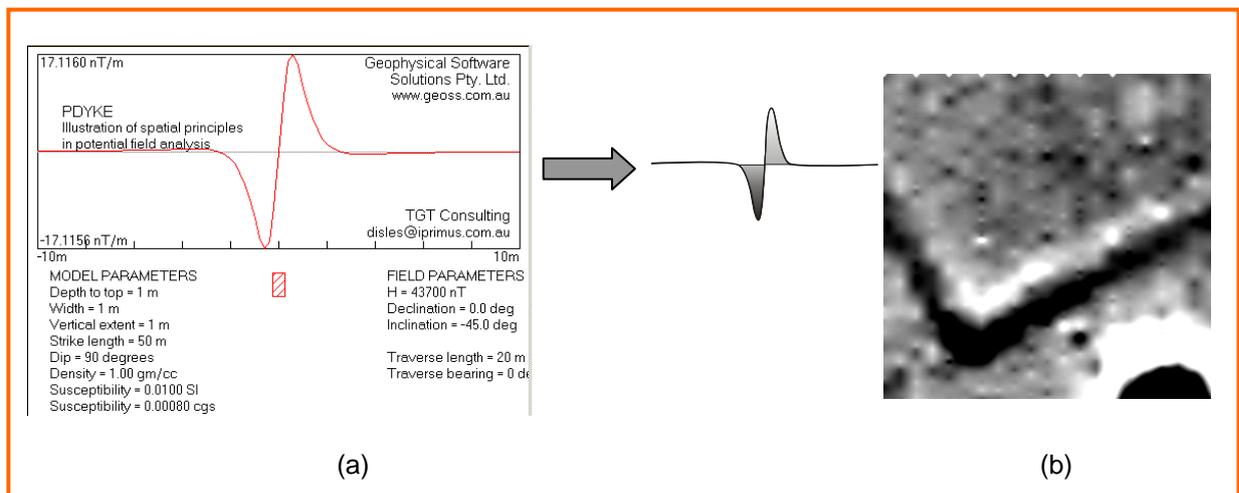
Normalmente la prospección magnética se realiza definiendo una malla de datos en toda la zona que debe explorarse, por tanto lo primero que debe hacerse antes de empezar las medidas es asegurarnos de tener un sistema de coordenadas reproducible y preparar el terreno, es decir limpiarlo de chatarra, piedras grandes y arbustos, etc. El método más empleado en la actualidad para medir las anomalías magnéticas es el del pseudo-gradiente ya que atenúa las anomalías regionales a favor de las más locales y superficiales. Consiste en ir desplazando a lo largo de los perfiles dos sensores en vertical separados una distancia D . El sensor inferior está más afectado por el campo magnético producido por los cuerpos más superficiales, mientras que el superior está mucho menos afectado por el campo local y al trabajar de forma sincrónica, la diferencia entre ellos proporciona el gradiente magnético debido a los objetos soterrados más superficiales.





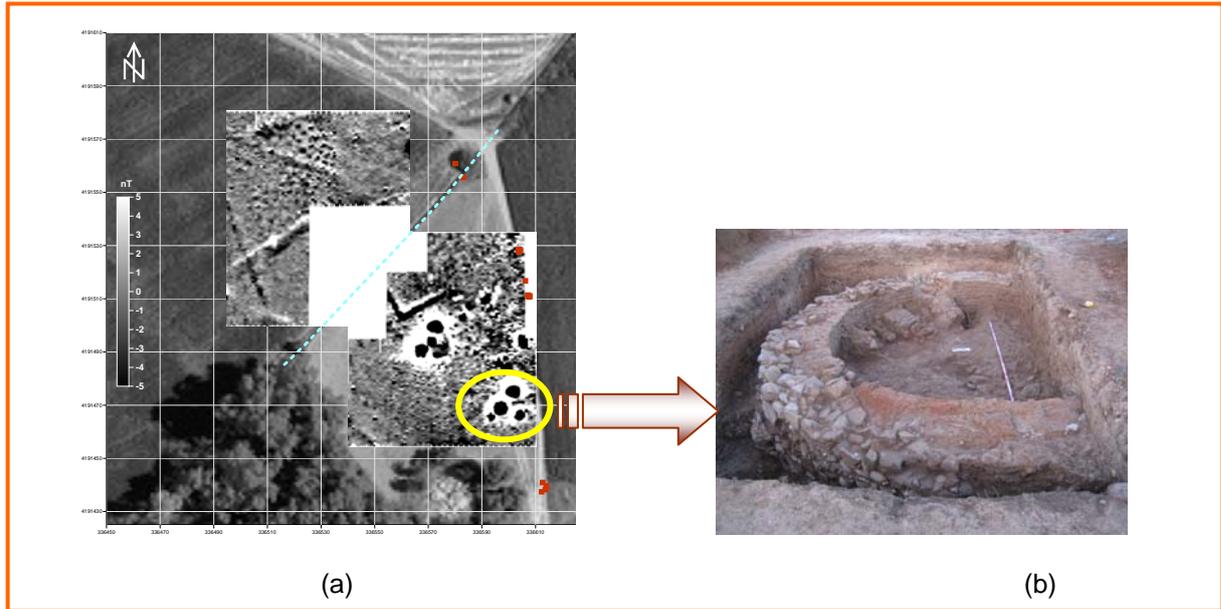
Magnetómetro de vapor de potasio de gran sensibilidad operando en modo pseudo-gradiente vertical

Una vez realizados los perfiles, estos se unen y se tratan los datos como si fuera un mapa. El mapa de anomalías magnéticas resultante de la zona explorada se construye coloreando en bandas claro-oscuras los lóbulos de las anomalías encontradas.



(a) Anomalía magnética producida por un cuerpo soterrado 1 m de profundidad y con los parámetros que se indican. (b) Mapa de anomalías magnéticas (porción) obtenido coloreando en gama lineal de grises los lóbulos de las anomalías.

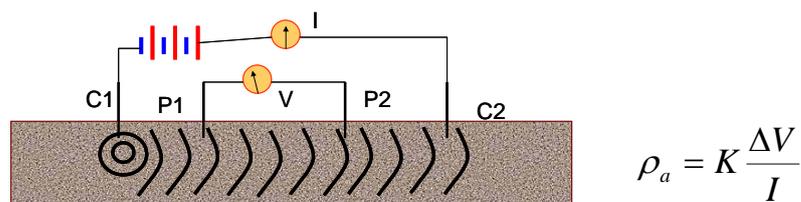




(a) Mapa de anomalías magnéticas sobre ortofotografía correspondiente al yacimiento romano del Cortijo de Quintos, cerca del aeropuerto de Córdoba. Los círculos corresponden a hornos romanos. Uno de estas anomalías circulares fue excavada arqueológicamente y se obtuvo el hormo romano mostrado en la fotografía (b). -Peña *et al.* 2008-

2. 2. Prospección Eléctrica

Los métodos de prospección eléctrica en corriente continua se fundamentan en la teoría general del campo eléctrico estacionario y se basan en detectar los efectos superficiales que produce el flujo de una corriente eléctrica, natural o inducida, por el subsuelo.



Los métodos eléctricos se basan en la Ley de Ohm ($R=V/I$). A grandes rasgos consisten en calcular la resistividad del terreno inyectando una corriente eléctrica conocida (I) mediante electrodos clavados al suelo y medir la diferencia de potencial en dos electrodos (ΔV) intermedios.

Existen una gran variedad de métodos y dispositivos para llevar a cabo una prospección eléctrica y cada uno de ellos es más o menos adecuado según sea el objetivo del estudio, el tipo de terreno, la zona de trabajo (topografía y escala) y las características eléctricas de las rocas y los suelos (que varían

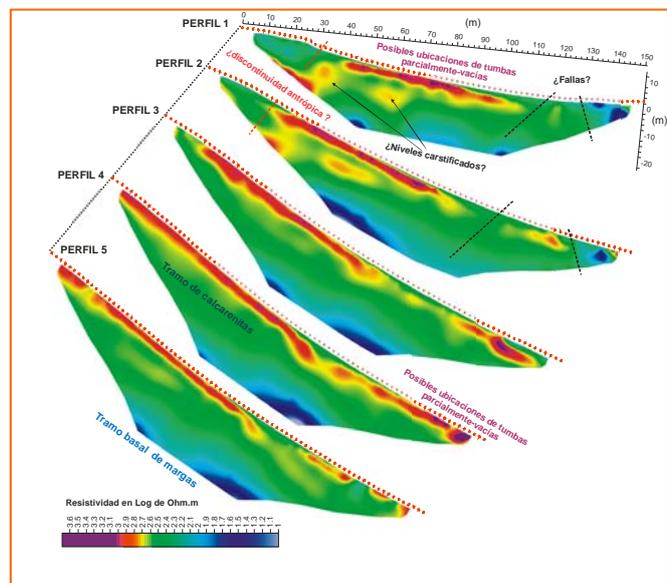
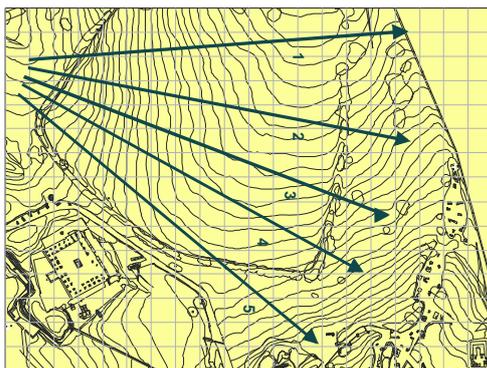




enormemente). Esquemáticamente, un equipo habitual de trabajo consiste en: un conjunto de electrodos que se clavan en el suelo y que actúan como puntos de inyección/medición, una batería para inyectar la corriente, que es medida por un amperímetro, un milivoltímetro para medir la diferencia de potencial, y los cables eléctricos necesarios para las conexiones.



Los métodos eléctricos proporcionan imágenes del subsuelo (modelos) en términos de resistividades. En estudios arqueológicos se utiliza mucho para temas de contexto geoarqueológico. En general son métodos económicos y de, relativamente, fácil aplicación en comparación con otras técnicas. Las imágenes sobre este párrafo corresponden a un perfil eléctrico realizado en el Cementerio de San Rafael (Málaga), donde el método se empleó como complemento a una extensa exploración con georrádar.

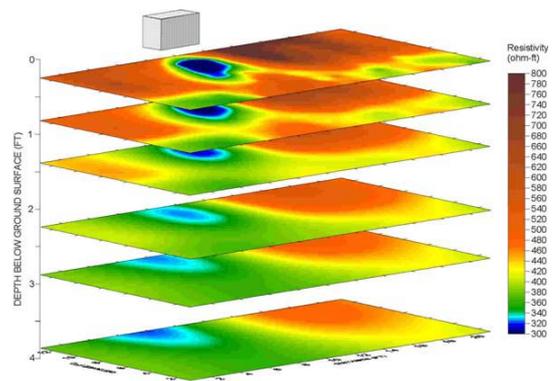
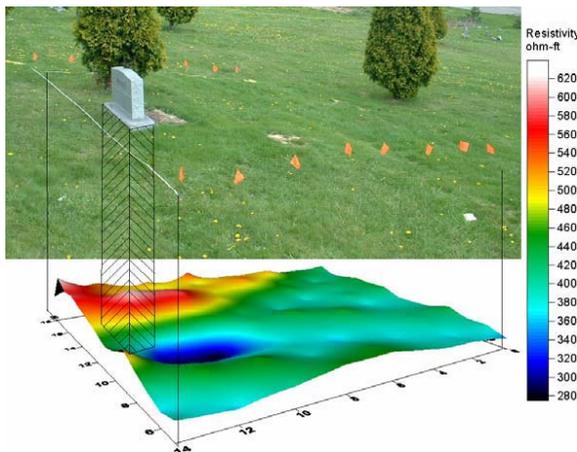
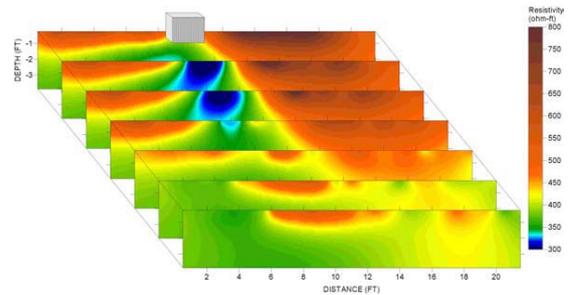


Izquierda: Mapa de situación de los perfiles eléctricos realizados en una ladera de la necrópolis romana de Carmona. Derecha: las tumbas romanas corresponden a las anomalías resistivas rojas situadas en la parte superior de los perfiles eléctricos. - Peña et al. 2005-





En prospección arqueológica últimamente se está empezando a usar el método de prospección electromagnética en el dominio de la frecuencia (FDEM). Es un método parecido al eléctrico pero que funciona por el principio de inducción de modo que no es necesario clavar ningún electrodo al suelo. Como es de muy rápida ejecución, la toma de datos se realiza de forma muy parecida a la exploración magnética: a base de perfiles individuales que luego se reúnen en un mapa; pero en este caso se trata de representar los cambios de resistividad del terreno. Este método, a diferencia del magnético es capaz de presentar también cortes en profundidad.



La parte removida, correspondiente a la fosa es más porosa que el terreno no alterado, con lo que retiene más humedad que se manifiesta como una resistividad más baja (azul) que la de su entorno. Pero en algunos casos no es concluyente, en especial en enterramientos antiguos.

2. 3. Prospección sísmica

Los métodos de prospección sísmica estudian el subsuelo a partir de la propagación de las ondas mecánicas que se producen artificialmente en el terreno con la caída de un peso o mediante un explosivo. Como en el caso de los terremotos pero con mucha menos energía, las partículas del suelo se van moviendo al paso de estas ondas (frente de ondas) y las diferentes vibraciones producidas se registran y se



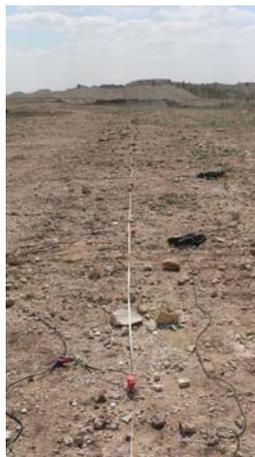


estudian, porque según sea el subsuelo las partículas se mueven de una determinada manera. La velocidad de propagación de las diferentes ondas sísmicas es un buen indicador de las características geológicas de los materiales (composición litológica, compactación, fisuración, etc.); por regla general se tiene que cuanto más compacta sea una roca, con más velocidad viajan.

En líneas generales, un equipo de prospección sísmica está compuesto principalmente por una fuente de energía que genera las ondas sísmicas incidentes, unas estaciones sensoras (geófonos o acelerógrafos) que son los puntos de escucha de las vibraciones del terreno y (normalmente) se distribuyen en línea recta a distancias conocidas del punto de impacto; y un sismógrafo que es donde se registran estas vibraciones.



Martillo sísmico generador de energía incidente

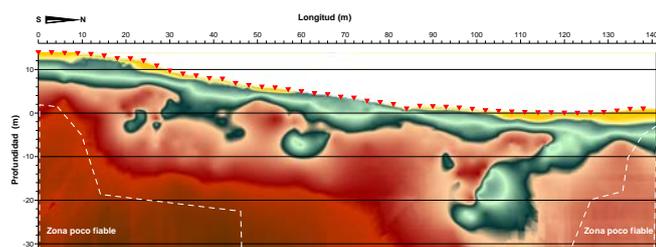
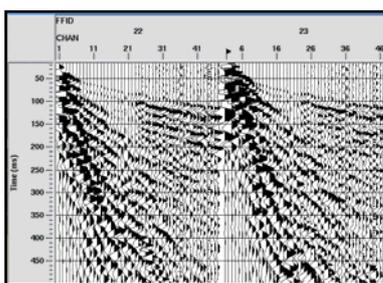


Geófonos

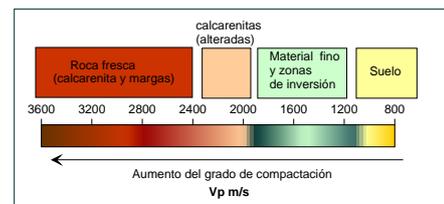


Sismógrafo

La energía sísmica se propaga a través del subsuelo haciendo vibrar el terreno en forma de ondas sísmicas. Los registros sísmicos contienen información sobre el viaje de estas ondas y a partir de su análisis se obtiene el grado de compactación de las rocas y su geometría.



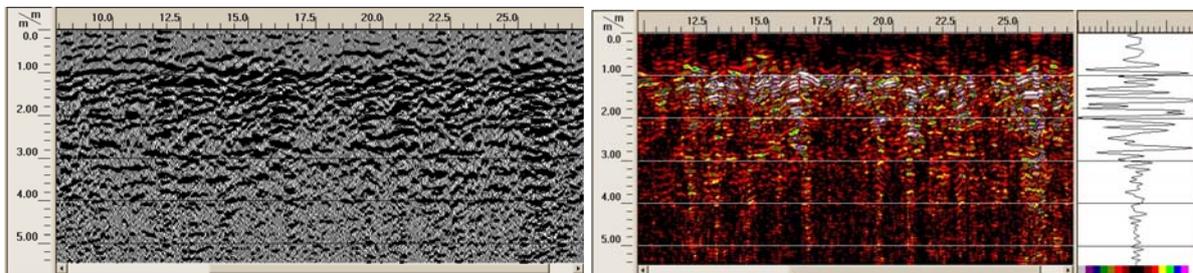
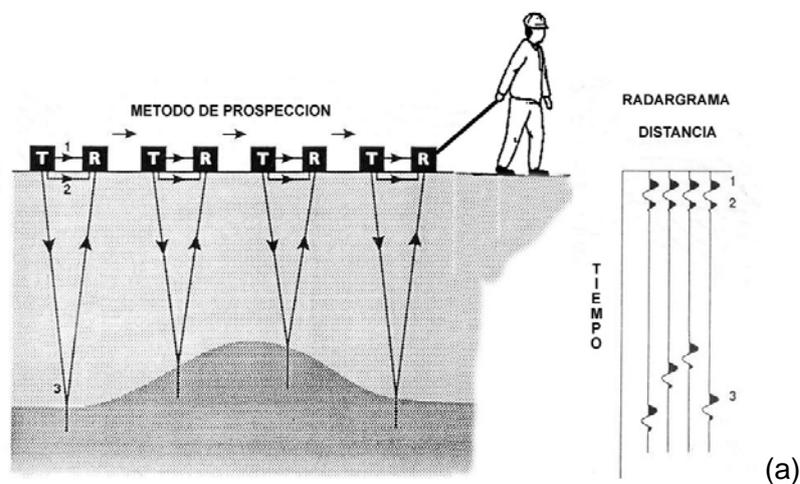
Registro sísmico y perfil sísmico obtenido en la necrópolis romana de Carmona. Algunas tumbas están emplazadas en las zonas de baja velocidad (verde claro). Este perfil sísmico coincide con uno de los perfiles eléctricos presentados anteriormente.- Peña et al. 2005-





2. 4. Prospección con radar del subsuelo (Georradar, GPR)

El georradar (rádar del subsuelo o *Ground Penetrating Radar-GPR*) es una técnica de prospección basada en la emisión, hacia el interior del terreno, de pulsos electromagnéticos de corta duración y en la recogida de las reflexiones que se producen en las discontinuidades electromagnéticas entre los materiales atravesados (Figura). La propagación de las ondas electromagnéticas está regulada por las ecuaciones de Maxwell, que describen los campos magnético y eléctrico de una onda en función de las propiedades eléctricas y magnéticas del terreno por el que viaja. Los parámetros que más influyen en la transmisión de ondas son la constante dieléctrica del terreno (K) y la conductividad (mS/m). De ellos obtendremos parámetros como la velocidad (m/ns), la atenuación (dB/m), el coeficiente de reflexión, la resolución y la profundidad de penetración



(b)

(c)

Escala de color-amplitud

Esquema simplificado de prospección con radar de subsuelo. (a) La realización del perfil de reflexión con radar consiste en ir desplazando el conjunto transmisor/receptor a lo largo del terreno. (b) Las ondas electromagnéticas reflejadas son captadas y representadas en trazas, donde la distancia se sitúa en el eje de las abscisas y el tiempo doble en el eje de las ordenadas. (c) La sección obtenida acostumbra a representarse en gama de amplitud-color para un mejor análisis del radargrama.

La frecuencia propia de las ondas emitidas está entre 10 MHz y 3 GHz y los pulsos electromagnéticos tienen una duración de entre 1 y 10 nanosegundos (ns), de modo que entre los espacios de tiempo entre pulsos se produce la escucha de las ondas rebotadas por el terreno. Tanto la profundidad de





penetración como la resolución del perfil dependen de las características del terreno y de la frecuencia utilizada. Siendo la regla que a mayor frecuencia mayor resolución, pero al mismo tiempo menor penetración, y viceversa. Así, para cada caso concreto se utilizan diferentes sistemas de antenas. Otra característica a tener en cuenta es que ciertos materiales secos y porosos como las arenas son muy transparentes al radar; mientras que las arcillas, y en general los materiales saturados en agua, son más opacos al paso de las ondas electromagnéticas. Así, la detección de objetos enterrados será mejor cuanto más contraste dieléctrico exista entre el objeto y el medio encajante. También puede darse el caso de tener dos materiales de litologías diferentes y con constantes dieléctricas parecidas, entonces la detección es prácticamente imposible.

Equipos Georrádar

En general un georrádar está formado por una unidad central conectada o integrada a un PC y que actúa como unidad de representación y registro. Las unidades emisoras y receptoras se denominan antenas. Teniendo en cuenta que a mayor frecuencia mayor resolución y menor penetración; y viceversa. En el mercado hay antenas de varias frecuencias, desde 10 MHz hasta 3 GHz, dependiendo del tipo de prospección que se vaya a realizar. Para la detección de fosas se suelen utilizar antenas con frecuencias centrales definidas entre 900 y 200 MHz y para elegir la frecuencia más adecuada es importante tener algún conocimiento previo del tipo de enterramiento y de la geología de la zona a explorar.



Antena de 900 MHz

Tiene una penetración inferior a 1 m, es de alta resolución y útil en arqueología.



Antena de 400 MHz

Con una penetración de hasta 3-4 m y buena resolución, es una antena muy bien apantallada. La de ilustración aparece provista de una rueda marcadora.





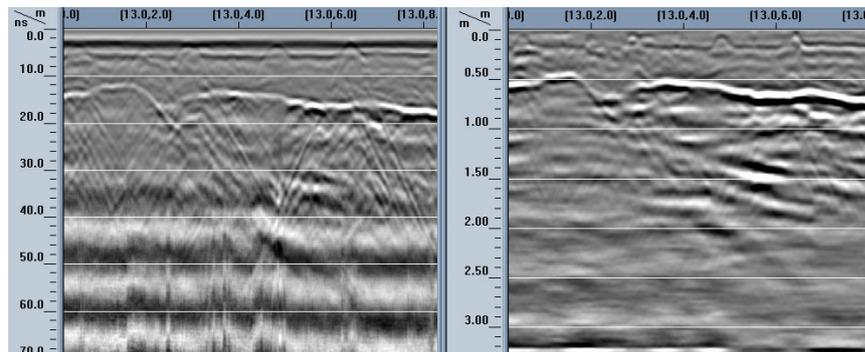
Antena de 200 MHz

Tiene una penetración de hasta 7 m, lo que la hace útil en yacimientos arqueológicos de gran tamaño, y para otras aplicaciones superficiales.

Técnicas de adquisición

Perfiles individuales. Normalmente la toma de datos (trazas) se realiza a lo largo de perfiles definidos y los parámetros de adquisición se establecen en función de la antena que se vaya a utilizar, de la profundidad de investigación y del tamaño de las estructuras a detectar. Así, por ejemplo, para una antena de 400 MHz que inspecciona profundidades hasta 3 m suele establecerse una emisión-escucha cada 2 cm.

Una vez adquiridos los perfiles georrádar, llamados también radargramas, deben tratarse en el laboratorio para eliminar señales parásitas y proporcionar un radargrama lo más interpretable posible.



A la izquierda se muestra el radargrama de campo y el mismo radargrama después de aplicarle un procesado multiseñal. En la imagen de la derecha se ha convertido el tiempo doble (ns) a profundidad (m).

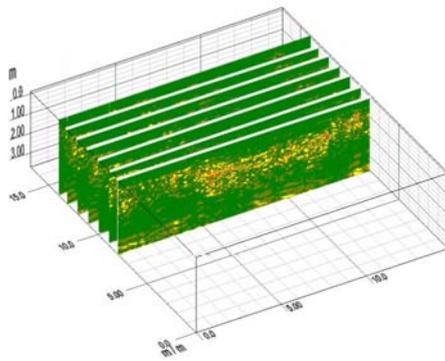
Procedimiento 3D. La adquisición en modo 3D permite una mejor delimitación de las estructuras soterradas. Esta técnica se utiliza mucho como fuente de información a priori en la planificación de intervenciones arqueológicas, en la localización de tuberías y redes de alumbrado, etc.

La toma de datos consiste en barrer la zona a explorar mediante perfiles paralelos de ida y vuelta, usando como coordenadas de referencia puntos fijos marcados sobre el terreno. Normalmente la separación entre perfiles suele definirse en función de la antena que se vaya a utilizar, de la profundidad de investigación y del tamaño de las estructuras a detectar. Así, por ejemplo, para una antena de 400 MHz que inspecciona profundidades hasta 3 m la separación entre perfiles suele ser de 0.5 m o 0.25 m.

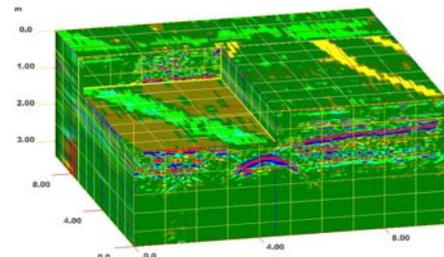




Además de tratar cada radargrama individualmente deben seguirse una serie de procedimientos adicionales que culminan con la creación de un volumen de datos (paralelepípedo rectangular). Para ello se ordenan los perfiles rádar vecinos y una vez emplazados geoméricamente se interpolan espacialmente permitiendo el posterior manejo de esta información volumétrica



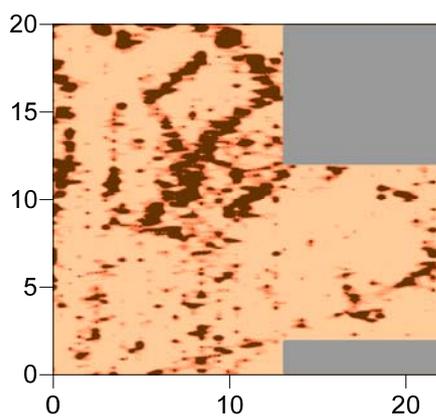
(a) Se ordenan los perfiles



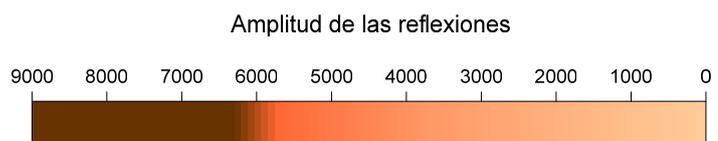
(b) Se construye el volumen de datos 3D

Con el volumen de datos pueden generarse distintas imágenes que facilitan la visualización de aspectos difíciles de percibir a través de los perfiles individuales. Normalmente hay tres presentaciones distintas de los datos rádar 3D:

1.- Representación de los datos en cortes horizontales a distintas profundidades. También llamada rebanadas de profundidad o de tiempo (*time or depth slices*). Consiste en obtener una serie de lajas horizontales en el volumen creado, con un determinado espesor y a una determinada profundidad; de manera que la sucesión de estas imágenes muestra la evolución de las reflexiones y constituye una eficaz herramienta de interpretación.



Z = 70 cm (dz = 20 cm)



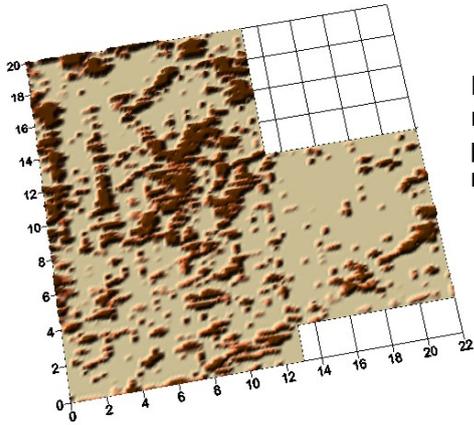
Ejemplo de un corte horizontal correspondiente a 70 cm de profundidad (Z) y de 20 cm de grosor (dz). La imagen muestra las reflexiones más potentes (marrones) respecto del medio encajante.

2.- Representación de los datos en superficies alabeadas. Es otra imagen que puede construirse con el volumen de datos 3D y representa la anomalía más próxima a la superficie. Esta representación es

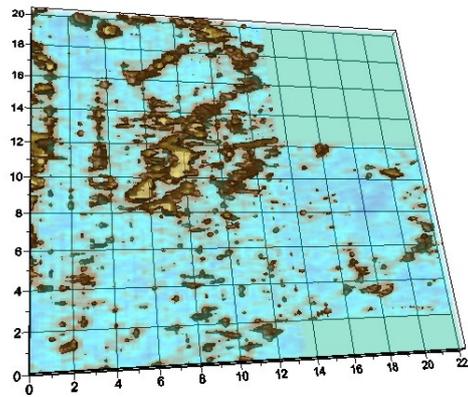




similar a la que se obtendría si se excavase por niveles naturales; sin dejar de tener presente de que lo que se representa son valores de reflectividad del terreno.



Ejemplo de superficie alabeada de los materiales reflectores comprendidos entre 35 cm y 95 cm de profundidad. - La rebanada anterior pertenece a este nivel-.



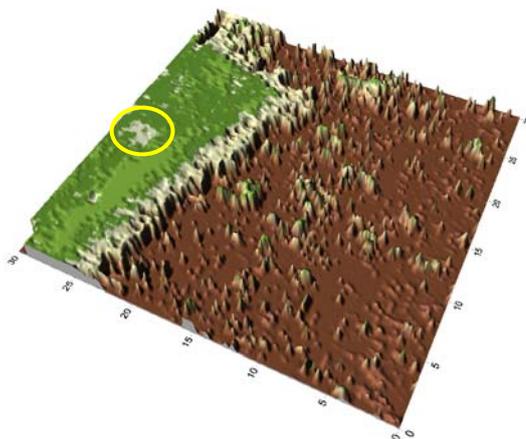
3.- Representación volumétrica de los datos.

Al disponer de valores de reflectividad tridimensionales también se suelen presentar los resultados en forma volumétrica

Ejemplo de representación volumétrica de los mismos datos que la figura anterior.

Ejemplos de imágenes georrádar en la detección de estructuras arqueológicas

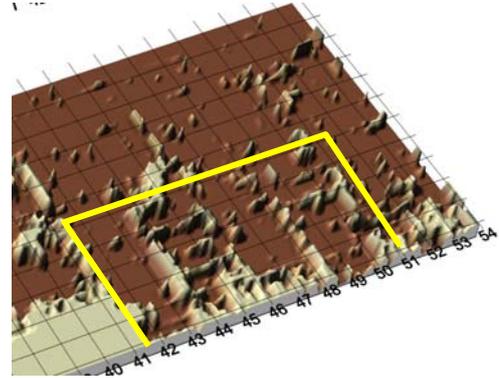
Natatio en el yacimiento romano de Herrera (Sevilla) (Peña et al 2005)





Fosas comunes de los represaliados de la Guerra Civil Española (Peña et al. 2007)

Algunas veces se han encontrado fosas delimitadas con tabiques y entonces su detección es fácil porque se detecta el contacto de éstos. En este caso se tenía constancia de que algunas veces los fusilados eran enterrados en fosas ya existentes destinadas a un uso general, el ejemplo que se presenta a continuación se trata de uno de estos casos.



Radargrama donde se ven los tabiques laterales que delimitan la fosa. La imagen de la derecha es la superficie alabeada de una porción del área de estudio, donde los tabiques responderían a las zonas de enterramiento. Cementerio de San José, en Linares.

Vila Romana de Fuente Álamo (Córdoba) (Peña et al. 2004)



Terreno explorado



Excavación posterior



Superficie alabeada





BIBLIOGRAFÍA (ejemplos citados en el texto)

- PEÑA, J. A., TEIXIDÓ, T., CARMONA, E., (2005): *Prospección Geofísica en la Necrópolis de Carmona (Sevilla)*. Estudio solicitado por el Conjunto Arqueológico de Carmona, Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía. Ref. AGA-29.
- PEÑA, J. A., TEIXIDÓ, T., CARMONA, E., (2007): *Prospección con radar del subsuelo para la localización de Fosas Comunes en el Patio de San Diego. Cementerio de San José, Linares*. Estudio solicitado por el Excmo. Ayuntamiento de Linares. Ref. AGA-50.
- PEÑA, J. A., TEIXIDÓ, T., CARMONA, E., (2007): *Exploración con radar del subsuelo en el yacimiento arqueológico de Termas-Villa Romana de Herrera (Sevilla)*. Estudio solicitado por el Excmo. Ayuntamiento de Herrera. Ref. AGA-50.
- PEÑA, J. A., TEIXIDÓ, T., CARMONA, E., y SIERRA, M. (2008): *Prospección magnética y radar 3D como métodos para obtener información a priori en la planificación de una excavación arqueológica. Caso de estudio: Yacimiento del Cortijo de Quintos (Córdoba, España), Comunicación a la 6ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Tomar (Portugal) 11 al 14 de febrero de 2008.*

