

**Georadar Aplicado  
en Geotecnia  
y Arqueología**

---

**Lawrence Conyers  
Adolfo Martínez**

# Georadar Aplicado en Geotecnia y Arqueología

**Lawrence B. Conyers**  
**Adolfo Martínez**

Copyright 2021



GeoMantis  
Monterrey Mexico  
<https://www.geomantis.com.mx>

ISBN 978-1-63972-317-1

## Tabla de Contenido

<b>CAPITULO 1</b> .....	1
<b>CAPITULO 2</b> Introducción al Radar de Penetración	
Terrestre.....	4
HISTORIA DE GEORADAR.....	10
<b>CAPITULO 3</b> Generación y Propagación de Energía	
De Radar.....	18
GENERACIÓN Y REGISTRO DE ONDAS DE	
GEORADAR.....	21
PROCEDIMIENTOS DE ADQUISICIÓN.....	24
RECOLECCIÓN DE TRANSECTOS EN	
MALLAS.....	30
REGISTRO DE DATOS.....	34
VARIABLES DE ANTENA.....	34
PROPAGACIÓN Y REFLEXIÓN DEL	
RADAR EN EL TERRENO.....	40
Medidas de la propagación y la	
reflexión del radar.....	40
Dispersión y atenuación de la energía del radar en el	
suelo.....	45
RESOLUCIÓN DE CARACTERÍSTICAS	
UBSUPERFICIALES.....	54
TIPOS DE REFLEXIÓN.....	57
COMPLICACIONES DE LA PROPAGACIÓN	
Y REFLEXIÓN DEL RADAR.....	66
<b>CAPITULO 4</b> Software de Adquisición y Equipos	
de Radar de Penetración Terrestre.....	80
SISTEMAS GPR.....	80
SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS:	
PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN.....	84
<b>CAPITULO 5</b> Análisis de Velocidad.....	101
MÉTODOS DE ONDA REFLEJADA.....	104
MÉTODOS DE ONDA DIRECTA.....	108
MEDICIONES DE LABORATORIO DE RDP.....	129
ANÁLISIS DE HIPERBOLAS DE REFLEXIÓN	
DE FUENTE PUNTUAL.....	120
CONCLUSIONES ANALISIS DE VELOCIDAD.....	122
<b>CAPITULO 6</b> Procesamiento de datos posterior a su	
adquisición (Post-Proceso).....	124
CORRECCIÓN DE ESCALA Y CREACIÓN	
DE PERFILES DE REFLEXIÓN.....	126

ELIMINAR LAS BANDAS HORIZONTALES.....	130
ELIMINACIÓN DE RUIDO DE ALTA FRECUENCIA.....	131
ELIMINACIÓN DE MÚLTIPLES REFLEXIONES.	132
MIGRACIÓN.....	134
AUMENTAR LA VISIBILIDAD DE REFLEXIONES SUTILES.....	136
FILTRADO DE RECUENCIA.....	138
PROCESAMIENTO DE MÚLTIPLES DESPLAZAMIENTOS.....	140
CONCLUSIONES DEL TRATAMIENTO DE DATOS.....	142
<b>CAPITULO 7</b> Interpretación de datos GPR.....	159
MODELOS SINTÉTICOS GPR.....	145
Creación de un modelo informático sintético.....	147
Aplicaciones de modelado sintético.....	149
Modelos sintéticos comparados con perfiles GPR.....	153
INTERPRETACIÓN Y MAPEO DE MUCHOS PERFILES DE REFLEXIÓN EN UNA CUADRÍCULA.....	156
Ejemplo de reconstrucción de un paisaje enterrado a partir de ,interpretación manual de perfiles de reflexión.....	157
ANÁLISIS DE AMPLITUD EN REBANADAS DE MAPA.....	161
Mapas de cortes de amplitud en terreno plano.....	173
Rebanadas de amplitud en terreno irregular.....	175
Descubrimiento de características sutiles con mapeo de amplitud.....	177
Mapas de amplitud para buscar entidades verticales y tumbas.....	182
Producción de imágenes Renderizadas.....	187
<b>CAPITULO 8</b> Conclusión.....	191
<b>REFERENCIAS</b> .....	198
Glosario de términos comunes de Georadar utilizados en este libro.....	220
Sobre los autores.....	227

## CAPITULO 1

Es la naturaleza de los negocios y la ciencia en el siglo XXI que la mayoría de los libros sobre temas técnicos ampliamente disponibles estén escritos en idioma inglés. Esta es una forma natural de llegar a la audiencia más amplia y también es el idioma dominante que se utilizará en la educación superior y científica en todo el mundo. Para ser tomado en serio por una audiencia mundial, los escritos de todo tipo de manuales, libros de texto y artículos técnicos deben estar en inglés. Con Georadar no es diferente. Si bien hay muchos fabricantes y desarrolladores de software en países que no hablan inglés, su literatura siempre está en inglés.

Este libro fue escrito para hacer que el método y la teoría de Georadar, y sus aplicaciones, estén más disponibles y sean más comprensibles para la comunidad de habla hispana. El español es el segundo idioma más hablado en el mundo, solo superado por el chino, y el inglés ocupa el tercer lugar. Por lo tanto, nuestro objetivo es poner a disposición una introducción a Georadar para los usuarios de aplicaciones geológicas y arqueológicas de una manera que no es posible con la barrera inherente del idioma que siempre existe cuando la escritura en inglés debe ser parcialmente traducida y no siempre entendida por completo por los lectores nativos de español.

Somos conscientes de que algunos de los términos técnicos que se utilizan en Georadar (GPR) se desarrollaron por primera vez en inglés y, a veces, pueden traducirse mal al español. Para superar parcialmente este problema inherente, hemos incluido un glosario de términos de uso común al final de este volumen tanto en inglés como en español, con las definiciones de esos términos en español. Quizás de esta manera podamos comenzar a desarrollar un lenguaje técnico para este tema en español que pueda convertirse en parte de un léxico creciente de palabras de uso común en Georadar, como el “spanglish” es hablado por muchos que viven cerca de la frontera entre México y EE. UU. el lenguaje es fluido y, por necesidad, se desarrolla constantemente con el tiempo.

La idea de este libro surgió de un taller internacional en invierno de 2021 donde participaron 28 personas, la mitad de países que no hablan inglés. En ese taller se determinó rápidamente que era necesario llevar a cabo sesiones especiales fuera de los horarios habituales de reunión en las que las personas que no hablaban inglés se reunían para ayudarse mutuamente con las técnicas y métodos de procesamiento de datos.

La esperanza de este libro es llegar a usuarios potenciales en América Latina (así como a la madre patria España) para proporcionar antecedentes, teoría y ejemplos de este poderoso método geofísico cercano a la superficie tridimensional. Las instrucciones para los sistemas

GPR y los manuales de software seguirán estando en inglés, y los usuarios de esos documentos siempre pueden tener dificultades con el idioma para comprender la recopilación y el procesamiento de datos básicos. Pero para apreciar e interpretar lo que están creando esos métodos básicos de recopilación y procesamiento, no hay nada como una explicación en el idioma nativo de uno.

Este libro no pretende ser un manual completo paso a paso sobre el método GPR para el mapeo. Su objetivo, en cambio, es presentar a los usuarios el método tanto teórico como metodológico, con ejemplos tanto de éxitos como de fracasos. No se incluyen fórmulas complicadas, diagramas de cableado electrónico y especialmente instrucciones paso a paso sobre cómo trabajar con cada sistema GPR. Simplemente hay demasiados disponibles y la correspondiente abundancia de programas de procesamiento y generación de imágenes para cada uno. Para profundizar en los detalles de su propio sistema GPR o paquete de software, los lectores pueden consultar el material de referencia citado, los manuales de equipos u otras fuentes técnicas, que cada fabricante e investigador del sistema GPR desarrolla y modifica continuamente.

Se espera, por lo tanto, que este libro sirva para tres propósitos: primero, iniciar a los usuarios en GPR para que puedan comenzar a comprender por qué y cómo funciona el método, dependiendo de los problemas a resolver; en segundo lugar, proporcionar una base suficiente para que puedan configurar sus levantamientos GPR de manera que los datos recopilados tengan los parámetros de adquisición correctos para la producción de imágenes óptimas; tercero, una vez que los datos se procesan y la interpretación se vuelve necesaria, para proporcionar un trasfondo con el cual evaluar lo que realmente se está midiendo e ilustrando, y cómo esas mediciones cambian con las diferentes condiciones de campo.

Las técnicas de procesamiento e interpretación adecuadas para el método GPR también son una parte extremadamente importante de la técnica y, a menudo, las más difíciles de dominar. Los métodos de procesamiento cambian constantemente a medida que se desarrollan nuevos programas informáticos y se realizan mejoras en las técnicas "estándar" más antiguas. Debido a este entorno de software que cambia rápidamente, los programas y técnicas específicos tampoco se discutirán en detalle, ya que esta información quedaría obsoleta rápidamente. Por lo tanto, solo se cubrirán los métodos más generales, que son comunes a la mayoría de los programas de procesamiento GPR. Cada lector debe buscar los programas más adecuados a sus necesidades, con la ayuda de otros que trabajan y desarrollan métodos para cada sistema GPR.

Sin embargo, la interpretación precisa y útil de los datos siempre viene con la experiencia (Conyers 2012a). Aquí se incluyen muchos éxitos y algunos posibles errores, con información sobre cómo se procesaron y luego interpretaron los datos para cada uno. Sin embargo, es probable que los lectores se enfrenten a problemas nuevos y diferentes para cada levantamiento que se realice y, por lo tanto, todas las técnicas deben permanecer algo fluidas a medida que se encuentran diferentes condiciones, y se descubren nuevos y mejores métodos de procesamiento de campo e informáticos.

## CAPITULO 2

### Introducción al Radar de Penetración Terrestre

El radar de penetración terrestre tiene la reputación de ser uno de los métodos geofísicos más complejos porque implica la recopilación de grandes cantidades de datos de reflexión en numerosos transectos dentro de cuadrículas, que a menudo producen enormes bases de datos tridimensionales.

La capacidad de detectar muchas interfaces a diferentes profundidades bajo la superficie, la interpretación de esas numerosas reflexiones y la dificultad de correlacionarlas en muchos perfiles dentro de una cuadrícula hacen que, al principio, la recopilación y el procesamiento de datos de Georadar sea un trabajo algo intimidante para los no iniciados. Pero su capacidad para producir imágenes tridimensionales de alta calidad del subsuelo compensa con creces la relativa complejidad del método.



**Figura 2.1:** Georadar con Sistema Global de Posicionamiento Integrado (GPR con GPS Integrado)

Los datos de radar de penetración terrestre generalmente se recopilan a lo largo de transectos estrechamente espaciados dentro de una cuadrícula, cada uno de los cuales consta de muchos miles de ondas de radar que se han reflejado de diferentes interfaces bajo la superficie del suelo.



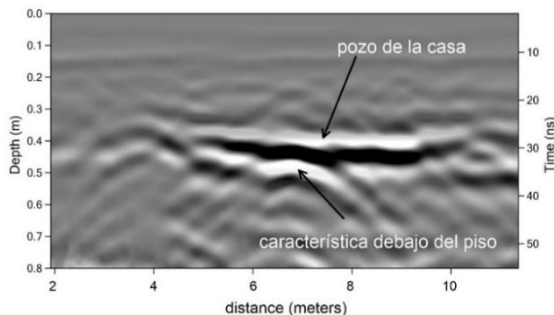
Recientemente, se han integrado sistemas de posicionamiento global (GPS) con alta precisión (figura 2.1) y tiempo de procesamiento rápido en la recopilación de datos para ubicar los reflejos del subsuelo en el espacio (Conyers y Leckebusch 2010; Gaffney et al. 2012; Trinks et al. 2010).

Los sistemas multicanal, aunque no son comunes debido a su costo, están comenzando a usarse para recolectar reflexiones del subsuelo mediante arreglos de antenas, cubriendo amplias franjas de tierra muy rápidamente (Trinks et al. 2010).

El radar de penetración terrestre es un método activo que transmite pulsos electromagnéticos desde las antenas en la superficie al subsuelo y luego mide el tiempo transcurrido entre el momento en que se envían los pulsos y el momento en que se reciben en la superficie (Conyers y Goodman 1997). Los tiempos de viaje de las señales de radar se miden en nanosegundos, es decir mil millonésimas de segundo.

A medida que las antenas se mueven a lo largo de la superficie del suelo, las reflexiones individuales se registran a cada 2 -10 cm. a lo largo de los transectos, utilizando una variedad de técnicas de recolección (Neal 2004).

La forma de las ondas individuales reflejadas que se reciben desde el interior del suelo se digitaliza para formar una traza de reflexión, que es una serie de ondas reflejadas de regreso a una ubicación en la superficie. Cuando se apilan muchos trazos uno al lado del otro secuencialmente, se produce un perfil vertical bidimensional a lo largo del transecto en el que se movió la antena (figura 2.2).



**Figura 2.2:** Perfil de reflexión GPR del piso de una estructura de pozo cerca de Alamogordo, Nuevo México, EE. UU. La distancia a lo largo de los transectos se mide en metros y el tiempo de viaje del radar bidireccional en nanosegundos, que luego se convierte en profundidad en el suelo.

Con los sistemas de antenas múltiples, este procedimiento de recopilación se produce cientos de veces con diferentes antenas que

envían y reciben ondas de radar miles de veces por segundo. Cuando se recogen muchos perfiles de reflexión bidimensionales, cada uno de los cuales contiene miles de trazas de reflexión, dentro de una cuadrícula, se puede generar una variedad de imágenes para estudiar el suelo utilizando tanto el procesamiento bidimensional como tridimensional.

Las ondas de radar reflejadas que se procesan en los perfiles bidimensionales registran el tiempo transcurrido desde su transmisión hasta su recepción en la superficie (lo que llamamos tiempo de viaje bidireccional). Este tiempo se puede convertir a distancia aproximada en el suelo, dando a cada una de las reflexiones información de profundidad precisa que no está disponible en otros métodos de geofísica superficial. Las amplitudes de las ondas reflejadas son particularmente importantes porque sus variaciones están directamente relacionadas con cambios en las propiedades físicas y químicas de diferentes materiales en el suelo. Cuando esas diferencias de amplitud se mapean espacialmente y con profundidad, se pueden construir mapas tridimensionales precisos e imágenes de elementos enterrados.

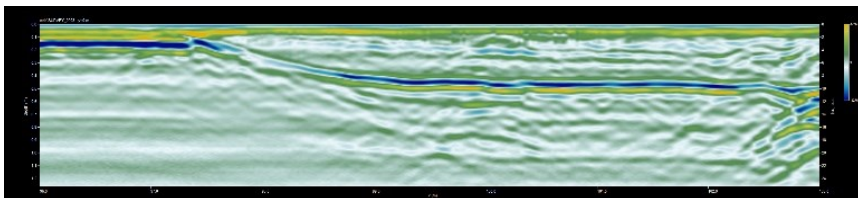
Los levantamientos de radar de penetración terrestre nos permiten una cobertura relativamente amplia en un corto período de tiempo, con una excelente resolución espacial de las características geológicas, su estratigrafía relacionada y de los objetos enterrados. A menudo, se pueden recopilar cuadrículas de 50 por 50 metros de datos de reflexión en unas pocas horas, con una separación entre transectos de 50 centímetros o menos. Algunos sistemas de radar han podido definir estratigrafía y otras características geológicas a profundidades superiores a los 40 metros, cuando las condiciones del suelo y los sedimentos son adecuadas (Annan y Chua 1992; Bristow y Jol 2003; Davis y Annan 1992; Jol 2009; Neal 2004), pero más típicamente, el Georadar se usa para mapear características de interés a profundidades desde unas pocas decenas de centímetros hasta 5 metros de profundidad.

Los levantamientos de radar no solo pueden identificar objetos enterrados para una posible excavación futura, sino que también se pueden interpolar entre excavaciones, proyectando el conocimiento de las características que se encuentran en el subsuelo en áreas que aún no han sido excavadas (Conyers 2009).

Los datos de radar de penetración terrestre se obtienen a partir de los reflejos de las ondas de radar del subsuelo de una manera similar a los métodos de radar utilizados para detectar aviones en el cielo, excepto que la energía se transmite al suelo.

La mayoría de los sistemas de Georadar producen pulsos desde una antena de superficie que se reflejan en los objetos enterrados o contactos litológicos o estratigráficos entre las capas del suelo (figura 2.3) y se

detectan en la fuente mediante una antena receptora que se encuentra al lado o cerca de la antena transmisora. A medida que los pulsos de radar se transmiten a través de varios materiales en su camino hacia los objetivos enterrados, su velocidad cambiará, dependiendo de las propiedades físicas y químicas del material a través del cual viajan. Cuando se miden los tiempos de viaje de los pulsos de energía y se conoce su velocidad a través del suelo, se puede medir con precisión la distancia (o profundidad en el suelo) (Conyers y Lucius 1996).



**Figura 2.3:** Perfil que muestra un contacto litológico y configuración de las capas del subsuelo.

Las unidades de radar de penetración terrestre se han vuelto recientemente muy portátiles, y los sistemas completos pueden ser transportados en una mochila a áreas remotas. La mayoría de los sistemas se alimentan con baterías de alto amperaje o, menos comúnmente, con corrientes alternas de 110 o 220 voltios. Algunos de los primeros modelos de sistemas de Georadar registraban datos de reflexión del subsuelo sin procesar en impresiones de papel, pero impedían el procesamiento de los datos posterior a su adquisición (Conyers 1995). Aunque algunos de estos antiguos sistemas de radar todavía están en uso, los sistemas modernos registran de manera muy eficiente los datos de reflexión de manera digital para su posterior filtrado, procesamiento y sofisticado análisis, lo cual casi siempre es necesario realizar.

Acompañado por una tendencia en la miniaturización de equipos, el procesamiento rápido por computadora de los datos de Georadar adquiridos, ahora puede ocurrir inmediatamente después de que se adquieren, y la interpretación a menudo puede comenzar mientras aún se encuentran en campo, lo que permite a los estudiosos de la tierra producir imágenes tridimensionales de objetos enterrados en solo minutos u horas, una vez adquiridos los datos. Cuando se hace esto, la adquisición de datos adicionales o la planificación de excavaciones para confirmar las reflexiones de interés descubiertas también puede iniciar casi de inmediato, lo que hace que la recopilación, interpretación de datos geofísicos y excavación sea un proceso a menudo iterativo.

El éxito de los estudios de Georadar depende en gran medida de la composición mineralógica del suelo y los sedimentos, el contenido de

arcilla, la humedad del suelo, la profundidad y tamaño del objeto enterrado, la topografía y la vegetación. No es un método geofísico que pueda aplicarse inmediatamente a todos los entornos geográficos, aunque con modificaciones cuidadosas en la metodología de adquisición y procesamiento de datos, la técnica de Georadar se puede adaptar a una gran variedad de condiciones del sitio.

En el pasado, se asumió que los estudios de Georadar solo serían exitosos en áreas donde los suelos y los sedimentos subyacentes son extremadamente secos y, por lo tanto, no conductores (Vickers y Dolphin 1975). Aunque la penetración de las ondas de radar y la capacidad de reflejar la energía de regreso a la superficie a menudo es mejor en suelo seco, se han recopilado buenos datos de Georadar en áreas que están húmedas y contienen una abundancia de arcilla (Conyers 2004; Conyers 2012a: 34; Doolittle et al.2007). Condiciones como esta siempre se habían evitado en el pasado, ya que se les consideraba áreas pobres para Georadar, pero no siempre es así, como se detallará en algunos de los ejemplos de este libro. Por el contrario, se han recopilado datos deficientes de Georadar en áreas muy secas y arenosas, que generalmente se consideran buenas áreas para Georadar, lo que sugiere que otros factores afectan la transmisión y la reflexión del radar de los que se han documentado en la literatura geofísica (Conyers 2012a: 98).

Antes de realizar un levantamiento de Georadar, es importante tener en cuenta qué tipo de equipo utilizar, los métodos de recolección de campo que se emplearán y los numerosos parámetros de adquisición de datos. Estos factores variarán considerablemente según el entorno geográfico y geológico de los levantamientos, los obstáculos de la superficie, las condiciones del terreno y la profundidad esperada de exploración, así como la estratigrafía del sitio que se estudiará. Muchos estudios geofísicos se llevan a cabo precisamente porque se sabe poco sobre lo que hay debajo del suelo. Cuando este es el caso, es difícil tener en cuenta todas estas variables, especialmente la naturaleza de los suelos y sedimentos, la profundidad y los tipos de materiales que podrían encontrarse. Por lo tanto, los parámetros y equipos de adquisición a menudo deben ajustarse y modificarse mientras se encuentran en el campo, una vez que se recopilan y analizan algunos datos preliminares. Cuando este es el caso, las calibraciones preliminares que son necesarias para la adquisición óptima de datos a menudo pueden ser una experiencia algo estresante, especialmente si los espectadores esperan obtener resultados inmediatos y hacen la pregunta más común y molesta: "¿Ya ha encontrado algo?" (figura 2.4) cuando esto ocurre, todo lo que uno puede hacer es explicar cortésmente que se debe pensar mucho en el análisis preliminar de las condiciones del terreno antes de que se disponga de resultados, y luego

volver al trabajo. Como se discutirá más adelante, se debe reflexionar mucho sobre cuáles serán los procedimientos óptimos de recopilación de datos de Georadar para cada área de estudio antes de recopilar y almacenar el primer perfil de reflexión útil en el medio de almacenamiento de la computadora.



**Figura 2.4:** ¿Ya ha encontrado algo? Explicando cortésmente que se debe pensar mucho en el análisis preliminar del terreno

Una vez que se han adquirido los datos de Georadar en el campo y se han registrado digitalmente en una computadora, se dispone de una amplia variedad de técnicas de procesamiento e interpretación de datos. Dependiendo de las preguntas que se pretende responder y de la calidad de los datos de reflexión del radar adquiridos, estas técnicas de procesamiento también pueden variarse y modificarse para satisfacer necesidades específicas. Para poder comprender e interpretar completamente los datos de reflexión de Georadar, el usuario debe comprender primero los aspectos teóricos básicos de la propagación de energía electromagnética, así como los métodos de recolección de Georadar. Solo entonces tendrán significado las técnicas de procesamiento de datos, posteriores a la adquisición y la interpretación del producto final.

Algunos de los aspectos más detallados y complicados del método de Georadar, que no son inmediatamente aplicables a las investigaciones generales, como la teoría electromagnética compleja, las ecuaciones utilizadas en el procesamiento de datos y los detalles sobre los componentes esquemáticos del equipo se mantienen al mínimo en este libro. Estos temas un tanto “esotéricos” pueden ser abordados por un ingeniero geofísico, un técnico de radar o un ingeniero eléctrico o en

electrónica, o estudiados con mayor detalle a partir de las referencias citadas. Este libro incluye solo aspectos de aquellos temas que son más importantes para la recopilación, procesamiento e interpretación de la mayoría de las bases de datos de Georadar para la mayoría de las aplicaciones arqueológicas, geológicas, geotécnicas y de ingeniería civil, entre otras que pasan de largo por mi mente en este momento.

La adquisición de radares de penetración terrestre se está volviendo más simple y el procesamiento de datos más intuitivo para la mayoría de los usuarios. Aun así, como a mediados de la década de 1990, algunos geocientíficos supuestamente bien preparados con amplios conocimientos técnicos se han quejado de que los datos de Georadar son demasiado complejos, costosos y difíciles de procesar para la comunidad de algunos estudiosos de la tierra (Meats 1996). En la actualidad muchos arqueólogos, especialmente en Europa, todavía prefieren los métodos magnéticos y de resistividad, porque tienen una historia más larga de éxito allí y los datos de esos estudios suelen ser menos complicados de adquirir y procesar. Esto está cambiando rápidamente a medida que el Georadar se ha convertido en el método preferido para sitios estratigráficamente complicados en todo el mundo (Neal 2004; Gaffney 2008). En los últimos años, sin embargo, el Georadar se ha convertido en la corriente principal de la arqueología en todo el mundo y ya no es un método reservado solo para geofísicos con "cajas negras" que realizan algún tipo de "magia" en el campo. La mayoría de los arqueólogos formados en la actualidad tienen una formación científica y habilidades informáticas más que suficientes para permitirles comprender y utilizar este método tridimensional de alta definición. Por lo general, todo lo que se necesita es algo de experiencia de campo, los antecedentes que permitan procedimientos de adquisición prudente de datos, la determinación de probarlos y la paciencia para procesar e interpretar los datos una vez adquiridos.

## **HISTORIA DE GEORADAR**

La primera aplicación a gran escala del radar fue durante la Segunda Guerra Mundial, cuando los británicos y más tarde los estadounidenses utilizaron sistemas primitivos pero efectivos para detectar aviones.

La palabra radar es en realidad un acrónimo que se acuñó por primera vez en la década de 1930 para "Radio Detection and Range" (detección y alcance por radio) (Buderl 1996).

El primer intento de lo que podría llamarse un radar de penetración terrestre se realizó en Austria en la década de 1920 para determinar el espesor del hielo en un glaciar (Stern 1929). Los aspectos de penetración en el suelo de la tecnología de radar se olvidaron en gran medida hasta

finales de la década de 1950, cuando los técnicos de radar de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos a bordo de los aviones notaron que sus pulsos de radar estaban penetrando el hielo glacial cuando volaban sobre Groenlandia. Se produjeron una serie de contratiempos porque los analistas de radares aéreos detectaban la superficie del lecho rocoso debajo del hielo y la interpretaban como la superficie del suelo, sin ver el gran espesor del hielo por encima y haciendo que los aviones se estrellaran contra los glaciares.

Esta constatación de que el radar penetraría fácilmente en el hielo condujo en última instancia a numerosas investigaciones sobre la capacidad del radar para detectar una serie de elementos subterráneos, incluidas las propiedades del suelo y el nivel freático. En 1967, la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) construyó un prototipo de sistema de Georadar y lo envió en una misión a la luna en un intento de determinar las condiciones de la superficie antes de aterrizar un vehículo tripulado (Simmons et al. 1972).

La aplicación del Georadar para localizar objetos enterrados o cavidades, como tuberías, túneles y pozos de minas (Figura 2.5) (Fullagar y Livleybrooks 1994) se reconoció de inmediato en la década de 1970, y comenzó su uso generalizado como herramienta geotécnica. Pronto se desarrollaron métodos para definir contactos litológicos (Baker 1991; Basson et al. 1994; Bristow y Jol 2003; Davis y Annan 1989; Jol y Smith 1992; van Heteren et al. 1994), fallas (Deng et al. 1994), y planos de estratificación, así como sistemas de juntas en rocas (Bjelm 1980; Cook 1973, 1975; Dolphin et al. 1974; Moffatt y Puskar 1976). Los geocientíficos del suelo y los hidrólogos también comenzaron a utilizar el Georadar para investigar las unidades de suelo enterradas y superficiales (Collins 1992; Doolittle 1982; Doolittle y Asmussen 1992; Doolittle y Collins 1995; Freeland et al. 1998; Johnson et al. 1980; Olson y Doolittle 1985; Shih y Doolittle 1984) así como la profundidad y naturaleza del nivel freático (Annan 2005; Beres y Haeni 1991; Doolittle y Asmussen 1992; van Overmeeren 1994, 1998). Trabajos más recientes han demostrado la utilidad del Georadar para mapear paquetes específicos de sedimentos para definir los ambientes deposicionales antiguos (Figura 2.3) (Barone et al. 2011; Bridge et al. 1995; Bristow et al. 1996; Bristow y Jol 2003; Grasmueck et al. 2004; Jol et al. 1996; Jol 2009; McGeary et al. 1998; Sandweiss et al. 2010; van Overmeeren 1998). También se ha estudiado la aplicación del uso de técnicas de Georadar para localizar municiones sin detonar y minas terrestres, lo que es muy prometedor (Bruschini et al. 1998; Daniels 2004). Los ingenieros civiles y estructurales han utilizado Georadar para mapear las estructuras del pavimento de carreteras y han aplicado esos datos a la inspección del

interior de muchos medios diferentes (Al-Qadi y Lahouar 2005; Hugenschmidt et al. 1998 Hugenschmidt 2002;). El deseo de los científicos forenses y las agencias de aplicación de la ley de encontrar cuerpos enterrados u otros materiales ha expandido el uso de Georadar, en varios casos ubicando tumbas y, a veces, restos humanos reales de víctimas de asesinato u otros cuerpos en el suelo (Conyers 2012: 129; Damiata et al. 2012; Davenport 2001a, 2001b; Davis et al. 2000; Ivashov et al. 1998; Nobes 1999; Schultz et al. 2006; Schultz y Martin 2011; Strongman 1992; Solla et al. 2012).

La comunidad arqueológica se apresuró a comprender el potencial del uso del Georadar para localizar y ayudar a definir las características arqueológicas enterradas y las capas de suelo y sedimentos asociados. Una de las primeras aplicaciones a la arqueología se llevó a cabo en el Cañón del Chaco, Nuevo México (Vickers et al. 1976), en un intento de localizar muros enterrados a profundidades de hasta 1 metro. Se realizaron varios recorridos experimentales de antenas en cuatro sitios diferentes y se analizaron los perfiles de reflexión de papel en el campo. Se determinó que algunas de las reflexiones anómalas del radar representaban la ubicación de las paredes enterradas.

Estos estudios rudimentarios en el Cañón del Chaco fueron seguidos por una serie de aplicaciones del Georadar en arqueología. Los estudios por radar se utilizaron con éxito en la búsqueda de muros de graneros enterrados, muros de piedra y sótanos de almacenamiento subterráneos (Bevan y Kenyon 1975; Kenyon 1977). En estos primeros estudios, se reconoció que lo que se describió como "ecos de radar" se generaban desde la parte superior de las paredes enterradas, y se realizaron estimaciones de profundidad, utilizando mediciones de velocidad aproximadas para las características locales del suelo.

Los éxitos iniciales en aplicaciones arqueológicas continuaron a fines de la década de 1970 en el sitio Hala Sultan Tekke en Chipre (Fischer et al. 1980) y el sitio Ceren en El Salvador (Sheets et al. 1985). Ambos estudios de Georadar produjeron perfiles de reflexión sin procesar en forma de registros en papel que tuvieron éxito en delinear paredes profundamente enterradas, plataformas de casas y otras características arqueológicas enterradas. Estos éxitos iniciales fueron principalmente una función de material de matriz eléctricamente resistivo muy seco que era relativamente "transparente" a la propagación de energía del radar, lo que permitió una penetración profunda de la energía y produjo registros de reflexión relativamente sencillos de elementos arqueológicos enterrados que eran fáciles de interpretar.

Durante 1982 y 1983, se llevaron a cabo estudios de Georadar en un sitio histórico en Red Bay, Labrador (Canadá), en un intento de localizar



tumbas, artefactos enterrados y paredes de casas asociadas con una aldea ballenera vasca del siglo XVI (Vaughan 1986). Esta área fue una prueba extremadamente desafiante para el mapeo arqueológico mediante Georadar porque los suelos estaban húmedos y la capa superficial contenía grandes guijarros y una estratigrafía complicada que producía una variedad de registros de reflexión difíciles de interpretar. No obstante, en muchos de los perfiles del Georadar se descubrieron artefactos y características arqueológicas que fueron cubiertos hasta por 2 metros de depósitos de arena de playa y turba, los cuales fueron excavados y confirmados. Este estudio es notable porque se realizaron pruebas de velocidad y los tiempos de viaje de los pulsos de radar a posibles objetivos y se corrigieron para aproximar las profundidades del suelo antes de ser descubiertos. Se determinó que los ajuares, que consistían en huesos, no contrastaban lo suficiente con los depósitos de la playa circundante para aparecer como reflejos distintos, pero el suelo alterado en algunas tumbas aparecía como zonas de reflexión anómala en algunos perfiles de radar. Se encontró que otros reflejos significativos se generaron a partir de muros enterrados que consistían en montones de adoquines utilizados para muros y cimientos, pero eran difíciles de discriminar de otras rocas al azar.

En Japón, a mediados de la década de 1980, se llevó a cabo una serie completa de estudios de Georadar para localizar casas enterradas del siglo VI, túmulos funerarios y lo que se denominó “capas culturales” (Imai et al. 1987). Estos estudios tuvieron éxito en la identificación de antiguos pozos en viviendas con pisos de arcilla, que fueron enterradas, en algunos casos, por hasta 2 metros de piedra pómez volcánica y suelo arcilloso. La interfaz de los pisos de la casa con la piedra pómez suprayacente produjo reflejos muy distintivos que eran fácilmente reconocibles en los perfiles de Georadar. Luego, gran parte del sitio descubierto por el mapeo de Georadar fue excavado para confirmar los resultados. Se encontró que tres horizontes estratigráficos distintos (sus capas culturales) eran horizontes de suelo enterrado que contenían muchos artefactos de piedra que fueron descartados durante diferentes períodos de ocupación.

Esta importante conclusión permitió el mapeo de estos distintos suelos y las características arqueológicas asociadas y enterrados dentro de ellos en partes del sitio que no habían sido excavadas.

A lo largo de finales de la década de 1980 y principios de la de 1990, el Georadar continuó utilizándose con éxito en varios contextos arqueológicos, pero en la mayoría de los casos, estos estudios fueron lo que podría llamarse ejercicios de “búsqueda de anomalías”. Por lo general, los perfiles de Georadar sin procesar o parcialmente procesados se veían como registros en papel, o en una pantalla de computadora a

medida que se adquirirían, y se excavaban reflexiones interesantes, que posiblemente podrían tener un significado arqueológico.

Desafortunadamente, la incapacidad de discriminar los reflejos arqueológicos de los geológicos en estos estudios a menudo dejaba a los arqueólogos con la impresión de que el Georadar era, en el mejor de los casos, un método de "prueba y error".

Antes de 1993, la aplicación arqueológica más completa y exitosa de Georadar fue la empleada en el mapeo de las casas y túmulos en Japón, ya discutida (Imai et al. 1987). Estos éxitos fueron seguidos por numerosos levantamientos adicionales de Georadar en Japón, realizados por Dean Goodman y sus colegas (Conyers y Goodman 1997; Goodman y Nishimura 1993; Goodman 1994, 1996; Goodman et al. 1995, 1998). Se lograron grandes avances en estos estudios que se beneficiaron de los avances en la velocidad de procesamiento de la computadora y el desarrollo de programas de software escritos por Goodman específicamente para el procesamiento de datos de Georadar.

A principios de la década de 1990, los fabricantes de GPR comenzaron a comercializar sistemas que podían recopilar datos de reflexión como archivos digitales, almacenando grandes cantidades de datos para su posterior procesamiento y análisis. Aproximadamente al mismo tiempo, también estaban disponibles computadoras personales de bajo costo y cada vez más poderosas que podían procesar estos datos digitales de forma que antes no era posible, al menos con los presupuestos típicamente bajos. Los estudios pioneros de Goodman y sus colaboradores llevaron a muchas técnicas importantes de adquisición y procesamiento de datos de Georadar, incluidos mapas de cortes de amplitud, modelos bidimensionales simulados por computadora y reconstrucciones tridimensionales de objetos enterrados (Conyers y Goodman 1997; Goodman 1996; Goodman et al. 1998). Los estudios del Georadar en Japón descubrieron y mapearon una amplia variedad de sitios arqueológicos enterrados, incluidos hornos de cerámica, túmulos de entierro rodeados de fosos y entierros individuales revestidos de piedra (Goodman et al. 1995). En este trabajo, se encontró una amplia gama de entierros, que fueron modelados por computadora antes de la adquisición de datos para determinar el mejor equipo a usar y las configuraciones que probablemente funcionarían mejor.

La constatación de que las reflexiones del radar, medidas en el tiempo, podían traducirse en profundidad real cuando se determinaba la velocidad de la onda del radar, fue uno de los principales avances de Georadar (Imai et al. 1987; Vaughan 1986). La identificación de reflejos que corresponden a horizontes de interés también se utilizó de forma limitada para cartografiar la estratigrafía relacionada y la paleotopografía (Conyers

1995; Conyers y Spetzler 2002; Imai et al. 1987). Recientemente, la aplicación de técnicas de simulación por computadora bidimensional y procesamiento tridimensional (Boniger y Tronicke 2010; Conyers et al. 2002; Conyers 2010; Conyers y Leckebusch 2010; Goodman et al. 1995, 1998, 2004; Goodman y Piro 2013) ha demostrado que incluso los datos de radar que no producen reflejos inmediatamente visibles pueden contener valiosos datos de reflexión cuando se procesan por computadora. El uso de estas y otras nuevas técnicas de procesamiento y generación de imágenes, recientemente ha mejorado enormemente la utilidad y la velocidad de la exploración y el mapeo por Georadar.

Muchos estudiosos del subsuelo que emplean Georadar en sus sitios se preocupan principalmente solo por identificar anomalías enterradas que representan características de interés (ver, por ejemplo, Butler et al. 1994; Sternberg y McGill 1995; Tyson 1994; Valdes y Kaplan 2000). Aunque este tipo de aplicación de Georadar es valiosa, ya que los objetos enterrados se pueden identificar de inmediato, este libro ilustrará cómo los datos de reflexión del radar adquiridos en este tipo de estudios pueden mejorarse aún más mediante una serie de técnicas de procesamiento, interpretación y visualización por computadora (Conyers 2012a). Con un poco de esfuerzo adicional, la tecnología informática desarrollada recientemente permite la construcción de mapas que se pueden interpretar de manera que producirán mucha más información sobre un sitio de lo que se creía posible hace apenas unos años.

En el futuro, la capacidad del Georadar no solo para mapear de manera no invasiva estructuras enterradas y otras características culturales en profundidad real, sino también para reconstruir el paisaje antiguo de un sitio y la interacción humana con él (figura 2.5), será cada vez más importante (Conyers 2009, 2010). El filtrado por computadora y la mejora de los datos de reflexión de Georadar también se están generalizando a medida que los investigadores se familiarizan con algunas de las técnicas de procesamiento por computadora discutidas en este libro y muchas otras que están disponibles actualmente (Belina et al. 2009; Conyers 2012a: 45; Jeng 2009).



**Figura 2.5:** Localizando túneles y pozos en una mina a cielo abierto que antiguamente era subterránea y data del siglo XIX

Investigaciones recientes han mostrado y demostrado cuantitativamente que las diferencias en la calidad de los datos varían con las frecuencias de las antenas, el espaciamiento de los transectos y la densidad de reflejos a lo largo de los transectos, y los tipos de análisis de datos utilizados para mostrar el producto final (Grasmueck et al.2004; Neubauer et al.2002; Novo et al.2012).

La capacidad del Georadar para recopilar datos en un bloque tridimensional ha llevado tiempos más recientes a algunos investigadores a comenzar a analizar las amplitudes de onda reflejadas de maneras más complejas e inesperadas (Boniger y Tronicke 2010; Conyers, 2010, 2012a; Conyers et al.2002; Conyers y Leckebusch 2010; Goodman et al. 1998, 2004; Leckebusch y Peikert 2001; Leckebusch 2003; Leucci y Negri 2006). Si se puede demostrar que las amplitudes más altas denotan la ubicación de importantes características enterradas, entonces sus ubicaciones en tres dimensiones se pueden visualizar utilizando varios programas de software de imágenes. De esta manera, las reflexiones de menor amplitud se eliminan de manera efectiva del conjunto de datos, dejando solo aquellas de importancia, que pueden visualizarse en tres dimensiones (Conyers 2004). A partir de la ubicación de ciertas amplitudes de radar en el espacio, que son sustitutos de la ubicación real de las características en el suelo, se generan representaciones graficas para producir imágenes de "realidad virtual" de lo que se encuentra debajo de la superficie. Esto se ha hecho cortando el bloque (Conyers y Goodman 1997; Neubauer et al.2002) o representando gráficamente solo las

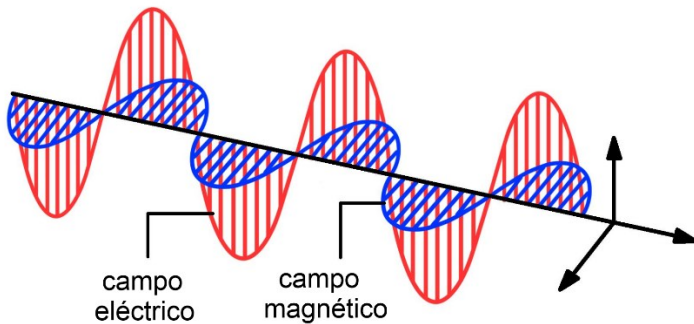
amplitudes más altas y presentando el producto final en imágenes o videos rotatorios tridimensionales (Conyers et al.2002; Goodman 1998; Goodman et al.2004; Heinz y Aigner 2003; Leckebusch y Peikert, 2001; Piro et al.2003).

Un área de estudio a la que se le ha prestado mucha atención en tiempos más recientes es la integración de múltiples conjuntos de datos geofísicos recopilados por diferentes métodos. Esta integración se ha logrado mediante una correlación matemática bastante simple (Savvaidis et al. 1999), comparación numérica (Piro et al. 2000) de amplitudes de Georadar en mapas de corte con otros mapas geofísicos, el uso de modelos estadísticos (Kvamme 2005; Marukawa y Kamei 1999) e ingresados a programas de sistemas de información geográfica (Kvamme 2003).

## CAPITULO 3

### Generación y Propagación de Energía de Radar

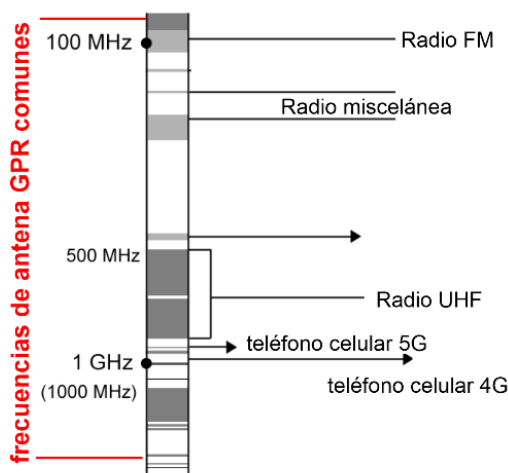
Las ondas de radar que se mueven tanto en el aire como en el suelo son una forma de energía electromagnética compuesta de campos eléctricos y magnéticos oscilantes co-unidos (figura 3.1). Estas ondas se producen cuando una corriente eléctrica oscila hacia adelante y hacia atrás en un cuerpo conductor, produciendo un campo magnético subsidiario (Kraus 1950; Rojansky 1979). Luego se generan ondas electromagnéticas que se propagan hacia afuera desde la fuente, con la parte eléctrica de la onda moviéndose perpendicular a la magnética. Si se pierde el componente magnético o eléctrico del campo (al ser atenuado, absorbido, conducido o disipado sobre un área cada vez mayor), las ondas dejarán de propagarse y morirán. La propagación de las ondas de radar se produce fácilmente en el aire o en cualquier espacio vacío y, a menos que encuentren un medio que las absorba o las refleje, viajarán una distancia infinita. Las ondas de radar son capaces de penetrar unos pocos metros o más en algunas condiciones del suelo antes de que se atenúen y se pierda la energía.



**Figura 3.1:** Una onda electromagnética que se propaga donde los campos eléctricos y magnéticos se mueven al unísono, normales entre sí.

La energía de radar utilizada por el Georadar se produce en una antena, la más simple de las cuales es un cable o placa de cobre sobre el que se aplica una corriente eléctrica oscilante. Dependiendo de la frecuencia de la oscilación (medida en ciclos por segundo), se producen diferentes longitudes de onda de las señales propagadas del georadar. Cuanto mayor sea la frecuencia de oscilación, más corta será la longitud de onda de la energía electromagnética producida y viceversa. Para

generar longitudes de onda de radar largas, se necesitan antenas más grandes con una frecuencia de oscilación más baja. Cada longitud de onda de energía que se propaga se comportará de manera diferente en diferentes medios dentro del suelo, con la energía de longitud de onda más larga a menudo propagándose más profundamente con menos reflexión de objetos pequeños y longitudes de onda más cortas penetrando solo a profundidades superficiales, pero reflejándose mucho más fácilmente en discontinuidades enterradas más pequeñas. Las longitudes de onda más cortas penetran menos profundamente porque son más fácilmente atenuadas por la mayoría de las condiciones del suelo (Conyers 2012a: 25; Leckebusch 2003; Leucci et al. 2012; Neal 2004).



**Figura 3.2:** La distribución de frecuencia electromagnética dentro de las bandas utilizadas por la mayoría de las antenas GPR. Puede haber una gran cantidad de interferencias con algunas antenas GPR, especialmente en las frecuencias de 500 a 1000 MHz, desde la televisión, el teléfono celular (móvil) y otras transmisiones de radio.

Hay muchas designaciones diferentes asignadas a las ondas electromagnéticas, cada una definida por su longitud de onda (que está determinada por la frecuencia de la fuente oscilante que las produce). La luz visual es la onda electromagnética más comúnmente reconocible, al igual que los rayos X, la radiación ultravioleta e infrarroja, las transmisiones de TV, radio y teléfonos celulares, los rayos gamma y muchos más. Las ondas de radar utilizadas por la mayoría de los sistemas Georadar ocupan una parte específica de este amplio espectro electromagnético (figura 3.2).

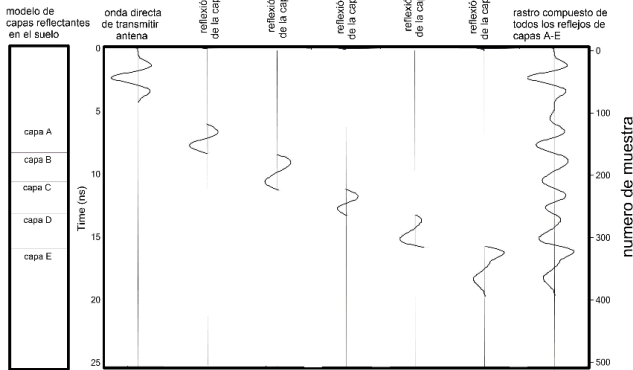
La frecuencia de propagación de las ondas de radar se mide en unidades de hercios, que se define como ciclos por segundo. Los rayos gamma, los rayos X y la luz visual tienen frecuencias de oscilación muy altas, muchos órdenes de magnitud más altas que las ondas de radar, con longitudes de onda extremadamente cortas medidas en fracciones de milímetros. Las ondas de radio, un subconjunto de las cuales son las ondas de radar comunes utilizadas para Georadar, tienen frecuencias mucho más bajas, con longitudes de onda de energía de propagación que varían desde unos pocos centímetros hasta unas pocas decenas de metros de longitud. La energía del radar utilizada en la mayoría de las aplicaciones Georadar tiene frecuencias que oscilan entre aproximadamente 10 y 1,500 MHz (1,5 GHz) (figura 3.2). Esta energía ocupa una parte del mismo espectro electromagnético que la televisión y la radio FM, los teléfonos móviles (celulares) y otros dispositivos de comunicación (figura 3.2), que recientemente ha sido la causa de cierta preocupación (en su mayoría irracional) por parte de los reguladores gubernamentales que están preocupados por la posible interferencia de la antena del Georadar con las transmisiones de comunicación (Chignell 2004).

El método de Georadar se basa en la transmisión de pulsos electromagnéticos, que luego se propagan como ondas, hacia el suelo y mide el tiempo transcurrido entre su transmisión, la reflexión de las discontinuidades enterradas y la recepción en una antena de radar de superficie. Cada cambio físico o químico en el suelo por el que pasan las ondas de radar hará que cambie su velocidad de propagación, que es lo que produce reflejos (y también hace que las ondas se difracten). Cuando ocurre la reflexión, parte de esa energía que se propaga se refleja hacia la superficie, mientras que el resto continúa propagándose y tal vez difractándose a medida que cruza más interfaces, moviéndose más profundamente en el suelo hasta que finalmente se disipa. Las discontinuidades enterradas donde ocurren reflejos generalmente son creadas por cambios en las propiedades eléctricas o magnéticas de la roca, sedimento o suelo, variaciones en su contenido de agua, cambios litológicos o cambios en la densidad aparente en las interfaces estratigráficas (Conyers 2012a: 35; Neal 2004; VanDam y Schlager 2000). Los reflejos también se generan cuando la energía del radar atraviesa las interfaces entre las características arqueológicas y la matriz circundante.

Los espacios vacíos en el suelo, que pueden encontrarse en entierros, tumbas, túneles, escondites o tuberías, también generarán reflejos de radar significativos debido a un cambio similar en la velocidad de propagación de las ondas de radar (Solla et al. 2010). Muchos límites de lecho y otras discontinuidades en el suelo reflejarán una onda de energía (una onda



sinusoidal de amplitud positiva y negativa) de regreso a la superficie para ser registrada (figura 3.3). Una combinación de muchas ondas que se registran desde muchas profundidades en el suelo produce una serie de reflejos generados en un mismo lugar, llamado traza de reflexión (figura 3.3). La amplitud de las ondas reflejadas generadas en una discontinuidad es función del grado de cambio de velocidad que ocurre en esa interfaz.



**Figura 3.3:** La generación de una traza de radar se produce a partir de una serie de ondas, definidas como una onda sinusoidal de una desviación tanto positiva como negativa de la media. Cada reflejo se genera a lo largo de capas en el suelo de diferente composición y saturación de agua, lo que cambia la velocidad de las ondas y produce los reflejos. Una combinación de todas las ondículas registradas (a la derecha) es una traza registrada en una ubicación en el suelo compuesta por muchas reflexiones de muchas interfaces enterradas. Las trazas se registran como valores digitales, en este caso 512 muestras durante la ventana de tiempo de 25 nanosegundos en la que se registraron.

Las discontinuidades enterradas donde se crean los reflejos suelen ser causadas por diferencias de saturación de agua dentro de esas unidades (Conyers 2012a: 35; Neal 2004; Turesson 2006), que es lo que generalmente produce los cambios de velocidad que generan los reflejos de las ondas. Si bien, los cambios visibles o fácilmente medibles en los límites de los materiales son lo que generalmente se cree que crean reflejos de radar, en realidad la variable más importante es el cambio en la saturación de agua en esas interfaces.

## GENERACIÓN Y REGISTRO DE ONDAS DE GEORADAR

Para recolectar reflexiones de Georadar, antenas emparejadas o múltiples antenas en una matriz se mueven a lo largo del suelo en transectos (figura 3.4) generalmente dentro de cuadrículas. Una o más antenas generan ondas de radar que se propagan, y una segunda antena

emparejada (o múltiples antenas receptoras en una matriz) registran las trazas de reflexión generadas a partir de las interfaces en el subsuelo. Cuando muchos cientos o miles de trazas de reflexión se apilan secuencialmente a medida que se recogen a lo largo de un transecto de antena, se produce un perfil de reflexión, como en la figura 2.3. Si se incorporan unidades GPS (figura 2.1) con las antenas de superficie, el movimiento de las antenas no necesita ser lineal, ya que su ubicación puede registrarse durante la recolección. Con la ayuda de una computadora, los reflejos de miles de trazas dentro de muchos perfiles en una cuadrícula se pueden convertir posteriormente a profundidad en el suelo, y se puede analizar la fuerza de las ondas reflejadas, produciendo imágenes que retratan la naturaleza de los materiales en el suelo en tres dimensiones.



**Figura 3.4:** Los perfiles de reflexión se recogen mediante antenas en movimiento, aquí antenas de frecuencia central de 400 MHz, a lo largo del suelo en transectos separados por 1 metro. Cada perfil consta de muchos cientos o miles de trazas de reflexión individuales a lo largo de cada línea de levantamiento.

Las antenas de radar suelen estar alojadas en un trineo de fibra de vidrio o plástico que se coloca directamente en el suelo (figura 3.5) o se apoya sobre ruedas a unos centímetros del suelo. Los sistemas Georadar comerciales pueden tener antenas que se montan de diferentes formas, pero todas intentan colocarlas en la superficie del suelo o cerca de ella. Cuando se emplean dos antenas, que es el método más común de recolección, una se usa como transmisor y la otra como receptora. A esto se le llama modo biestático. Una sola antena también se puede utilizar como transmisor y receptor, en lo que se llama un sistema monoestático. En este tipo de recopilación

de datos, que generalmente se emplea solo con antenas muy grandes, la misma antena se enciende para transmitir un pulso de radar y luego se cambia inmediatamente al modo de recepción para detectar y medir las ondas reflejadas que regresan desde el interior del suelo. Los sistemas Georadar multicanal también están disponibles comercialmente y pueden enviar y recibir desde múltiples antenas simultáneamente, pero actualmente son bastante costosos y el software que puede procesar los enormes conjuntos de datos producidos aún se está desarrollando (Conyers y Leckebusch 2010; Trinks et al. 2010). Los investigadores también están desarrollando conjuntos de antenas que potencialmente pueden recibir reflejos en decenas o incluso cientos de antenas de superficie en una cuadrícula grande, las cuales pueden producir imágenes tridimensionales precisas del subsuelo de manera muy similar a como lo hace el método sísmico para el procesamiento de petróleo y gas (Leucci et al. 2012; Novo et al.2012; Udphuay et al.2010), pero estos también han tenido una aplicación arqueológica limitada (Leckebusch 2000).



**Figura 3.5:** Las antenas se pueden conectar a la rueda del codificador, que se pueden configurar para recopilar un número determinado de trazos de reflexión a cada distancia programada a lo largo del suelo.

Las antenas generalmente se remolcan a mano a lo largo de los transectos de la prospección (figura 3.4) aproximadamente a la velocidad a la que alguien puede caminar, pero también se pueden arrastrar detrás

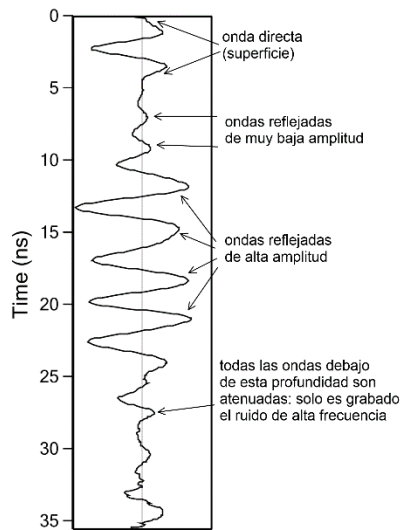
de un vehículo, remolcadas por un bote en un lago (Conyers 2012a: 75; Conyers y Leckebusch 2010; Leckebusch 2003), o incluso suspendidas de un helicóptero. La mayoría de los sistemas de Georadar son capaces de generar y recolectar trazas de reflexión a una velocidad muy alta y pueden ser arrastrados detrás de vehículos en una carretera a velocidades bastante altas.

Los sistemas de radar de penetración terrestre también tienen la capacidad de recolectar trazas de reflexión individuales en pasos a lo largo de un transecto en lugar de moverse continuamente. Este método solía ser mucho más común en el pasado con algunos sistemas de Georadar, pero se ha discontinuado en gran medida, excepto en los métodos de investigación especializados, como la recopilación de compensación múltiple, que se analizará en el capítulo 6. Durante la adquisición de datos por pasos, entre menor sea el espacio entre pasos, mayor es el número de trazas de reflexión registrados por unidad de distancia, con un aumento correspondiente en la cobertura del subsuelo y, por lo tanto, en la resolución. El método de adquisición por pasos requiere más tiempo de campo porque las antenas deben moverse manualmente a cada paso para que se registre cada traza de reflexión y, por lo tanto, se pueden adquirir menos datos en una cantidad de tiempo determinada. La mayoría de los sistemas que se utilizan hoy en día se pueden programar para recopilar datos con una rueda topográfica (odómetro o codificador), o algún dispositivo similar que pueda medir la distancia en la que se encuentran las antenas a lo largo de cada transecto, lo cual puede acelerar el procesamiento de datos, ya que a todos los trazos de reflexión registrados se les puede asignar una ubicación específica en la superficie. (figura 3.5). Un avance reciente en la recopilación es el uso de sistemas de posicionamiento global o estaciones totales topográficas de seguimiento automático para medir la distancia y la ubicación de las antenas en el suelo, y su uso se está volviendo bastante común (Grasmueck et al.2004; Lehmann y Green 1999).

## **PROCEDIMIENTOS DE ADQUISICIÓN**

Por lo general, las antenas se colocan directamente en la superficie del suelo o lo más cerca posible del suelo. Si las antenas están ubicadas demasiado alto por encima de la superficie del suelo, la energía no se acoplará de manera eficaz y luego no penetrará en ella. Cuando las antenas están demasiado muy por encima del suelo, mucha energía transmitida se refleja de regreso a la antena receptora desde la interfaz aire-tierra, dejando poca energía para penetrar más profundamente en el suelo.

Aunque la fuente de energía transmitida puede considerarse como un pulso de radar distinto generado por la antena de superficie, esta percepción no es técnicamente correcta. La mayoría de los sistemas de Georadar transmiten pulsos de radar a velocidades extremadamente altas que van de hasta 120.000 pulsos por segundo, pero la digitalización en la mayoría de los sistemas no es lo suficientemente rápida para muestrear las ondas reflejadas que se reciben de cualquiera de estos diferentes pulsos (Leckebusch 2003). Para solventar este problema, la mayoría de los sistemas de control de radar utilizan métodos de muestreo incremental que producen una traza de reflexión compuesta registrando la primera muestra digital dentro de una traza de la energía reflejada que llega del primer pulso transmitido. La segunda muestra se registra desde el segundo pulso y así sucesivamente hasta que se construye una traza de reflexión completa. Por lo tanto, puede tomar 512 o más muestras, del mismo número de pulsos producidos consecutivamente, para compilar el registro de una traza de reflexión completa (figura 3.6).



**Figura 3.6:** En la parte superior de cada traza hay una onda directa (onda superficial) producida por la energía que se mueve directamente desde la antena transmisora a la antena receptora. Todas las demás ondas registradas dentro de la ventana de tiempo (en este caso, 36 nanosegundos de tiempo de viaje bidireccional) varían en amplitud dependiendo de las variaciones en los tipos de materiales en el suelo a lo largo de las interfaces que generan esas ondas reflejadas. En todos los casos, a cierta profundidad en el suelo (aquí unos 27 nanosegundos), todas las ondas coherentes que se han movido a través del suelo y se han reflejado de regreso a la superficie se han atenuado y solo se registra el ruido de fondo, en este caso hasta la profundidad máxima registrada, de 36 nanosegundos.

La mayoría de los usuarios de Georadar recopilan un mínimo de 512 muestras para registrar cada trazo de reflexión, aunque éste número se puede definir en la configuración de la mayoría de los sistemas de Georadar. Muchos sistemas Georadar tienen software con comandos predeterminados que dictan cuántas muestras deben usarse para definir una traza, pero se pueden programar manualmente para recolectar cualquier cantidad de muestras que se considere necesaria.

En la adquisición continua de datos, si las antenas se mueven por el suelo a una velocidad de caminata promedio, el muestreo incremental creará un promedio menor de los reflejos registrados a medida que cambian las condiciones en el subsuelo. Este procedimiento de promediado suele ser insignificante porque ocurre muy rápidamente y afectaría los datos registrados solo si las características y capas del subsuelo fueran extremadamente variables o las antenas se movieran a alta velocidad a lo largo del suelo.

El método por pasos de adquisición de datos utiliza en general el mismo método, excepto que los datos de reflexión en una traza se reciben y registran en cada intervalo de paso. Cuando las antenas se mueven al siguiente paso, se adquiere nuevamente una traza de reflexión y se registra digitalmente como 512 o más muestras. Si las antenas están configuradas para la adquisición en el método de pasos, se emite un zumbido o alguna otra forma de aviso después de que se adquiere cada trazo de reflexión en una estación, indicándole al operador de la antena que mueva las antenas a la siguiente estación a lo largo de un transecto previamente establecido.

Las antenas generalmente se conectan mediante un cable a la unidad de control del Georadar (figura 3.7). Algunos sistemas registran digitalmente los datos de reflexión directamente en la antena y la señal digital se envía a través de cables de fibra óptica de regreso al módulo de control (Davis y Annan 1992; Neal 2004). Otros envían una señal analógica desde las antenas, a través de cables coaxiales, a la unidad de control donde se digitalizan y almacenan las formas de las ondas de reflexión. También es posible utilizar la transmisión inalámbrica de datos desde las antenas a un sistema de control, lo que permite prescindir de todos los cables (Trinks et al. 2010). Todos los fabricantes de Georadar hoy en día tienen sistemas que pueden ser utilizados por una sola persona, con la unidad de control del Georadar, la fuente de energía y las antenas colocadas en un carro con ruedas o en una mochila para su transporte y operación dentro de una malla (figura 3.7).

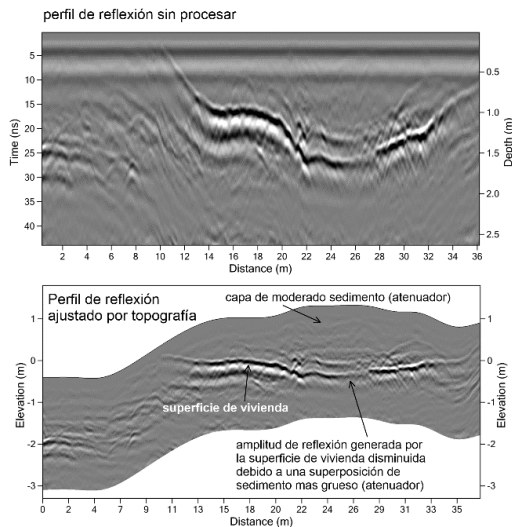


**Figura 3.7:** Algunos sistemas GPR se pueden montar en un carro para que los opere una persona con el codificador que mide la distancia y coloca trazas en el espacio operado por la rueda del carro.

Para crear una visualización vertical de las reflexiones del subsuelo, todas las trazas de reflexión registradas, sin importar el método de adquisición, se muestran en un formato en el que el tiempo de viaje en dos direcciones o la profundidad aproximada de las ondas reflejadas se trazan en el eje vertical con la ubicación de la superficie en el eje horizontal (figura 2.3). En los perfiles de reflexión bidimensionales estándar que se producen al mover las antenas continuamente por el suelo, se generan pulsos de energía de radar en un intervalo de tiempo establecido, y la escala horizontal variará debido a los cambios en la velocidad a la que se mueven las antenas. Dependiendo de la variabilidad en la velocidad a la que se arrastran las antenas a lo largo del suelo, el número de trazas de reflexión recolectadas por unidad de distancia recorrida también variará, haciendo que la escala horizontal no sea lineal. Las ruedas del codificador u otros sistemas de medición conectados a las antenas se pueden usar para colocar las trazas con precisión en el espacio. Cuando los datos se recopilan continuamente sin una rueda de levantamiento, se deben colocar marcadores manuales en la cadena de datos a distancias conocidas a lo largo del transecto, y la escala horizontal de los perfiles se puede ajustar más tarde (Shih y Doolittle 1984). Estos marcadores de ubicación colocados en los datos de reflexión registrados se denominan marcas fiduciales. Los métodos de procesamiento por computadora (discutidos en el capítulo 6) pueden entonces corregir la escala horizontal, interpolando entre las marcas fiduciales y expandiendo o contrayendo el espaciado de las trazas de reflexión entre estas ubicaciones conocidas para crear una escala horizontal lineal uniformemente espaciada. En el método de

adquisición por pasos o rueda topográfica, la escala horizontal se establece por la distancia entre las estaciones de adquisición, o el número de trazas programadas para ser recolectadas por unidad de distancia a lo largo del suelo, y generalmente no es necesario un ajuste horizontal durante el procesamiento posterior a la adquisición. La mayoría del software de visualización permite que la escala horizontal o los perfiles de reflexión se ajusten automáticamente a la distancia para visualizar los reflejos.

La escala vertical en todos los perfiles Georadar se mide en tiempo de viaje en dos direcciones, pero se puede convertir a profundidad aproximada si se conoce la velocidad de la energía del radar en el suelo. El procesamiento por computadora posterior a la adquisición, que se analiza en el capítulo 6, generalmente ajusta las escalas verticales y horizontales para crear perfiles con cualquier escala vertical u horizontal o exageración deseada. Si hay una variación de elevación significativa a lo largo de un transecto de levantamiento, también se deben hacer correcciones topográficas que ajustarán las reflexiones registradas para las irregularidades de la superficie del terreno (figura 3.8). Esto solo se puede lograr si se realiza un levantamiento topográfico de la superficie del suelo. Si se utilizan sistemas GPS, los datos de elevación se pueden recopilar fácilmente y los ajustes topográficos son automáticos en algunos programas de procesamiento de datos.



**Figura 3.8:** Si los perfiles se recolectan sobre un terreno que varía en elevación, las trazas registradas desde el interior del terreno deben ajustarse a la topografía. El perfil superior muestra los datos sin procesar de las trazas y el perfil inferior está ajustado para la elevación. Cuando se hace esto, se puede producir una vista más realista de los reflejos en el suelo, como se puede ver en la superficie de vivienda más horizontal en el perfil inferior.



La recopilación de datos puede ocurrir muy rápido con tres o más personas ayudando en el campo para ayudar a despejar el terreno y asegurarse de que las antenas se muevan dentro de las rejillas designadas. Sin embargo, con los sistemas portátiles ahora comunes, una persona a veces puede recopilar los datos por sí sola. Si hay más de una persona disponible, se puede asignar un ayudante para tirar de las antenas a lo largo de los transectos de la cuadrícula estudiados. Otro puede sostener la unidad de control para ver los datos de reflexión que llegan a través de la pantalla de la computadora y tomar notas de los reflejos significativos a medida que se registran y generalmente está atada a la antena a través de algún tipo de cable (figura 3.5). Una tercera persona es útil para asegurarse de que los cables de la antena no se enganchen en los obstáculos de la superficie, ayudar a maniobrar las antenas cuando sea necesario, despejar los escombros de la superficie de los transectos y mover cintas métricas o líneas de medición para cada transecto si así es como se recopilan los datos. Parte de esta mano de obra se puede ahorrar si se utiliza un carro para mover el sistema de control con las antenas conectadas (figura 3.5).

Un aspecto importante de mover las antenas a lo largo del suelo es asegurarse de que las antenas estén en la misma orientación y a la misma distancia sobre el suelo o tocándolo directamente en todo momento. Los cambios en la orientación de la antena con respecto al suelo pueden potencialmente causar variaciones en los reflejos que pueden confundirse con variaciones de material "reales" en el suelo. Este fenómeno se denomina pérdida de acoplamiento y sus derivaciones se analizarán más adelante en este capítulo.

Antes de adquirir datos de reflexión a lo largo de un transecto lineal, la persona que trabaja con la unidad de control debe anotar en una libreta de campo el número de transecto de la cuadrícula y el número de archivo correspondiente en el que se guardarán los datos de reflexión. Esta tarea no puede ser subestimada porque incluso los sistemas de almacenamiento de computadora más sofisticados a veces pueden "perder" misteriosamente datos (generalmente debido a un error del operador), y solo un registro escrito a mano reconstruirá los procedimientos usados en el campo. Los datos de reflexión se numeran secuencialmente, pero a menos que se utilicen sistemas GPS para ubicar todos los perfiles en el espacio, se necesitan notas para poder reconstruir qué perfiles se recolectaron en qué ubicación y orientación en la superficie del suelo. Por lo general, se encuentran obstrucciones en la superficie, y los árboles grandes u otros objetos tanto en la superficie como en el suelo que posiblemente podrían reflejar la energía del radar, también deben documentarse para cada transecto y anotarse su ubicación aproximada. Muchos otros procedimientos de adquisición más comunes a los estudios

geológicos están disponibles en otros lugares (Jol y Bristow 2003; Neal 2004).

## RECOLECCIÓN DE TRANSECTOS EN MALLAS

Muchas de las aplicaciones requieren la adquisición de datos de Georadar en una cuadrícula rectilínea sobre el área a estudiar (Doolittle y Miller 1991), pero esto no es absolutamente necesario con los avances recientes en la ubicación con GPS (Trinks et al. 2010). Si la cuadrícula está orientada hacia el norte, entonces los transectos de la prospección se pueden adquirir en las orientaciones norte-sur o este-oeste (o ambas, si se desea). La rejilla debe situarse de manera que se eviten obstáculos en la superficie y debe ubicarse en el terreno más plano y horizontal posible. Incluso con la ubicación GPS, generalmente es necesario determinar dónde se recopilarán los datos dentro de una cuadrícula para que toda el área de interés esté completamente levantada. Cuando hay obstrucciones en la superficie, se puede construir fácilmente un patrón de cuadrícula con transectos de levantamiento de diferentes longitudes para evitar los obstáculos, lo que a menudo crea un patrón de cuadrícula complejo. Hay programas de computadora disponibles que procesarán los datos de reflexión de cualquier patrón de cuadrícula, siempre que los transectos de la antena estén colocados con precisión en el espacio. La mayoría del software de cartografía que no está integrado con GPS requiere que los datos se recopilen en algún sistema de coordenadas cartesianas con perfiles paralelos o perpendiculares entre sí. Si se sabe que hay tuberías, túneles o cables eléctricos enterrados, su ubicación debe identificarse con anticipación y la rejilla para fines arqueológicos debe ubicarse de manera que los evite. Cuando esto no es posible, su ubicación a menudo se puede determinar identificando los reflejos derivados de ellos cuando se interpretan los datos. Los perfiles también deben recopilarse perpendiculares a tuberías u otros elementos lineales conocidos, si es posible.

Las cuadrículas rectangulares o rectilíneas son preferibles a otros diseños de cuadrículas cuando se utiliza el software de visualización y mapeo más común. De esta manera, los datos digitales de reflexión recopilados como transectos paralelos o perpendiculares en una cuadrícula se pueden exportar fácilmente a pantallas de computadora y programas de procesamiento de imágenes que casi siempre están preestablecidos para este método de cuadrícula. De esta manera, los datos se pueden procesar rápidamente para obtener imágenes y luego interpretarlos sin realizar un levantamiento de transectos que requiere mucho tiempo ni la rectificación espacial que es necesaria con otros

métodos de recolección. Con una cuadrícula rectangular, los reflejos importantes en cada perfil se pueden correlacionar inmediatamente, y los reflejos se pueden "ligar" visualmente a transectos paralelos o perpendiculares a lo largo de la cuadrícula. En todos los casos, se debe hacer un bosquejo de la cuadrícula con notas sobre la longitud del transecto, la orientación y la ubicación inicial y final de cada transecto.

Los patrones de cuadrícula rectilíneos simples no siempre son posibles o deseables cuando se realizan algunos levantamientos de Georadar. En algunos casos, las condiciones de la superficie o las limitaciones de tiempo pueden requerir una serie de transectos separados no paralelos que aún pueden producir una buena cobertura del subsuelo. Se debe tener cuidado al configurar una cuadrícula no rectangular para que las ubicaciones de todos los transectos se muestren con precisión y los datos de reflexión adquiridos puedan mapearse con precisión en tres dimensiones. Cuando se recopilan cuadrículas de este tipo, los datos de reflexión generalmente deben interpretarse manualmente, y la elaboración de mapas puede llevar mucho tiempo y ser tediosa. Este no es el caso si se utilizan sistemas integrados de GPS para determinar una ubicación exacta para cada transecto de antena. A veces se han utilizado transectos de levantamientos que irradian hacia afuera desde un área central, por ejemplo, para definir un foso alrededor de una estructura central similar a una fortaleza (Bevan 1977). También se ha utilizado con éxito un patrón de cuadrícula romboidal en América Central dentro de un campo de caña de azúcar en la ladera de una colina donde las antenas, por necesidad, tenían que colocarse entre las hileras de caña plantadas (Conyers 1995). Se recogieron perfiles de reflexión sinuosos, ninguno de los cuales era recto o paralelo entre sí, mientras se remolcaban las antenas sobre la superficie de un lago en Suiza (Leckebusch 2003). Una cuadrícula muy complicada de perfiles sinuosos fue el producto de que el barco se alejó de las líneas flotantes de levantamiento, lo que requirió un complejo ajuste espacial antes de la interpretación. Aunque todos estos levantamientos no rectilíneos requirieron tiempo adicional de procesamiento de datos para rectificar espacialmente todos los reflejos registrados (Trinks et al. 2010), finalmente resultaron tan útiles como los adquiridos en cuadrículas rectangulares.

Todas las cuadrículas deben ser inspeccionadas con precisión y ubicadas dentro de un mapa general del sitio utilizando algún tipo de técnica de topografía antes o después de la adquisición de los datos de Georadar. Como mínimo, las esquinas de cada cuadrícula (si son rectangulares) deben ubicarse con precisión y se debe tener cuidado de que todos los transectos sean paralelos o perpendiculares entre sí dentro de ella. Esta parte del proceso de adquisición de datos de Georadar a veces

puede ser la parte más tediosa de un levantamiento, pero es extremadamente importante. Cuando la superficie del suelo es rugosa, desigual o inclinada, se deben obtener elevaciones topográficas estrechamente espaciadas a lo largo de cada transecto de levantamiento para que se puedan hacer correcciones de los reflejos del subsuelo durante el procesamiento posterior a la adquisición (Sun y Young 1995). Si el terreno tiene una pendiente uniforme, es posible que solo sea necesario el levantamiento de niveles en los comienzos, los finales y algunas elevaciones a lo largo de cada transecto, o en cada cambio de pendiente, y luego interpolar las elevaciones intermedias para ahorrar tiempo de levantamiento (figura 3.8). Cuando las irregularidades de la superficie son numerosas, el levantamiento topográfico debe realizarse a intervalos más frecuentes (quizás cada metro o menos), y el procesamiento de datos se vuelve más complicado. La ubicación de cualquier característica (objeto, irregularidad, etc.) de la superficie que pueda reflejar la energía del radar también debe mapearse al mismo tiempo. Los árboles, ramas elevadas, casas u otros objetos deben ubicarse con precisión y colocarse en mapas topográficos para que, cuando los datos de reflexión se procesen posteriormente, se puedan descartar los reflejos que podrían haberse generado a partir de ellos.

Ocasionalmente existe la necesidad de determinar inmediatamente la ubicación de importantes reflejos subterráneos sin necesidad real de producir un mapa regional del sitio. Esto es común en el uso del Georadar para la ubicación de servicios públicos u otras aplicaciones de ingeniería donde se necesitan interpretaciones inmediatas. En este método de recopilación, los perfiles de reflexión en bruto se recopilan y, a veces, se procesan en “tiempo real”, y luego se interpretan de inmediato cuando las antenas se mueven al azar por el suelo. Puede que ni siquiera sea necesario configurar una cuadrícula, y posiblemente uno podría simplemente deambular por un sitio, produciendo registros de reflexión hasta que una anomalía de reflexión sea visible en la pantalla de la computadora. Los lugares de reflexión significativos se podrían marcar en el suelo con banderolas o tiza a medida que se identifican en la pantalla de la computadora. Esta es una forma extremadamente fácil de realizar un levantamiento de Georadar (y bastante divertida, ya que se obtienen resultados instantáneos) pero está llena de trampas en la mayoría de los contextos. En su mayor parte, es difícil identificar inmediatamente anomalías importantes en los perfiles de reflexión sin procesar a medida que aparecen en la pantalla de la computadora o en las impresiones en papel. A menudo, los reflejos importantes no aparecen (o no son reconocibles) hasta que las antenas se han movido más allá del objeto(s) en el subsuelo que los produce, y luego uno debe estimar su ubicación

después de haber pasado. Para superar este problema, la mayoría de los fabricantes de sistemas de Georadar han producido sistemas que pueden realizar copias de seguridad y luego repetir varias veces la recopilación de datos sobre los objetos de interés enterrados hasta que su ubicación esté bien definida. Este tipo de "resultados instantáneos" de adquisición de datos y método de interpretación del perfil de reflexión nunca debe utilizarse en lugar de los métodos de adquisición de datos más estándar para la mayoría de las aplicaciones, que consiste en recopilar perfiles rectos en cuadrículas rectilíneas para su posterior procesamiento. La mayoría de las veces, los datos deben procesarse después de la recopilación de diversas formas para producir imágenes que puedan interpretarse con precisión (Conyers 2012a).

La energía del radar pasará fácilmente a través del hielo y el agua dulce hacia el sedimento subyacente, revelando objetos en y debajo del fondo de los lagos o ríos (Annan y Davis 1977; Conyers 2012a: 74; Fuchs et al. 2004; Jol y Albrecht 2004; Leckebusch 2003). Las antenas de radar también pueden flotar fácilmente a través de la superficie de un lago o río y directamente a la orilla, mientras se recopilan datos del subsuelo o incluso se pueden remolcar sobre un río (Conyers 2012a: 75; Haeni et al. 2000). Sin embargo, estas técnicas no funcionarán en agua salada o incluso ligeramente salobre porque la alta conductividad eléctrica del agua salina disipará rápidamente la energía electromagnética que se propaga a medida que ingresa a la columna de agua, sin dejar que la energía se transmita a la profundidad o se refleje de vuelta hacia la superficie. Algunos estudios recientes de Georadar que se llevaron a cabo mediante antenas colgantes desde un helicóptero que volaba a baja altura produjeron un reflejo distintivo del suelo y reflejos menos distintivos del subsuelo, pero aún reconocibles.

Por conveniencia, durante todos los métodos de recolección donde las antenas se mueven en transectos, los perfiles generalmente se recolectan en un patrón sinuoso. De esta manera, se recoge un transecto de antena moviéndose en una dirección en el primer transecto y luego en la dirección opuesta en el siguiente transecto paralelo, desplazado a cierta distancia. Este patrón de recolección se continúa luego hasta que se adquieren todos los transectos en una cuadrícula y se cubre todo el terreno de interés. Los transectos transversales o perpendiculares se pueden medir de la misma manera dentro de la misma cuadrícula, si es necesario. Si los datos de reflexión se almacenan digitalmente, programas de computadora simples pueden luego revertir todas las trazas registradas para la mitad de los transectos adquiridos para que todos los perfiles de reflexión producidos dentro de una cuadrícula tengan la misma orientación con respecto a un datum o línea de base levantados. Con los sistemas GPS se

puede recopilar un perfil largo y continuo y todos los datos se colocan en el espacio automáticamente, y los archivos de datos individuales no se usan necesariamente (pero debido a que su tamaño pronto se volverá difícil de manejar, generalmente se necesitan múltiples perfiles).

## **REGISTRO DE DATOS**

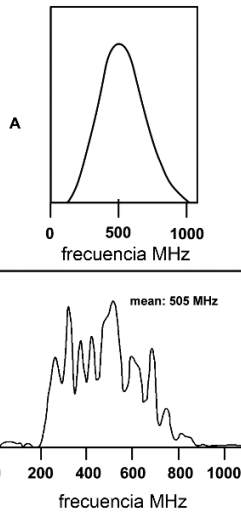
Para la mayoría de las recopilaciones estándar de datos de Georadar, se mide el tiempo transcurrido entre la generación del pulso del radar, la reflexión de las interfaces en el suelo y el registro final de la onda reflejada en la antena receptora. La amplitud y longitud de onda de las ondas de radar reflejadas recibidas en la superficie se amplifican, procesan y registran digitalmente para su visualización inmediata en una pantalla de computadora y se almacenan en algún tipo de medio digital para su procesamiento y visualización posteriores a la adquisición. Las reflexiones de radar siempre se registran en tiempo bidireccional porque ese es el tiempo que tarda una onda de radar en viajar desde la antena de transmisión de superficie al suelo, reflejarse en una discontinuidad y luego viajar de regreso a la superficie para ser detectada en la antena receptora y grabado.

Antes de principios de la década de 1980, las unidades de Georadar solo podían producir copias en papel de reflejos sin procesar. Fue solo con el desarrollo de los sistemas digitales en la década de 1980 que el Georadar vino a ser la herramienta útil en la que se ha convertido (Annan y Davis 1992; Conyers 1995; Geophysical Survey Systems 1987) ya que se podían producir imágenes que se procesaban y ajustaban de muchas maneras, haciéndolas más interpretables. Las unidades digitales ahora han reemplazado totalmente a todos los sistemas analógicos más anticuados y son el estándar para todos los estudios de Georadar. Los datos de reflexión se transfieren fácilmente a una variedad de medios de almacenamiento para ser procesados en computadoras portátiles, a menudo cuando todavía se está en el campo. Aunque a veces se pueden adquirir buenos datos con las unidades analógicas más antiguas que se han convertido a sistemas digitales. Posteriormente, los datos se guardan en el disco duro de una computadora o en una cinta digital y, más recientemente, en chips de memoria flash.

## **VARIABLES DE ANTENA**

Una de las variables más importantes en los levantamientos de Georadar es la selección de antenas con la frecuencia operativa correcta para la profundidad necesaria y la resolución de las características de

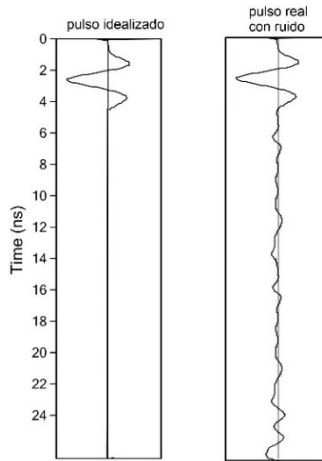
interés (Huggenberger et al. 1994; Smith y Jol 1995). Las antenas comerciales de Georadar que se utilizan en la mayoría de las aplicaciones varían entre 10 y 1500 MHz de frecuencia central (Annan y Cosway 1994; Fenner 1992; Jol y Bristow 2003; Malagodi et al. 1996; Neal 2004; Olson y Doolittle 1985;). Los sistemas de Georadar de propósito general usan antenas del tipo dipolo que típicamente tienen un ancho de banda de dos octavas, lo que significa que las frecuencias varían entre la mitad y dos veces la frecuencia central. Por ejemplo, una antena de frecuencia central de 400 MHz genera energía con longitudes de onda que van desde aprox. 200 a 800 MHz. La distribución de frecuencia de una onda idealizada de 500 MHz, tiene forma de campana alrededor de una frecuencia media, como se muestra en la figura 3.9. En realidad, dependiendo de los componentes eléctricos y el diseño de cada antena individual, la distribución de frecuencia rara vez tiene forma de campana, sino a menudo una distribución asimétrica "puntiaguda" alrededor de una frecuencia media. La figura 3.9 ilustra la distribución real de frecuencia en forma de "corbata de moño" derivada de un pulso de radar creado a partir de una antena de 500 MHz que muestra picos en varias frecuencias con una frecuencia media de aproximadamente 505 MHz. Estas variaciones en las frecuencias pueden ser causadas por irregularidades en la superficie de la antena (una placa de cobre en forma de corbata de moño), otros componentes electrónicos ubicados dentro del sistema de antena o ruido dentro del propio sistema de Georadar. Las variaciones de este tipo son comunes en todas las antenas y cada una tiene sus propias irregularidades, lo que produce una firma de pulso diferente y frecuencias dominantes diferentes. Lo más importante es que el hecho de que un fabricante mencione que determinada antena trabaja con determinada frecuencia no significa necesariamente que producirá energía de radar con centro exactamente en esa frecuencia.



**Figura 3.9:** La mayoría de las antenas utilizadas en arqueología transmiten a frecuencias que varían una octava (de la mitad a dos veces la media) alrededor de una frecuencia central. Con esta antena, la distribución teórica de la energía transmitida desde una antena de 500 MHz debería ser una distribución en forma de campana, con una energía que varíe entre 250 y 1000 MHz (A). Se encontró que la distribución de frecuencia real de esta antena de 500 MHz (B) cuando se probó en el laboratorio tenía una media de 505 MHz, y una distribución muy desigual de otras frecuencias que variaba entre aproximadamente 200 y 900 MHz.

Un objetivo principal de todos los fabricantes de antenas es producir un pulso limpio de una longitud de onda de duración que pueda transmitirse al suelo (figura 3.10). Sin embargo, ninguna antena produce pulsos perfectamente limpios, y los registros de reflexión algo ruidosos generados a partir de pulsos ruidosos transmitidos siempre son la norma. Se realizó una prueba en una antena de 400 MHz (figura 3.10) y se descubrió que el pulso transmitido registrado en lo que podría considerarse un entorno mayormente libre de ruido de fondo en un sótano profundo rodeado de concreto, sigue siendo inherentemente ruidoso al principio de un pulso fuerte, registrado a 2 nanosegundos, seguido por un "efecto de timbre" de la antena y otro ruido del sistema a lo largo de la ventana de tiempo de 27 nanosegundos, lo que hace que la energía transmitida sea un pulso grande seguido de muchas ondas más pequeñas de alta amplitud. Esta prueba de antena es cualquier cosa, menos el pulso limpio idealmente deseado, que es casi siempre el caso de las antenas fabricadas comercialmente. El procesamiento de datos posterior a la adquisición a menudo puede "limpiar" los reflejos ruidosos registrados por la mayoría de las antenas, que se analizarán en el capítulo 6.





**Figura 3.10:** Los técnicos de antenas se esfuerzan por fabricar antenas que produzcan un pulso distinto (a la izquierda), pero la mayoría de las antenas en realidad producen un pulso de energía de radar que es mucho más ruidoso de lo deseado debido a imperfecciones en la fabricación de componentes y ruido dentro del sistema (a la derecha).

En la mayoría de los casos, la selección adecuada de la frecuencia central de la antena puede marcar la diferencia entre el éxito y el fracaso en un levantamiento de Georadar y debe planificarse con anticipación. En general, cuanto mayor es la profundidad de la investigación, menor es la frecuencia de la antena (longitud de onda de transmisión más larga) necesaria (Neal 2004; Smith y Jol 1995). Las antenas de baja frecuencia son en su mayor parte más grandes, más pesadas y difíciles de transportar hacia y desde el campo que las antenas de alta frecuencia. Un modelo antiguo de antena de 80 MHz que se utiliza para la adquisición continua de datos de Georadar es más grande que un tambor de aceite de 160 lts, cortado por la mitad a lo largo y pesa entre 50 y 70 kgs. Otras antenas de baja frecuencia de modelos más nuevos a veces pueden ser movidas por más de una persona con la ayuda de soportes plásticos tubulares (figura 3.11). Estas antenas de baja frecuencia no solo son difíciles de transportar hacia y desde el campo, sino que por lo general deben moverse a lo largo de las líneas de transecto utilizando algún tipo de vehículo con ruedas o trineo (figura 3.11). Algunas antenas de baja frecuencia son tan engorrosas que deben usarse para recopilar datos solo en el método de pasos, registrando una traza de reflexión discreta en cada ubicación a medida que se mueven a lo largo de un transecto. Por el contrario, una antena de 900 MHz es tan pequeña como una caja de zapatos, pesa muy poco y cabe fácilmente en una maleta (figura 3.12).



**Figura 3.11:** Las antenas de muy baja frecuencia casi siempre están sin blindaje y deben ser transportadas por el suelo por una o más personas. Esta antena GSSI puede producir energía de frecuencia central que varía entre 16 y 100 MHz según la configuración y la separación de la antena.



**Figura 3.12:** Las antenas de frecuencia más alta (aquí una frecuencia central de 900 MHz unida a una rueda de medición) son muy pequeñas y se pueden maniobrar fácilmente por el suelo.

Los ingenieros eléctricos están modificando continuamente los componentes de sus antenas y los parámetros de diseño para producir de manera más efectiva energía de radar "más limpia" y de mayor potencia en el suelo (Arcone 1995). Las primeras antenas de Georadar, con forma de corbata de moño, eran antenas dipolo construidas de cobre. En estas antenas, se aplica una corriente eléctrica al centro de una placa de cobre en forma de corbata de moño, que luego irradia energía hacia sus bordes

produciendo un campo electromagnético. A continuación, se crea un pulso distinto, como el que se muestra en la figura 3.10, en el vértice de los dos brazos de la corbata de moño, que se propaga al espacio. Para evitar que el campo electromagnético oscile muchas veces dentro de la antena y cree muchas ondas de propagación complejas en lugar de un pulso distinto, se colocan resistencias en los bordes exteriores de la placa de cobre.

Las antenas más pequeñas y de alta frecuencia suelen estar blindadas, lo que permite la propagación de la energía hacia abajo en el suelo, pero no hacia arriba o hacia los lados, donde podría reflejarse en los elementos de la superficie como los cables de la antena o incluso las personas que tiran de las antenas (Conyers 1995; Lanz y col. 1994). El material de protección que absorbe la energía del radar generalmente se coloca en la parte superior y a los lados de la antena, lo que permite que la energía se propague solo en dirección descendente. Cuando se utilizan antenas no blindadas, mal blindadas o de baja frecuencia, se pueden recolectar muchos reflejos de objetos sobre o por encima de la superficie del suelo y la discriminación de objetivos individuales en el suelo puede resultar difícil. Las antenas de baja frecuencia son particularmente difíciles de proteger ya que las ondas producidas por ellas tienden a irradiar hacia afuera dramáticamente a medida que se propagan desde la antena transmisora y pueden “escabullirse” y moverse en el aire a lo largo de la interfaz antena-tierra. Como resultado, a menudo se pueden registrar reflejos no deseados de todas las antenas y, si se pueden identificar, por ejemplo, de una persona que tira de las antenas o de una pared u otro objeto, se pueden filtrar más tarde, si los datos se registran digitalmente (Leckebusch 2003; Nuzzo 2005). Si se registran reflejos de árboles ubicados al azar, obstrucciones en la superficie o personas que se mueven cerca de la antena y no se identifican, por lo general no se pueden distinguir fácilmente de los reflejos importantes del subsuelo, y la interpretación de los datos es mucho más difícil a menos que se indique específicamente en las notas de campo.

La mayoría de las antenas grandes de baja frecuencia son más difíciles de proteger y, debido a que producen un patrón de energía de amplia difusión, tienen el potencial de recibir muchos reflejos extraños de los objetos de la superficie y, por lo tanto, pueden ser bastante "ruidosos". Las antenas de corbata de moño tienden especialmente a “sonar”, lo que significa que el campo electromagnético oscilante no se amortigua de manera efectiva en los bordes de la placa de cobre, produciendo un pulso de radar que es menos que perfecto en su geometría. Si se aplicara un voltaje mayor en un intento de llevar energía electromagnética más poderosa al suelo y producir una onda de radar con mayor amplitud, las

antenas tenderían a “sonar” aún más, produciendo una onda transmitida muy ruidosa.

Los diseños de antenas más recientes han abandonado el diseño clásico de corbata de moño y producen un pulso de radar más limpio de mayor amplitud, sin un “timbre” extenso. Por ejemplo, la antena GSSI de 400 MHz crea un pulso potente de mayor amplitud, que puede viajar más profundamente en el suelo que la antena de corbata de moño más antigua de 500 MHz que reemplazó, con una mayor resolución del subsuelo. La energía también se transmite al suelo en un haz más estrecho, enfocando más energía hacia abajo y creando perfiles de reflexión “más nítidos”. Desafortunadamente, las regulaciones gubernamentales recientes relacionadas con las transmisiones de ancho de banda de radio han requerido que los fabricantes produzcan antenas de menor potencia, entorpeciendo algunos de estos avances en el diseño de antenas. Afortunadamente, muchas de las antenas más nuevas fabricadas por la mayoría de las empresas de Georadar también son de menor tamaño que los modelos comparables anteriores y, por lo tanto, son más fáciles de transportar hacia y desde el campo.

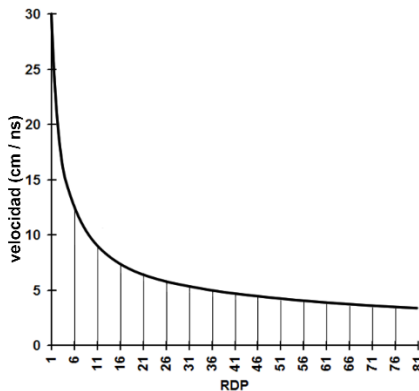
## **PROPAGACIÓN Y REFLEXIÓN DEL RADAR EN EL TERRENO**

### **Medidas de la propagación y la reflexión del radar.**

El objetivo principal de la mayoría de las investigaciones de Georadar es diferenciar y mapear espacialmente importantes interfaces del subsuelo. Cada vez que la energía del radar atraviesa un contacto entre dos materiales en el suelo con diferentes propiedades físicas o químicas, la velocidad de las ondas que pasan cambiará y algo de energía se reflejará hacia la superficie (figura 3.3). El grado de cambio de velocidad a lo largo de una interfaz es directamente correlativo a la amplitud de la onda reflejada resultante (Neal 2004). Todas las capas sedimentarias y otros materiales enterrados en el suelo tienen propiedades particulares que afectan la velocidad de propagación de la energía electromagnética y, por lo tanto, la fuerza de las ondas reflejadas (Van Dam et al. 2002). Muy a menudo, la cantidad de reflexión que ocurre en las interfaces enterradas es una función de las variaciones en el agua retenida o distribuida, que pueden estar directamente relacionadas con las propiedades físicas de las unidades enterradas (Calia et al. 2012; Conyers 2012a: 34; Conyers 2004). Otras propiedades medibles de los materiales en el suelo que afectan la propagación y la reflexión del radar son la conductividad eléctrica (relacionada con la cantidad de agua retenida) y, en menor medida, la permeabilidad magnética (Olhoeft 1981; Reynolds 2011; Van Dam y

Schlager 2000). Si se conocen (lo que rara vez ocurre en la mayoría de los sitios, ya que se deben realizar análisis de laboratorio detallados en muestras de suelo y sedimentos o se deben llevar herramientas eléctricas al campo para realizar estas pruebas), la cantidad de reflexión en los objetos enterrados y la profundidad de la penetración de la energía generalmente se pueden predecir.

La permitividad dieléctrica relativa (RDP), también llamada constante dieléctrica, toma en cuenta las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales enterrados y es una medida de la capacidad de un material para almacenar una carga de un campo electromagnético aplicado y luego transmitir esa energía (ASTM Internacional 2003; von Hippel 1954; Wensink 1993). Por lo general, se determina empíricamente a partir de mediciones en el campo, pero se puede medir directamente en el laboratorio, como se discutirá en el capítulo 5. En general, cuanto mayor sea la constante dieléctrica de un material, la energía del radar se moverá más lentamente a través de él (figura 3.13). La constante dieléctrica es una medida general de qué tan bien se transmitirá la energía del radar a la profundidad. Por lo tanto, mide la velocidad de propagación de la energía del radar y también su fuerza. Para la mayoría de las aplicaciones, los valores de constante dieléctrica y las mediciones de la velocidad del viaje del radar en el suelo se utilizan como sinónimos, ya que es muy difícil medir o predecir la mayoría de los otros componentes del comportamiento de las ondas de radar utilizados en el complejo cálculo de constante dieléctrica.



**Figura 3.13:** La permitividad dieléctrica relativa (RDP) es exponencialmente la inversa de la velocidad de viaje del radar.

Para la mayoría de los estudios, la Constante Dieléctrica y la velocidad se utilizan indistintamente como una forma de determinar la velocidad de propagación de las ondas de radar en el suelo. Por ejemplo,

la Constante Dieléctrica del agua dulce es muy alta (alrededor de 80), pero la energía del radar se puede transmitir fácilmente a través de ella sin atenuarse. Este es especialmente el caso del agua congelada, que tiene una Constante Dieléctrica de aproximadamente 3. El hielo es un medio excelente para la penetración de ondas de radar, y en los glaciares es posible una penetración de energía de muchos cientos de metros con una antena de 400 MHz (Arcone 1996; Arcone y Kreutz 2009). Un lecho de turba, que está compuesto casi en su totalidad de material orgánico y agua dulce, también tiene una Constante Dieléctrica alta en el rango de 25, pero también permitirá la transmisión de la energía de radar a grandes profundidades, solo que a velocidades mucho más lentas que en arena saturada u otros materiales. (Clarke et al. 1999; Utsi 2004; Worsfold et al. 1986).

Por lo general, es difícil calcular la Constante Dieléctrica en el campo, pero se puede estimar usando una serie de procedimientos de campo discutidos en el capítulo 5. Siempre es importante tener algún conocimiento de la Constante Dieléctrica (o velocidad) del material en el suelo en cada sitio en estudio, ya que se utilizará para convertir los tiempos de viaje del radar a profundidad. Sin esta comprensión crucial de la rapidez con la que viaja la energía en el suelo, muchos otros procedimientos de calibración necesarios y previos a la adquisición óptima de datos discutidos en el capítulo 4 pueden verse potencialmente comprometidos.

La permitividad dieléctrica relativa del aire, que exhibe solo una atenuación electromagnética insignificante, es aproximadamente 1.0003 (Dobrin 1976) y generalmente se redondea a 1. La mayoría de los suelos y sedimentos tienen valores que oscilan entre 3 y aprox 25 (tabla 3.1). En un estado totalmente seco, la mayoría de los materiales naturales en el suelo tienen un valor de Constante Dieléctrica que varía poco, generalmente entre aprox 3 y 5. Pero si solo se agrega una pequeña cantidad de agua al material (que casi siempre es el caso en condiciones naturales, incluso en los desiertos más secos), el valor aumentará, a veces de forma espectacular (Conyers 2004). Tomemos, por ejemplo, arena (con un valor de 3; ver tabla 3.1) cuando está totalmente saturada de agua dulce (tendrá un valor de 80). El valor de la constante dieléctrica total de este material se puede estimar tomando la porosidad de la arena saturada de agua de 30 % y multiplicándola por la constante dieléctrica del agua, que es 80. Esto luego se agrega al valor de la arena (aproximadamente 3) que forma el otro 70 % del volumen total (calculado tomando el 70 % de 3). El constante dieléctrica del volumen total se estimaría entonces en 26:  $([0,30 \times 80] + [0,70 \times 3])$ . En condiciones reales de campo, este cálculo fácil rara vez es posible, porque casi todos los materiales del suelo

contienen muchos otros componentes, como arcilla y materia orgánica, que pueden interactuar química o físicamente con el agua de los poros, produciendo una mezcla compleja de materiales, cada uno de los cuales tienen diferentes valores de constante dieléctrica. Muchas rocas volcánicas y otras rocas duras así como arena y grava húmedas pueden tener valores que oscilan entre 6 y 16. Los suelos húmedos y los sedimentos o suelos ricos en arcilla (Wensink 1993) suelen tener valores que pueden acercarse a 40 o 50 (tabla 3.1). En sedimentos no saturados, con poca o ninguna arcilla mineralógica, los valores suelen ser de 5 o menos, pero los sedimentos, los suelos y las rocas casi nunca están completamente secos, por lo que el agua retenida siempre afecta el valor de la Constante Dieléctrica de la mayoría de los materiales del suelo.

**Tabla 3.1:** permitividades dieléctricas relativas (RDP), (la constante dieléctrica) típicas de materiales geológicos comunes. Modificado de Davis y Annan (1989) y Geophysical Survey Systems, Inc. (1987).

<b><u>Material</u></b>	<b><u>RDP</u></b>
Aire	1
Arena seca	3-5
Limo seco	3-30
Hielo y nieve	3-4
Asfalto	3-5
Ceniza volcánica / piedra pómez	4-7
Caliza	4-8
Granito	4-6
Permafrost	4-5
Carbón	4-5
Esquisto	5-15
Arcilla	5-40
Hormigón	6
Limo saturado	10-40
Tierra costera arenosa seca	10
Suelo superficial promedio rico en orgánicos	12
Tierra pantanosa o boscosa	12
Tierras agrícolas ricas en materia orgánica	15
Arena saturada	20-30
Agua dulce	80
Agua de mar	81

Los valores de constante dieléctrica que se muestran en la tabla 3.1 son muy aproximados y pueden variar mucho en un sitio y con la profundidad de lo enterrado. Si los datos sobre los tipos de material en el

suelo no están disponibles de inmediato, el valor de la constante dieléctrica del suelo solo se puede estimar utilizando una serie de métodos de campo analizados en el capítulo 5. La ecuación 3.1, que relaciona el constante dieléctrica y la velocidad de radar de un material, se muestra abajo:

$$K = \left( \frac{C}{V} \right)^2$$

**Equation 3.1:** Relación de permitividad dieléctrica relativa (K) y velocidad de radar (V). C = velocidad de la luz (0.0299 cm / ns)

Para generar una reflexión de radar significativa, el cambio en la constante dieléctrica entre dos materiales delimitadores debe ocurrir en una distancia corta. Cuando la constante dieléctrica cambia gradualmente con la profundidad, solo se producirán pequeñas diferencias en la reflectividad cada pocos centímetros en el suelo, y se generarán reflejos muy débiles o nulos (Van Dam y Schlager 2000). La amplitud de las reflexiones generadas en una interfaz entre dos materiales con Constantes Dieléctricas conocidas se puede calcular utilizando la ecuación 3.2 (Neal 2004; Sellmann et al. 1983; Walden y Hosken 1985; Van Dam et al. 2002). Pero la incapacidad de medir con precisión los parámetros físicos y químicos de las unidades enterradas en el campo generalmente impide cálculos precisos de cantidades específicas de reflectividad en la mayoría de los contextos y, por lo general, solo se pueden hacer estimaciones.

$$R = \left( \sqrt{K_1} - \sqrt{K_2} \right) \left( \sqrt{K_1} + \sqrt{K_2} \right)$$

**Equation 3.2:** El coeficiente de reflectividad (R) en una interfaz entre dos materiales que tienen permitividades dieléctricas relativas diferentes (K1 y K2).

Las reflexiones de radar de mayor amplitud suelen producirse en una interfaz de dos capas relativamente gruesas que tienen propiedades muy variables. Por ejemplo, una diferencia de este tipo podría estar entre un piso de arcilla compactada de un pozo de casa enterrado y la capa de arena o grava que lo cubre (por ejemplo, figura 2.1). A menudo, otras interfaces estratigráficas importantes o características arqueológicas enterradas de interés también producirán reflejos de gran amplitud, pero no siempre. Si las características arqueológicas objetivo están compuestas de casi exactamente la misma sustancia que el material que las rodea, o si esos materiales tienen aproximadamente las mismas propiedades físicas y químicas, no habrá variación en el valor de constante dieléctrica entre ellos, y se producirá poca o ninguna reflexión en su interfaz. Esto puede



hacer que las características que podrían ser visibles cuando se excavan permanezcan "invisibles" al Georadar, para consternación de todos los involucrados (Conyers 2012a: 191). Cálculos distintos a la ecuación 3.2 se pueden usar para cuantificar la reflectividad y, por lo tanto, las amplitudes u ondas reflejadas en las interfaces, se analizan con mayor detalle a continuación.

### **Dispersión y atenuación de la energía del radar en el suelo**

Otro factor que afecta la profundidad de penetración y la amplitud de las ondas de radar reflejadas en el suelo es la dispersión y la atenuación de la energía. Esto ocurre porque la mayor parte de la tierra es al menos ligeramente conductora de electricidad, lo que disipa y absorbe las ondas que se propagan a medida que se mueven a través de ella. A medida que la energía se mueve más profundamente en el suelo, hay menos energía disponible para la reflexión y las amplitudes de las reflexiones en las interfaces enterradas también disminuyen (figura 3.3). Además, la energía que se propaga desde una antena en la superficie se extenderá con la profundidad y, por lo tanto, hay menos disponible para la reflexión desde una interfaz más profunda en el suelo. Esto se denomina propagación esférica y se puede estimar como se discutirá a continuación. Cuando lo que queda de la energía transmitida original finalmente se refleja hacia la superficie desde las profundidades del suelo, esa energía restante sufrirá una atenuación adicional dentro de los materiales a través de los cuales pasa antes de llegar finalmente a la antena receptora.

Como resultado, la energía del radar siempre se debilita progresivamente a medida que se mueve por el suelo. Por lo tanto, para ser visible utilizando los métodos de Georadar más comunes, las ondas de radar reflejadas deben haberse generado en interfaces subterráneas que tengan suficiente contraste en los valores de constante dieléctrica y también deben estar ubicadas a una profundidad lo suficientemente baja donde todavía hay suficiente energía de radar disponible para reflejarse. A veces, las técnicas de filtrado y amplificación de ondas, que se analizarán en el capítulo 6, se pueden aplicar a reflexiones muy débiles después de su adquisición y pueden mejorar sus amplitudes muy bajas para hacerlas más visibles en imágenes de Georadar comunes. Sin embargo, siempre existe una profundidad máxima de penetración de la energía del radar y, por lo tanto, de potencial reflexión, que es diferente para cada sitio, sin importar qué frecuencia de antena se use o qué técnicas de procesamiento posterior a la adquisición se empleen (Conyers 2012a: 95).

La profundidad máxima efectiva de penetración de las ondas de Georadar es función de la frecuencia de las ondas que se propagan al suelo

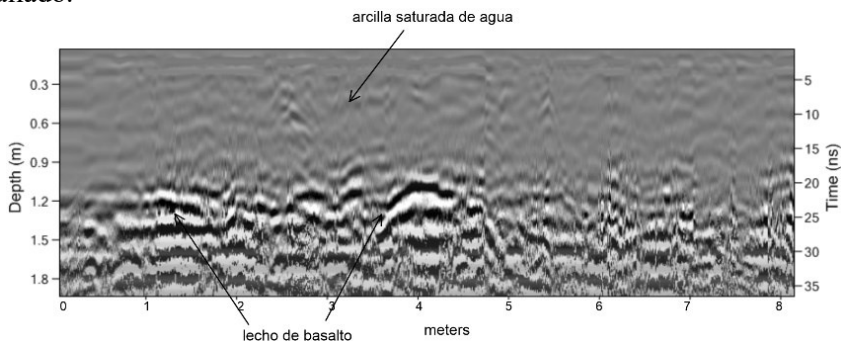
y de las características físicas del material a través del cual pasan (Annan et al. 1975; Batey 1987; Geophysical Survey Systems 1987; Keller 1988; Neal 2004; Olhoeft 1981). Los suelos, sedimentos o rocas que se denominan dieléctricos permitirán el paso de una gran cantidad de energía electromagnética sin disiparla (von Hippel 1954). Cuanto más conductor eléctrico es un material, menos dieléctrico es y la mayor cantidad de energía se atenúa a menor profundidad. En un medio altamente conductor de electricidad, el componente eléctrico de la onda electromagnética que se propaga se dispersa rápidamente y, cuando esto sucede, la onda en su conjunto se disipa. Esto sucede porque para que ocurra la propagación, las ondas eléctricas y magnéticas deben “alimentarse” constantemente entre sí durante la transmisión (figura 3.1).

Los medios altamente conductores de electricidad incluyen aquellos que contienen agua salada y algunos que tienen ciertos tipos de arcilla conductora de electricidad, especialmente si esa arcilla está húmeda. Cualquier suelo o sedimento que contenga sales solubles o electrolitos en el agua subterránea también creará un medio con una alta conductividad eléctrica. La escorrentía agrícola que está parcialmente saturada con nitrógeno soluble y potasio puede aumentar potencialmente la conductividad eléctrica de un medio, al igual que los suelos impregnados con carbonato de calcio en las regiones áridas. A menudo, los suelos desérticos, incluso si parecen ser extremadamente secos y, por lo tanto, deberían permitir la transmisión de radar fácilmente, contienen sales hidratadas en sus intersticios, que conducen la electricidad. En estos tipos de suelos, la energía del radar a menudo se atenúa a poca profundidad (Conyers 2012a: 99).

La química del suelo, especialmente los tipos y estructuras de diferentes minerales arcillosos, también juega un papel en la transmisión de energía del radar, pero este mecanismo aún no se comprende bien (Doolittle et al. 2007; Rhoades et al. 1976; Walker et al. 1973; Wensink 1993). Algunos suelos comunes están compuestos por arcillas mineralógicas con un alto desplazamiento iónico como la montmorillonita, la esmectita y la bentonita (Birkeland 1999; Doolittle et al. 2007). Estas son arcillas de tres capas que generalmente se denominan arcillas hinchables. Todos tienen la capacidad de retener agua en su estructura atómica (y, por lo tanto, se hinchan cuando están mojados). Su estructura molecular, cuando contiene agua, permite el fácil movimiento de los iones, lo que los convierte en buenos conductores eléctricos, que se pueden medir como potencial de desplazamiento de cationes (Birkeland 1999). En comparación, las arcillas de dos capas, como la caolinita, y las arcillas de tres capas que no se hinchan, como la illita, son relativamente

resistentes y su presencia en un suelo, incluso cuando está húmedo, a menudo no obstaculiza en gran medida la transmisión de energía del radar.

Se solía asumir que la arcilla húmeda, sin importar el tipo, atenuaría las ondas de radar y, por lo tanto, no era adecuada para los levantamientos de Georadar (Conyers 2012a: 96; Leckebusch 2003). Si bien este suele ser el caso, se han registrado buenas reflexiones de radar a una profundidad de más de 2 metros con una antena de 400 MHz en el oeste de Oregón, en un terreno compuesto casi en su totalidad por arcilla saturada (figura 3.14). Este éxito inusual parecía misterioso en ese momento, y solo después de regresar del campo y analizar las muestras de suelo y sedimento recolectadas en el sitio, se descubrió que la arcilla no era arcilla mineral. En realidad, el suelo era un sedimento compuesto por fragmentos de roca del tamaño de la arcilla, que aún no habían sufrido la diagénesis en arcillas minerales (Birkeland 1999); por lo tanto, el material no tenía las propiedades de alta conductividad eléctrica de muchos minerales arcillosos discutidos anteriormente. Se desconoce cómo se podría determinar fácilmente en el campo si la arcilla en un área de estudio era arcilla mineral o simplemente sedimento compuesto de fragmentos de roca del tamaño de arcilla, sin un análisis sedimentológico y mineralógico detallado.



**Figura 3.14:** Un perfil de reflexión recogido en arcilla totalmente saturada, que aún transmitía energía de radar a unos 1,8 metros en el suelo.

También fue interesante que esta arcilla saturada, con una porosidad de alrededor del 40 por ciento, tuviera un valor para constante dieléctrica muy alto, debido a la cantidad de agua retenida. Por lo tanto, la energía del radar viajó fácilmente dentro de él (pero a baja velocidad) porque era un medio relativamente no conductor. Por el contrario, la misma antena de 400 MHz se utilizó para recopilar datos en un sitio en el sur de Colorado, en un limo arenoso extremadamente seco. La profundidad máxima de penetración del radar allí era solo de unos 50 centímetros. Solo después de que se completó el levantamiento de Georadar y se realizó un

análisis mineralógico del sedimento, se encontró la presencia de arcilla bentonita en el medio. Esta arcilla que retiene el agua hizo que el sedimento, por lo demás seco, fuera eléctricamente conductor, lo que explica la rápida atenuación de la energía del radar a una profundidad tan baja.

Otro levantamiento similar en la costa de Perú, presumiblemente con suelo arenoso seco (no había llovido en esa área durante décadas), también tenía una conductividad eléctrica muy alta y, por lo tanto, la energía del radar también se atenuó a muy poca profundidad (Conyers 2012a: 99). En este caso, las sales eléctricamente conductoras se unieron con arcilla en la arena, haciendo que el medio en su conjunto sea altamente conductor de la electricidad y, por lo tanto, no dieléctrico.

Estos ejemplos ilustran cómo el viejo adagio de que en los estudios de Georadar los suelos arenosos secos son "buenos" para la penetración mientras que la arcilla húmeda es "mala" puede ser muy engañoso, ya que hay muchos otros factores más importantes que controlan la propagación de la energía de radar (Conyers 2012a: 95; Conyers 2004; Gerber et al. 2004). La más importante es la conductividad eléctrica, que a menudo es difícil de predecir antes de realizar un estudio de Georadar.

La materia orgánica no descompuesta, como la turba, a menudo es relativamente no conductora, incluso cuando está húmeda (Utsi 2004; Worsfold et al. 1986). Sin embargo, el alto porcentaje de agua en estos sedimentos reducirá drásticamente los tiempos de viaje del radar. Por lo tanto, la turba tendrá un alto valor de Constante Dieléctrica (baja velocidad de propagación), al tiempo que permitirá la transmisión de ondas de radar a veces a grandes profundidades (Clarke et al. 1999; Leopold y Volkel 2003). La materia orgánica en descomposición, sin embargo, a veces acumula metales, especialmente en un ambiente químicamente reductor, y esos metales pueden aumentar la conductividad eléctrica general del material (Van Dam et al. 2002). Este tipo de materia orgánica húmeda también aumentará la acidez general del suelo, creando iones de hidrógeno móviles, que también permitirán un mayor paso de electricidad y un aumento de la conductividad en algunos casos.

Otros minerales en el suelo, especialmente aquellos que pueden disolverse en agua, crearán iones libres, lo que permitirá una mayor conductividad eléctrica. Los sulfatos, los minerales de carbonato, el hierro, las sales de todo tipo y cualquier especie de mineral elemental cargado crearán un suelo altamente conductor y atenuarán fácilmente la energía del radar a poca profundidad (Van Dam et al. 2002). En condiciones muy desfavorables de humedad (con agua ligeramente salina), sedimentos calcáreos o suelos que contienen ciertos minerales

ricos en arcilla, la profundidad máxima de penetración del Georadar en el suelo puede ser mucho menor que un metro.

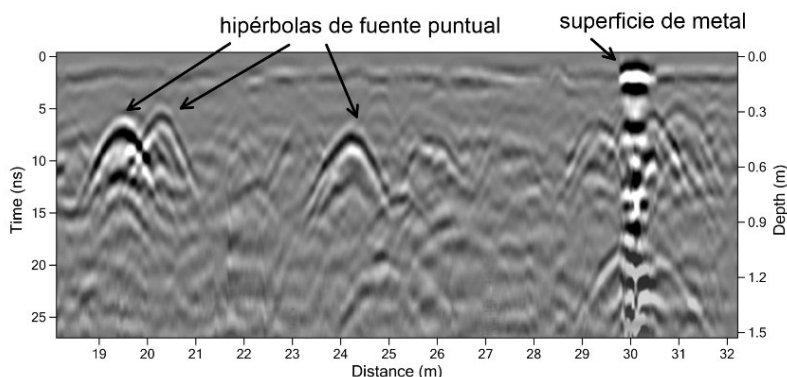
Salvo estudios detallados de la química del suelo en los sitios antes de la adquisición de datos, el mejor método para determinar la conductividad de un área para los estudios de Georadar es recopilar datos y determinar visualmente la profundidad de penetración de energía en los perfiles de reflexión. Algunos investigadores han intentado utilizar medidores de conductividad electromagnética (EM) y herramientas de resistencia eléctrica para medir la conductividad del suelo cerca de la superficie, ya que esas lecturas generalmente determinarán si la energía de Georadar se transmitirá con éxito a la profundidad deseada (Calia et al.2012; Leucci et al.2012; Bongiovanni et al 2011; Linford y Linford 2004; Yilmaz 2001). Se debe tener cuidado al utilizar este método, ya que primero deben calibrarse correctamente con un medio conocido, o las mediciones de conductividad pueden no ser válidas. Para predecir la eficacia del Georadar, es necesario una visita preliminar al sitio para realizar una toma de datos. Si el equipo de Georadar estuviera disponible, probablemente sería mejor llevarlo al campo también y recolectar un perfil de radar o dos en un sitio prospectivo para ver qué tan profundo penetrará la energía, lo que produciría resultados más definitivos.

La investigación para diseñar un instrumento que mida de forma rápida y precisa la conductividad del suelo aún está en curso, para que luego se puede utilizar esta información y poder determinar la eficacia del Georadar en un área de estudio antes de ir al campo. Algunos han intentado utilizar dispositivos que se desarrollaron para determinar el contenido de humedad en el grano enviado a los silos de almacenamiento, que también utilizan métodos dieléctricos. Otros han recurrido a dispositivos simples de corriente continua que pasan una corriente eléctrica de un electrodo a otro en el suelo, midiendo la resistividad eléctrica, que es la inversa de la conductividad. Ambos han tenido un éxito marginal en la predicción de la transmisión de la energía de radar porque miden una sola muestra, que puede no ser indicativa del suelo en su conjunto, o una corriente eléctrica cuya trayectoria en el suelo no se puede determinar fácilmente. Hasta la fecha, no existe una forma realmente buena de medir con precisión la conductividad eléctrica en el suelo en la forma que afecta la transmisión de la energía de radar, fuera de algunos dispositivos eléctricos calibrados y pruebas de laboratorio de muestras.

La permeabilidad magnética también afecta la profundidad de penetración del radar en un medio. Esta es una medida de la capacidad de un medio para magnetizarse cuando se le impone un campo electromagnético (Reynolds 2011; Sheriff 1984). La mayoría de los suelos y sedimentos son sólo ligeramente magnéticos y, por tanto, suelen tener

una baja permeabilidad magnética. Cuanto mayor sea la permeabilidad magnética, más energía electromagnética se atenuará durante su transmisión. Cuando esto ocurre, la porción magnética de la onda electromagnética se destruye, al igual que cuando aumenta la conductividad eléctrica, se pierde el componente eléctrico. Los medios que contienen minerales de magnetita, cemento de óxido de hierro o suelos ricos en hierro potencialmente pueden tener una alta permeabilidad magnética y, por lo tanto, a menudo transmiten mal la energía del radar (Van Dam et al. 2002). Se ha encontrado una pobre penetración de energía de radar causada por esta propiedad física en las arenas basálticas en Hawái (Olhoeft 1998) y en sedimentos de granito sin meteorizar en Arizona, los cuales contienen una gran cantidad de magnetita y otros minerales ricos en hierro ligeramente magnético. Sin embargo, otras pruebas en Hawái encontraron una excelente penetración de radar a 4-5 metros en flujos de lava de basalto (Conyers y Connell 2007) y en pruebas similares en Islandia, el basalto fue capaz de transmitir energía a muchas decenas de metros con antenas de baja frecuencia (Cassidy et al. 2004). Aparentemente, en estas áreas, los componentes magnéticos del basalto no meteorizado no influían en la profundidad de penetración de la energía y la variable más importante era la cantidad de arcillas conductoras de electricidad que se habían formado debido a la meteorización (Conyers y Connell 2007).

La energía del radar no penetrará en el metal. Un objeto metálico reflejará toda la energía del radar que lo golpee y “sombreará” cualquier cosa directamente debajo. Los objetos metálicos enterrados son bastante fáciles de ver en los perfiles de reflexión de Georadar porque generalmente crean múltiples reflejos apilados uno encima del otro debajo del objeto metálico (figura 3.15). Esto es causado por la energía del radar que se refleja en el objeto metálico, viajando de regreso a la superficie del suelo para ser reflejada nuevamente desde la interfaz tierra-aire, de regreso al objeto metálico y luego nuevamente a la superficie. Cuando esto ocurre, muchos reflejos de este tipo a menudo se apilan uno encima del otro (los llamados reflejos de "poste de barbero" visibles en los perfiles), esto es un buen indicador de metal enterrado. Otros materiales además del metal también son altamente reflectantes, como la arcilla cocida o algunos objetos de plástico, por lo que múltiples reflejos apilados como se muestra en la figura 3.15 no necesariamente indican únicamente objetos metálicos.



**Figura 3.15:** Las hipérbolas de fuentes puntuales se generan a partir de objetos enterrados de tamaño limitado. En este caso, tanto los tubos metálicos como los plásticos, ambos perpendiculares al perfil, produjeron reflejos hiperbólicos, con el plástico generando las menores amplitudes. La serie de reflejos de alta amplitud que ocurren a la derecha del perfil desde cerca de la superficie del suelo a través de la ventana de tiempo de 27 nanosegundos fueron generados por una gran pieza de metal cerca de la superficie del suelo.

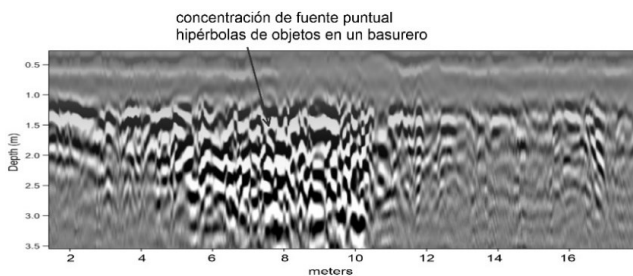
La profundidad de la penetración de la energía del radar y la resolución del subsuelo son en realidad muy variables, dependiendo de muchos factores específicos del sitio, como la composición del encape de suelo, la porosidad y la cantidad de humedad retenida. Es importante recordar que en condiciones donde el suelo es altamente conductor de electricidad, la energía del radar se atenuará a poca profundidad, sin importar su longitud de onda (Conyers 2012a: 95). Existe la idea errónea de que si una antena de alta frecuencia (digamos, una de 400 MHz) solo es capaz de transmitir energía a unos 50 cm en el suelo, entonces una antena de baja frecuencia transmitirá más profundamente (Leucci et al. 2012). Si también se probara una antena de 200 MHz, y su profundidad máxima de penetración fuera aproximadamente la misma, entonces es casi seguro que el suelo es altamente conductor de electricidad, y ninguna antena, sin importar la frecuencia o la potencia, sería capaz de transmitir a una profundidad mayor.

A frecuencias muy altas, generalmente superiores a 1500 MHz, algunos materiales geológicos que contienen agua mostrarán una atenuación de energía más alta de lo normal debido a la pérdida de energía por relajación molecular (Annan y Cosway 1994; Neal 2004; Olhoeft 1994b). Por lo general, esto no es un problema en la mayoría de las aplicaciones del Georadar, pero debido al amplio ancho de banda de las antenas comerciales, parte de la energía del radar producida por las antenas de frecuencia central de 800 MHz o más podría verse afectada. La relajación molecular ocurre porque las moléculas de agua son bipolares y

rotarán y se alinearán dentro de un campo electromagnético impuesto. Esta rotación hace que la energía del radar se convierta en energía mecánica, que luego se disipa en forma de calor, de manera muy similar a como funciona un horno de microondas (ASTM International 2003; Neal 2004). Este tipo de pérdida de energía, que depende de la frecuencia, se denomina relajación dieléctrica y, por lo general, se convierte en un factor solo si se realiza en un ambiente muy húmedo con una antena de alta frecuencia, lo cual es poco común.

## TIPOS DE REFLEXIÓN

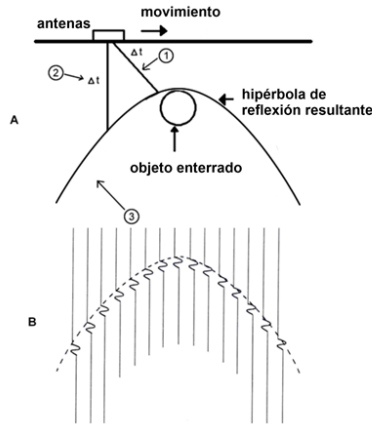
Una serie de trazas de reflexión recolectadas a lo largo de un transecto lineal que se producen a partir de una capa enterrada generará una línea horizontal o sub-horizontal en los perfiles (ya sea oscura o clara en los perfiles de reflexión de escala de grises) que se conoce simplemente como una reflexión plana (como en el suelo en la figura 2.1). Estos tipos de reflejos distintos generalmente se generan a partir de un límite del subsuelo, como un horizonte estratigráfico o alguna otra discontinuidad física, como el nivel freático, un horizonte de suelo enterrado o cualquier otra característica horizontal de interés. También puede haber reflejos de fuentes puntuales que se generan a partir de una característica que se encuentra en el aire o un objeto en el subsuelo (figura 3.15). Los materiales enterrados que generan reflejos de fuentes puntuales podrían ser rocas individuales, objetos metálicos, tuberías que se cruzan en ángulo recto y una gran variedad de otros objetos más pequeños de este tipo. Son visibles en perfiles bidimensionales como reflejos hiperbólicos, a pesar de que se generaron a partir de un "punto en el suelo" o característica en el aire. Un gran número o densidad de hipérbolas en un perfil de reflexión a menudo puede dificultar la interpretación porque muchas reflexiones hiperbólicas poco espaciadas tienen ejes que interfieren entre sí y producen perfiles muy complejos y "saturados" (figura 3.16).



**Figura 3.16:** Se generó una concentración de muchas hipérbolas de fuentes puntuales a partir de objetos individuales en un basurero histórico cerca de Los Ángeles, California.



Las hipérbolas de reflexión de fuente puntual, a veces denominadas difracciones, se generan porque la mayoría de las antenas de Georadar producen un haz de radar transmitido que se propaga hacia abajo desde la superficie en un patrón cónico, irradiando hacia afuera a medida que la energía viaja a la profundidad (figura 3.17). Por lo tanto, la energía del radar se reflejará desde las características enterradas que no están ubicadas directamente debajo de la antena transmisora, pero que todavía están dentro del "haz" de las ondas en propagación. Las trayectorias de viaje de las ondas de radar oblicuas hacia y desde la superficie del suelo son más largas (según se mide en el tiempo de viaje bidireccional del radar), pero los reflejos generados por objetos que no se encuentran directamente debajo de las antenas se seguirán registrando como si estuvieran directamente debajo, pero solo más profundos en el suelo. A medida que la antena de superficie se acerca a una fuente puntual enterrada, la antena receptora continuará registrando los reflejos de la fuente puntual enterrada antes de llegar directamente sobre ella y continuará "viéndolo" después de que haya pasado. Luego se genera una hipérbola de reflexión porque el tiempo que tarda la energía en moverse desde la antena al objeto a lo largo de muchas trayectorias oblicuas es mayor cuanto más lejos está la antena de la fuente de reflexión. A medida que la antena se acerca al objeto enterrado, la reflexión se registra más cerca en el tiempo hasta que la antena está directamente encima de él. El mismo fenómeno se repite a la inversa a medida que la antena se aleja de la fuente, lo que da como resultado una hipérbola donde solo su vértice denota la ubicación real de la fuente de reflexión enterrada, con los ejes o "brazos" de la hipérbola creando un registro de reflexiones que recorrió las trayectorias de las ondas oblicuas. En algunos casos, solo se puede registrar la mitad de una hipérbola, si solo la esquina o el borde de una característica más plana está causando un reflejo discreto, como el borde del piso de una casa enterrada o una placa de algún tipo. A veces, solo se registra un eje si el objeto que genera la reflexión está orientado en el suelo de tal manera que las reflexiones del segundo eje se alejan de la antena de superficie y no se registran.



**Figura 3.17:** La proyección cónica de la energía del radar en el suelo permitirá que la energía del radar viaje en una dirección oblicua a una fuente puntual enterrada (1) como se ve en (A). El tiempo bidireccional ( $\Delta t$ ) se registra y se traza en profundidad directamente debajo de la antena donde se registró (2). Se registran muchas de estas reflexiones cuando las antenas se acercan y luego se alejan de un objeto enterrado, el resultado es una hipérbola de reflexión (3), cuando todas las trazas se ven en sucesión, como se ve en (B).

Algunos geofísicos consideran que la presencia de hipérbolas de reflexión es una distracción durante la interpretación de los datos porque no indican la ubicación "real" de las características enterradas, sino que son el producto de la geometría compleja de las trayectorias de las ondas de radar en el suelo. Sin embargo, su presencia puede ayudar en la interpretación porque las hipérbolas se identifican fácilmente en los perfiles de reflexión y denotan un tamaño específico y una posible geometría de objetos en el suelo. Más importante aún, su utilidad para determinar la velocidad (discutida en el capítulo 5) no se puede exagerar. Si más adelante se hace necesario eliminar las hipérbolas de reflexión de los perfiles, los programas de software (discutidos en el capítulo 6) pueden "colapsar" los brazos de la hipérbola hasta su cúspide utilizando procedimientos de migración de datos. Esto a menudo es necesario cuando se realizan análisis espaciales más complejos y mapeo de características enterradas en tres dimensiones donde muchos "brazos" de hipérbola pueden crear anomalías de reflexión falsa, tendiendo a difuminar la ubicación de algunos objetos en mapas e imágenes tridimensionales.

## RESOLUCIÓN DE CARACTERÍSTICAS SUBSUPERFICIALES

La definición del subsuelo es principalmente una función de la longitud de onda de propagación de la energía del radar y la geometría de

los materiales enterrados en el terreno de interés. Las antenas de baja frecuencia (10 a 200 MHz) generan ondas con energía de radar de amplia longitud que puede penetrar hasta 50 metros o más en ciertas condiciones, pero son capaces de resolver solo características muy grandes del subsuelo. En hielo puro, se sabe que las antenas de esta frecuencia transmiten energía de radar a muchos kilómetros, y se utilizan comúnmente para determinar el espesor del hielo glacial o la orientación de las superficies del lecho rocoso bajo el hielo (Arcone y Kreutz 2009; Bogorodsky et al. 1985; Delaney et al.2004).

**Tabla 3.2.** Las longitudes de onda de la frecuencia central de diferentes antenas de radar y los cambios de longitud de onda en el material con diferentes permitividades dieléctricas relativas (RDP), (constantes dieléctricas).

Frecuencia central de la antena (MHz)	Longitud de onda de la frecuencia central en el aire (metros)	Longitud de onda de frecuencia central en un medio con RDP = 5 (metros)	Longitud de onda de frecuencia central en un medio con RDP = 10 (metros)	Longitud de onda de frecuencia central en un medio con RDP = 15 (metros)
1000	0.3	0.13	0.08	0.06
900	0.33	0.15	0.09	0.07
500	0.6	0.27	0.15	0.12
300	1	0.45	0.26	0.2
120	2.5	1.12	0.65	0.5
100	3	1.34	0.77	0.6
80	3.75	1.68	0.97	0.75
40	7.5	3.35	1.94	1.5
32	9.38	4.19	2.42	1.88
20	15	6.71	3.87	3
10	30	13.42	7.75	6

Por el contrario, la profundidad de penetración de una antena de 900 MHz es de aprox. 1 metro, y a menudo menos, en condiciones de suelo típicas, pero sus reflejos generados pueden resolver características de hasta unos pocos centímetros de diámetro. Por lo tanto, existe una compensación entre la profundidad de penetración y la resolución del subsuelo. La Tabla 3.2 muestra la longitud de onda dominante para diferentes frecuencias centrales de antena y cómo esas longitudes de onda

cambian a medida que la energía se mueve a través de materiales con diferentes constantes dieléctricas.

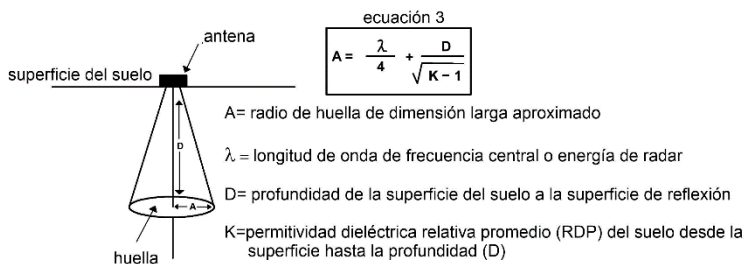
La capacidad de definir las características enterradas depende en gran medida de la longitud de onda de la energía que las alcanza a la profundidad en que están enterradas. Una “regla empírica” es que el tamaño mínimo del objeto que se puede definir es aproximadamente el 40 por ciento de la longitud de onda descargada que llega al suelo (Jol y Bristow 2003; Orlando 2007; Yilmaz 2001). La descarga de energía de radar siempre ocurre cuando la energía pasa por el suelo (Jol y Bristow 2003) y disminuye en frecuencia, aumentando la longitud de onda de propagación de las ondas de radar. Por ejemplo, una antena de frecuencia central de 400 MHz generará energía con una longitud de onda de 75 centímetros en el aire (tabla 3.2). Cuando esa energía se descarga a medida que se mueve hacia el suelo, su frecuencia dominante disminuye a unos 300 MHz, que es una longitud de onda de unos 100 cm. Sin embargo, tan pronto como las ondas de propagación que se mueven más profundamente en el suelo encuentran material con mayor constante dieléctrica, lo que generalmente ocurre a medida que la saturación de agua aumenta con la profundidad, las longitudes de onda se acortarán (tabla 3.3). Por lo tanto, es casi imposible calcular cuáles serían las longitudes de onda descargadas de cualquier energía de radar transmitida desde una antena a medida que viajan a través de un terreno complejo, y generalmente es suficiente ser consciente de que las longitudes de onda cambiarán a medida que se propaguen.

Por ejemplo, una antena de 300 MHz genera una longitud de onda de aprox. 1 m en el aire (tabla 3.2). Esta energía de frecuencia podría descargarse más o menos a unos 200 MHz en el suelo, lo que produciría longitudes de onda de propagación de aprox. 1.5 metros. Pero a medida que la energía pasa progresivamente a través de los materiales con una constante dieléctrica creciente (digamos de 5), esas mismas ondas de radar disminuirían su longitud de onda a aprox. 0.67 m (tabla 3.2). Si viajaran aún más profundamente en el suelo y pasaran a través de material de constante dieléctrica aún mayor, la longitud de onda probablemente disminuiría aún más. Aunque es difícil de calcular y saber con certeza, una estimación de estos cambios de longitud de onda es importante porque un objeto mucho más pequeño que aproximadamente el 40 por ciento de la longitud de onda de la energía del radar que los cruza con toda probabilidad no podría definirse en perfiles de reflexión. En el ejemplo anterior, por lo tanto, un objeto más pequeño que aprox. el 40 % de 0.67 metros (aprox. 27 cm de diámetro) probablemente no se podría resolver con una antena de 300 MHz.

Desafortunadamente, a menudo no se sabe de antemano cuál es la profundidad del objetivo o de las características arqueológicas de interés, sus dimensiones o, las condiciones del terreno y sus propiedades físicas. Lo que es más importante, la capacidad de transmitir la energía del radar a la profundidad necesaria a menudo no se conoce hasta que uno realmente recopila algunos perfiles de reflexión. Lo mejor que se puede hacer antes de ir al campo es hacer algunos cálculos aproximados a partir del conocimiento disponible y luego tomar las antenas que, con suerte, serán suficientes para la tarea. Por tanto, la elección de la antena puede ser una decisión difícil. Como regla general, si las características objetivo están dentro de aproximadamente 1 metro de la superficie del suelo, las antenas entre 400 y 900 MHz serán adecuadas para transmitir energía a esa profundidad y definir la mayoría de las características y la estratigrafía asociada (tabla 3.2). Si las características objetivo son pequeñas y se necesita una mayor resolución, se deben usar las antenas de frecuencia más alta en este rango. Si la profundidad del objetivo está entre 1 y 3 metros, las antenas de 500 a 200 MHz aproximadamente son probablemente óptimas. La energía del radar con una frecuencia superior a aproximadamente 500 MHz rara vez transmitirá energía a más de 2 metros en el suelo, excepto en medios excepcionalmente dieléctricos. Los objetivos enterrados a más de 3 o 4 metros por lo general requerirán antenas con frecuencias inferiores a 200 MHz, pero es importante recordar que las longitudes de onda generadas a partir de estas frecuencias solo son capaces de definir características bastante grandes. Además, cuanto más profundo en el suelo debe penetrar la energía, más dispersión del haz de transmisión y más atenuación de energía, por lo que puede que no sea posible obtener buenos reflejos desde más de 3 o 4 metros en la mayoría de las condiciones del suelo, no importa cuál sea la frecuencia de la antena. Si los objetivos están enterrados a más de 5 m. de profundidad, generalmente se necesitan antenas con frecuencias inferiores a 100 MHz, y es poco común que la tierra sea lo suficientemente dieléctrica para permitir la penetración del radar a esa profundidad. Por lo general, cenizas volcánicas secas no erosionadas, permafrost o suelo muy congelado, el suelo debe estar excepcionalmente seco y carecer de arcilla o sales conductoras.

Otra forma de determinar si las características de un cierto tamaño se pueden resolver en los perfiles de reflexión es calcular la cantidad de energía del haz del radar que las "iluminará". Como pauta básica, el área de la sección transversal del objetivo a detectar debe aproximarse al tamaño del patrón de "huella" de energía a la profundidad del objetivo (figura 3.18). Si la antena emisora está debidamente blindada para que la energía se propague en una dirección principalmente hacia abajo, este

patrón de iluminación elíptica en una superficie horizontal (figura 3.18) se puede calcular (Annan y Cosway 1992; Neal 2004; Yalciner 2009). Si el objetivo es mucho más pequeño que el tamaño de la huella, entonces solo una fracción de la energía transmitida que lo cruza dentro del cono de transmisión se reflejará en la superficie. El pequeño número de reflejos devueltos por una característica enterrada muy pequeña en este caso probablemente sería indistinguible de los reflejos de fondo generados en otros lugares dentro del cono de transmisión y, por lo tanto, serían invisibles en los perfiles de reflexión. Pequeñas características de este tipo aún podrían ser detectables si crean reflejos de muy alta amplitud o después de que los datos de reflexión aún sin procesar se procesen por computadora para aumentar la resolución, lo que se analiza en el capítulo 6.



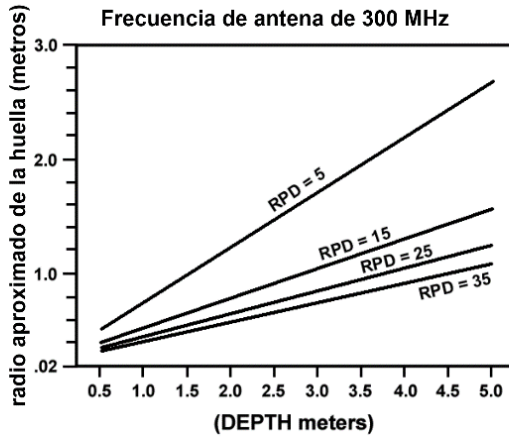
**Figura 3.18:** La energía del radar se esparce en una proyección cónica a medida que viaja hacia el suelo. El tamaño aproximado de la huella a una profundidad en el suelo se puede estimar a partir de la frecuencia de la antena y una estimación del RDP del suelo a través del cual pasa la energía.

Una estimación del tamaño de la huella también es importante al diseñar el espacio entre transectos dentro de una cuadrícula, de modo que todas las características de importancia en el subsuelo estén iluminadas por la energía del radar transmitida y, por lo tanto, puedan generar reflejos. En general, el ángulo del cono de transmisión, y por tanto el tamaño de la huella, varía en función de la permitividad dieléctrica relativa del material a través del cual pasan las ondas de la energía del radar emitida por la antena. La ecuación 3 de la figura 3.18 se puede utilizar para estimar el ancho del haz de transmisión a diferentes profundidades. Esta ecuación solo se puede utilizar como una aproximación de las condiciones del mundo real porque supone una permitividad dieléctrica constante del medio a través del cual pasa la energía del radar y una sola frecuencia de antena. Fuera de las condiciones de laboratorio estrictamente controladas, este nunca es el caso. Las capas sedimentarias y de suelo dentro del

subsuelo casi siempre tienen componentes químicos variables, diferencias en la humedad retenida, compactación y porosidad. Estas y otras variables crean un sistema complejo en capas con una permitividad dieléctrica relativa variable y, por lo tanto, patrones de transmisión de energía, que a menudo son difíciles de definir con precisión.

Las antenas de frecuencia más alta, como las de 900 MHz o más, tienen conos de propagación bastante estrechos, mientras que las antenas de frecuencia de 200 y 300 MHz pueden esparcir energía hacia afuera un metro o más a profundidades de solo uno o dos metros por debajo de la superficie del suelo (figura 3.18). Los conos de transmisión de radar en el suelo son en realidad más elípticos que circulares en sección transversal porque el campo eléctrico producido por la antena se genera paralelo a su eje largo (Yalciner 2009) y, por lo tanto, generalmente se irradia hacia el suelo perpendicular a la dirección del movimiento de la antena a lo largo de la superficie del suelo. Si los dipolos de antena se colocan perpendiculares a la dirección de movimiento a lo largo de un transecto (la orientación habitual), el cono de propagación se alarga más paralelo a la dirección de transporte. Esto provocará una mayor propagación hacia el exterior tanto por delante como por detrás de las antenas, y menos hacia los lados.

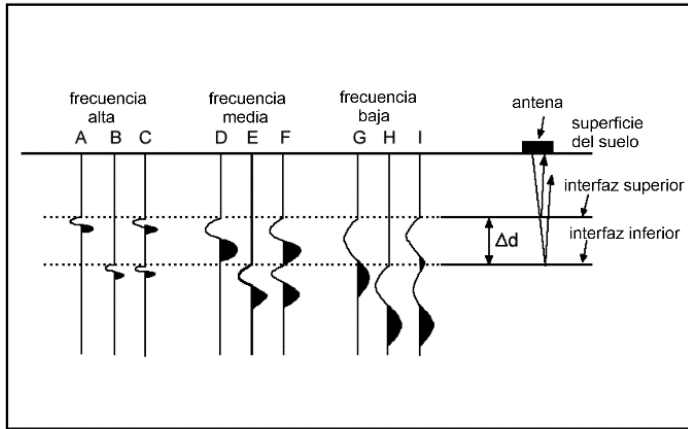
La huella de iluminación es mucho mayor en dimensión cuando la energía del radar viaja a través de un material con un baja Constante Dieléctrica (figura 3.19). El material de mayor Constante Dieléctrica tiende a enfocar el haz de transmisión, disminuyendo el radio de la huella del subsuelo. Por lo tanto, al realizar un levantamiento en tierra con una alta Constante Dieléctrica, las líneas de transecto deben estar más cercanas para asegurarse de que todas las características del subsuelo estén iluminadas con (y por lo tanto puedan reflejar potencialmente) la energía del radar.



**Figura 3.19:** La huella de radiación de energía de radar a ciertas profundidades en el suelo varía con el RPD del suelo a través del cual pasa. Cuanto menor sea el RPD, más se esparcirá la energía cuando abandone la antena y se mueva hacia el suelo. Este gráfico es para una antena de 300 MHz.

Definir una secuencia de superficies horizontales enterradas en el suelo es incluso más complicado que determinar si los objetos individuales pueden ser visibles en los perfiles de reflexión. Para distinguir las reflexiones de radar generadas a partir de dos capas enterradas paralelas (por ejemplo, la parte superior e inferior de un objeto plano grande), las dos interfaces deben estar separadas por al menos una longitud de onda de la energía que las encuentra (Davis y Annan 1989). Si las dos reflexiones generadas no están separadas por esa distancia, las ondas reflejadas resultantes tanto de la parte superior como de la inferior serán destruidas o irreconocibles debido a la interferencia constructiva y destructiva, como se ilustra en la figura 3.20. Cuando dos interfaces están separadas por más de una longitud de onda, se generan dos reflejos distintos de cada interfaz, y tanto la parte superior como la inferior de la característica pueden potencialmente definirse.

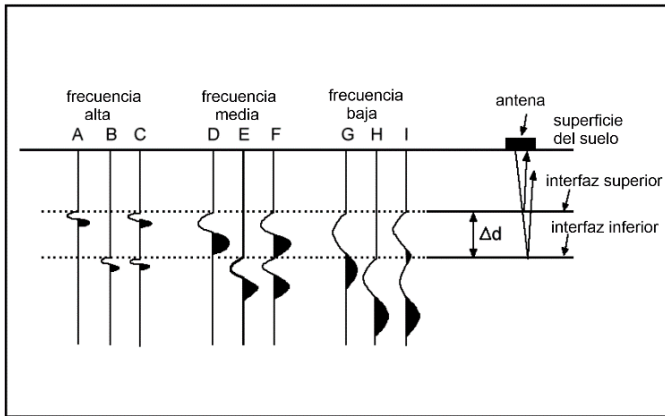




**Figura 3.20:** Dependiendo de la frecuencia de la energía transmitida al suelo y la distancia entre las reflexiones de dos interfaces planas ( $\Delta d$ ) en las interfaces, la parte superior e inferior de una capa pueden ser visibles o no en un perfil de reflexión. La energía de alta frecuencia generará una longitud de onda lo suficientemente pequeña como para que la parte superior (A) y la inferior (B) produzcan una reflexión, y la traza compuesta de las dos (C) pueda definir ambas interfaces. Las antenas de frecuencia media con una longitud de onda más larga apenas tendrán suficiente definición desde la parte superior e inferior (D y E) para producir una traza compuesta (F) que exhiba ambas interfaces. Las antenas de baja frecuencia pueden producir una onda que se reflejará en ambas interfaces (G y H), pero la traza compuesta se ve afectada por la interferencia constructiva y destructiva de las dos ondas, y solo la parte superior de la interfaz es visible en la traza compuesta (I).

Si solo se está mapeando una superficie plana enterrada, entonces la primera que es reflejada desde esa interfaz generalmente se puede definir, independientemente de la longitud de onda. Los reflejos generados por superficies enterradas que utilizan energía de radar de longitud de onda más larga tienden a ser menos nítidos que los de antenas de alta frecuencia, cuando se ven en un perfil de reflexión estándar (Annan y Cosway 1992). Esto se debe a que la energía de longitud de onda más grande tiende a extenderse más a medida que viaja en el terreno (figura 3.19) y, por lo tanto, es reflejada en más área de la superficie (una huella más grande) de lo que ocurriría con energía de frecuencia más alta. Como resultado, las pequeñas irregularidades en la superficie enterrada no serían visibles, ya que probablemente serían "promediadas" en las trazas de reflexión registradas obtenidas de un cono de transmisión más amplio. Esto da como resultado un promedio de muchas reflexiones de la superficie enterrada y una reflexión compuesta más borrosa generada a partir de la interfaz enterrada. Por el contrario, una antena de alta

frecuencia produce un cono de transmisión que es mucho más estrecho, y su resolución de las características del subsuelo en la misma superficie enterrada será mucho mayor ya que los reflejos recibidos en la superficie del suelo se generaron desde mucho menor área de la superficie enterrada. Sin embargo, la compensación es que las ondas de frecuencia más alta generalmente no se propagarán tan lejos en el suelo. Este fenómeno se demuestra en la figura 3.21, donde un horizonte estratigráfico distinto es visible en datos de reflexión con antenas de frecuencia central de 400 y 270 MHz a lo largo de la misma poligonal.



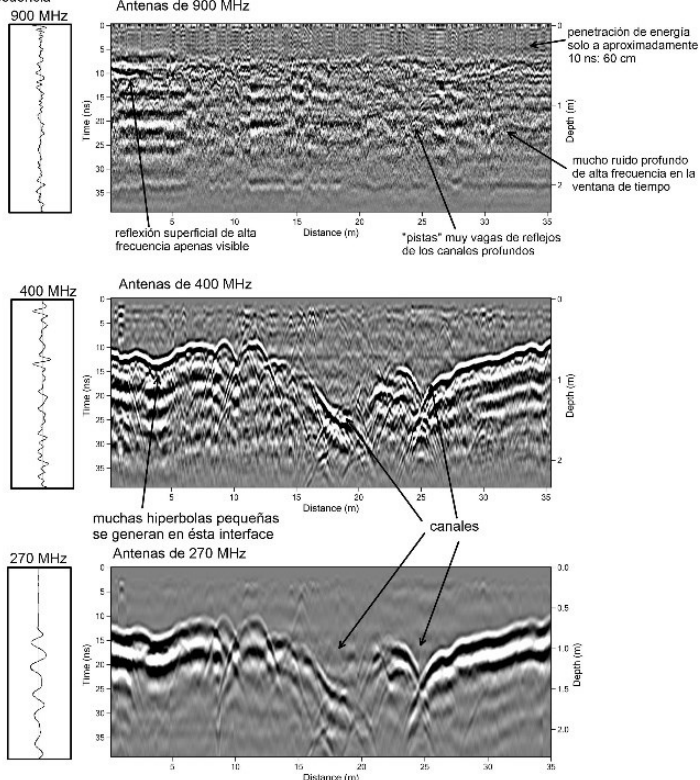
**Figura 3.21:** Variaciones en la profundidad de penetración de energía y resolución en función de la frecuencia del radar. La antena de 900 MHz en esta zona de la costa de Portugal tenía una profundidad de penetración de 10 nanosegundos (60 cm) como máximo. Las antenas de 400 MHz son excelentes para identificar una capa de lecho rocoso y dos canales que inciden en ella. La resolución es muy buena con los 400 MHz alcanzando una profundidad de penetración de unos 25 nanosegundos (1,6 metros). El perfil de reflexión de 270 MHz tenía aproximadamente la misma penetración de profundidad, pero la resolución es mucho más pobre a medida que la energía se propaga con la profundidad y su longitud de onda más solitaria se refleja solo en las capas más gruesas o en fuentes puntuales más grandes.

Las antenas con frecuencia de 900 MHz no eran capaces de transmitir la energía del radar a la profundidad suficiente para definir esta interfaz enterrada (figura 3.21). La resolución con las diferentes frecuencias es una función tanto de la longitud de onda (figura 3.20) como de la cantidad de superficie que refleja energía en función del tamaño de la huella en las superficies de reflexión (figura 3.19). En el método de recopilación por pasos, el espaciado de las trazas también afecta la resolución del subsuelo y la resolución disminuye con un mayor espaciado (Jol y Bristow 2003).

Cualquier estimación de la orientación de la energía transmitida también es complicada puesto que se sabe que la energía del radar propagada desde la mayoría de las antenas de superficie no es una única frecuencia, sino que puede abarcar varios cientos de megahertz alrededor de una frecuencia central. Si se hiciera una serie de cálculos en cada capa del suelo (asumiendo que se pudieran cuantificar todas las variables físicas y químicas del suelo y los sedimentos), y si se asumiera una frecuencia única de antena, entonces se vería el "cono" de transmisión ensancharse en algunas capas, estrecharse en otras y crear un patrón tridimensional muy complejo (figura 3.22). Normalmente, lo mejor que se puede hacer para la mayoría de las aplicaciones es estimar la geometría del haz del radar y el tamaño de la huella en función de las condiciones de campo aproximadas y la frecuencia central de la antena que se utilizará.

Sin embargo, siempre es importante alguna determinación de las dimensiones del haz de propagación antes de realizar un levantamiento para que las líneas de la cuadrícula se puedan espaciar a distancias menores que la dimensión máxima de la huella a la profundidad necesaria para delinear las características de interés (ecuación 3 en la figura 3.18). Cualquier espaciamiento más amplio de los transectos del levantamiento puede permitir que características importantes del subsuelo pasen desapercibidas.

Representa una traza para cada frecuencia



**Figura 3.22:** El cono de transmisión de energía del radar cuando sale de la antena de superficie generalmente se enfocará más a medida que las ondas se refractan con profundidad dentro de materiales de mayor RDP con menor velocidad. Si se atraviesan capas "más rápidas" con valores de RDP más bajos, la energía podría volver a extenderse. En un sistema en capas de diferentes unidades de RDP, el "haz" de transmisión de energía podría variar apreciablemente a medida que la energía viaja a través de muchas capas complejas con diferentes velocidades.

Estudios de campo recientes han demostrado que la cantidad de energía de radar emitida por una antena es mayor directamente debajo de la antena, y tiende a disminuir en la porción más extendida del cono de radiación (Leckebusch 2003; Neal 2004; Neubauer et al. 2002; Yalciner 2009). Por esta razón, los transectos de las líneas de prospección deben ser espaciados lo más cerca como lo permitan las condiciones de campo, el equipo y el tiempo (Jol y Bristow 2003; Neubauer et al. 2002). Las comparaciones de mapas

producidos en cuadrículas que contienen transectos diversos espaciados indican que las imágenes de mayor resolución de características enterradas siempre serán el resultado de los datos de reflexión adquiridos en transectos más cercanos (Conyers et al. 2002; Neubauer et al. 2002).

La energía del radar que se refleja en una interfaz enterrada que se inclina en sentido opuesto a una antena transmisora probablemente no viajará de regreso a la antena receptora en la superficie del suelo. En este caso, se perderá toda la energía reflejada y la interfaz inclinada pasará desapercibida en los perfiles de reflexión. Una superficie enterrada con esta orientación solo sería visible si se ubicara una antena transversal adicional en una orientación en la que esa misma interfaz enterrada esté inclinada hacia la antena receptora. Esta es una de las razones por las que es importante realizar siempre transectos de datos dentro de una cuadrícula poco espaciada y, a veces, en travesías perpendiculares entre sí, para que todas las características enterradas, sin importar su orientación, sean visibles. Este es el mismo concepto que se usa en la tecnología “stealth” (sigiloso) para la construcción de aviones. Las alas y el fuselaje de los aviones furtivos están contruidos con una geometría que refleja la energía en cualquier dirección excepto de regreso a la antena receptora, lo que los hace esencialmente invisibles para el radar.

En la mayoría de los entornos geológicos y arqueológicos, los materiales a través de los cuales pasan las ondas de radar pueden contener muchos objetivos puntuales pequeños que generan buenos reflejos de tamaño muy pequeño (por ejemplo, los pequeños artefactos de cerámica en la figura 3.16), que solo pueden describirse como desorden (si no son el objetivo del levantamiento). La cantidad de ruido visible en un perfil de reflexión depende de la longitud de onda de la energía del radar que se propaga. Si tanto las características a resolver como las discontinuidades que producen el desorden son del orden del 40 % de una longitud de onda, o un poco menos en la dimensión máxima, y aproximadamente del mismo tamaño, entonces los perfiles de reflexión pueden parecer que contienen solo desorden, y no puede haber discriminación entre los dos. El desorden también puede producirse por grandes discontinuidades, como adoquines y cantos rodados, pero solo

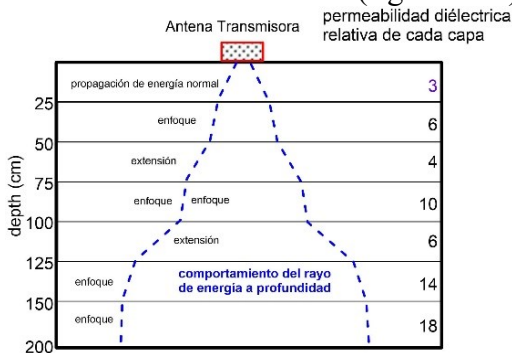
cuando se usa una antena de baja frecuencia que produce una longitud de onda larga.

Siempre habrá energía de radar que se propague en muchas orientaciones complejas dependiendo de los cambios de frecuencia y las complejidades de los materiales en el suelo. Para minimizar la cantidad de datos de reflexión derivados de los lados de una línea topográfica (denominada dispersión lateral), los ejes largos de las antenas suelen estar alineados perpendicularmente al transecto topográfico. Esto permite que el cono de transmisión se alargue en una dirección en línea (figura 3.18). Si hay características alargadas y estrechas en el subsuelo que son paralelas a la dirección de desplazamiento de la antena (y, por lo tanto, paralelas al campo eléctrico generado por la antena), solo una pequeña parte de la energía del radar se reflejará de regreso a la superficie. En este caso, si las antenas no atraviesan casi directamente la característica lineal enterrada, es posible que no sea visible. Las características enterradas alargadas de este tipo normalmente tendrían que estar orientadas perpendicularmente a la dirección del viaje de la antena para que sean visibles en los perfiles de Georadar, y serían visibles como “fuentes puntuales” distintas con hipérbolas de reflexión notable cuando se crucen en esta orientación (figura 3.15). Los ingenieros eléctricos han desarrollado varios diseños de diferentes antenas que producen otros tipos de patrones de radiación, la mayoría de los cuales no se utilizan en los levantamientos de Georadar estándar (Annan y Cosway 1992; Orlando y Slob 2009). Algunos también han experimentado con muchos patrones y orientaciones de radiación de diferentes antenas a lo largo de los transectos, que requieren métodos de procesamiento e interpretación de datos muy diferentes que no se analizan aquí (Jol y Bristow 2003).

### **COMPLICACIONES DE LA PROPAGACIÓN Y REFLEXIÓN DEL RADAR**

Cuando se coloca una antena dipolo en el suelo, se produce un cambio importante en el patrón de radiación, debido al acoplamiento en el suelo (Engheta et al. 1982). Este acoplamiento ocurre cuando las ondas electromagnéticas pasan de la transmisión en el aire a la transmisión dentro del suelo. Durante este proceso, la

refracción ocurre cuando la energía del radar pasa a través de las unidades de superficie, creando un cambio en la geometría del haz del radar que se propaga, con la mayor parte de la energía canalizada hacia abajo en un cono más enfocado desde la antena transmisora (Annan et al. 1975). Cuanto mayor sea la Constante Dieléctrica del material de la superficie a través del cual pasa la energía, menor será la velocidad de la energía del radar transmitida y más enfocado (menos amplio) se vuelve el patrón de transmisión cónico (Goodman 1994). Este efecto de enfoque continúa ocurriendo a medida que las ondas de radar viajan hacia el suelo y se encuentran materiales con una Constante Dieléctrica cada vez más alta (figura 3.22). La cantidad de refracción de energía que ocurre con la profundidad y, por lo tanto, la cantidad de enfoque del haz cónico es una función de la Ley de Snell (Sheriff 1984). De acuerdo con la Ley de Snell, la cantidad de reflexión o refracción que ocurrirá en un límite entre dos medios depende del ángulo de incidencia y los cambios de velocidad que ocurren en la interfaz. En general, cuanto mayor es el aumento de la Constante Dieléctrica con la profundidad (que es el caso en la mayoría de las condiciones del terreno), más enfocado se vuelve el cono de transmisión (figura 3.22).

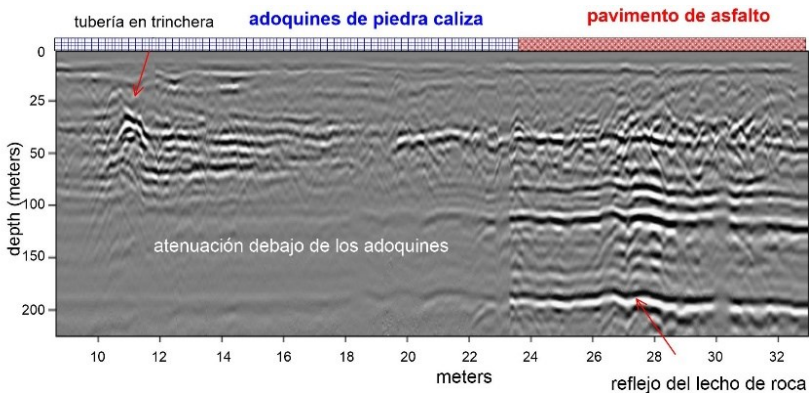


**Figura 3.23:** El acoplamiento energético con el suelo puede ser variable, dependiendo del tipo de materiales superficiales presentes. En este perfil, recolectado a lo largo de una calle en el sur de Portugal, los adoquines de piedra caliza tenían malas propiedades de acoplamiento y la energía se propagaba a solo unos 75 cm en el suelo. Cuando las antenas cruzaron sobre asfalto en el lado derecho del perfil, el acoplamiento de energía mejoró dramáticamente. Los reflejos de gran amplitud que son visibles a unos 200 cm de profundidad en el lado derecho del perfil mientras que son apenas visibles bajo el pavimento de adoquines de piedra caliza.

Esto se debe a que las capas de suelo y sedimento más profundas en el suelo suelen ser más compactas y tienen una mayor

saturación de agua, lo que nos lleva a valores de la Constante Dieléctrica más altos. Teóricamente, la energía de radar podría ampliar los movimientos de energía más profundos en el suelo si se encontraran unidades de menor constante dieléctrica, lo que podría ser el caso en algunos entornos inusuales.

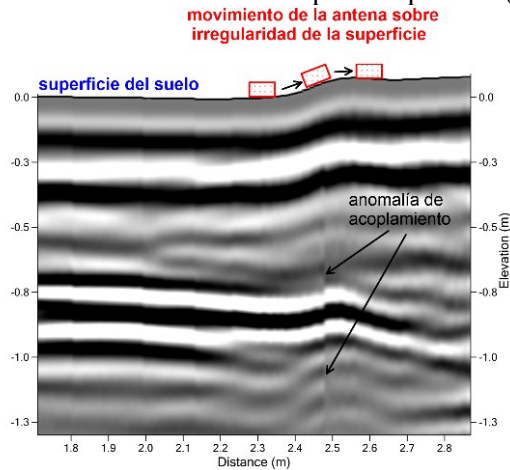
El tipo de materiales de superficie dentro de los cuales se acopla la energía del radar también afectará en gran medida la amplitud de las ondas reflejadas debajo de él. En la figura 3.23, se registraron buenas reflexiones de radar de aprox. 40 ns a través de un material de superficie de adoquines de piedra caliza, pero cuando las antenas cruzaron el asfalto, la cantidad de energía acoplada con el suelo aumentó considerablemente. Las reflexiones a lo largo del mismo transecto se registraron a más de 100 ns cuando la superficie del suelo consistía en un buen material de acoplamiento, lo que ilustra cómo el acoplamiento de superficie puede afectar dramáticamente la profundidad de penetración de energía y las amplitudes de reflexión resultantes. En este caso, los adoquines de piedra caliza parecen reflejar la energía que se propaga en muchas direcciones, dispersándola de modo que muchas ondas no viajan hacia el suelo para ser reflejadas (Conyers 2012a: 88). El resultado son reflejos de menor amplitud debido a la falta de energía que penetra a profundidad bajo los adoquines.



**Figura 3.23:** El acoplamiento energético con el suelo puede ser variable, dependiendo del tipo de materiales superficiales presentes. En este perfil, recolectado a lo largo de una calle en el sur de Portugal, los adoquines de piedra caliza tenían malas propiedades de acoplamiento y la energía se propagaba a solo unos 75 cm en el suelo. Cuando las antenas cruzaron sobre asfalto en el lado derecho del perfil, el acoplamiento de energía mejoró dramáticamente. Los reflejos de gran amplitud que son visibles a unos 200 cm de profundidad en el lado derecho del perfil mientras que son apenas visibles bajo el pavimento de adoquines de piedra caliza.



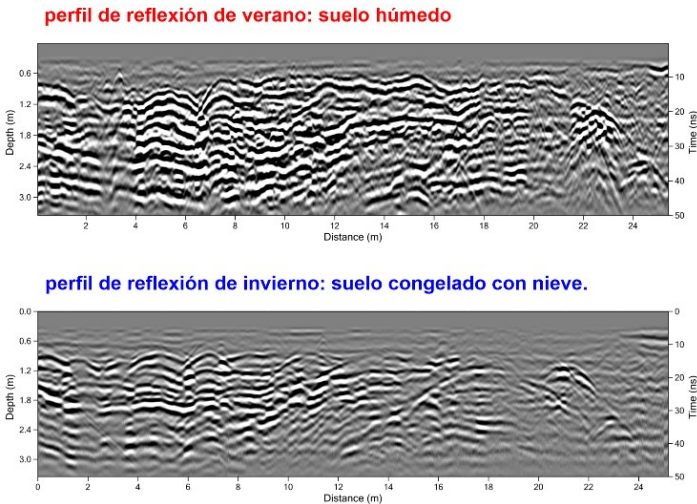
Las variaciones de acoplamiento de energía del radar también son importantes porque estos cambios en la profundidad de propagación y las amplitudes de reflexión pueden confundirse con variaciones "reales" en la reflectividad de los materiales en el suelo cuando se ven en perfiles. A medida que las antenas se mueven sobre diferentes materiales de la superficie (figuras 3.24, 3.25) o se mueven sobre obstrucciones de la superficie como rocas o hierba, el acoplamiento también cambiará, a veces drásticamente y en una distancia muy corta a lo largo de un transecto. Esto puede crear muchos perfiles de reflexión extraños y difíciles de interpretar con diferentes amplitudes de ondas, ninguna de las cuales refleja las condiciones "reales" del subsuelo. El acoplamiento uniforme, con poca variación en la forma de onda transmitida a lo largo de los transectos del radar, ocurre en superficies pavimentadas y en terrenos planos o áreas con césped cortado. En terrenos irregulares, se debe tener mucho cuidado de mantener las antenas cerca del suelo y aproximadamente en la misma orientación que la superficie (figura 3.25).



**Figura 3.24:** Cuando las antenas se mueven sobre un terreno irregular, el acoplamiento de la antena con el terreno cambia y la energía se mueve hacia abajo de manera diferente, produciendo roturas anómalas en los reflejos de las capas, que podrían malinterpretarse como cambios geológicos u otros cambios importantes en materiales enterrados.



**Figura 3.25:** Recopilación de datos GPR en nevadas intensas. La nieve permite un buen acoplamiento de energía con el suelo subyacente, pero la energía se esparcirá en la capa de nieve y producirá reflejos menos distintos desde el punto de vista aéreo en el suelo.



**Figura 3.26:** Comparación de perfiles a lo largo del mismo transecto en dos condiciones del terreno. En verano (perfil superior) la resolución de este terreno de capas complejas es muy buena, con pequeñas discontinuidades y capas mucho mejor definidas. En invierno con manto de nieve y suelo helado (Figura 3.25) los reflejos generados desde las mismas capas son un promedio sobre más área de las discontinuidades enterradas ya que la energía de la antena de transmisión de superficie está menos enfocada al entrar al suelo y por lo tanto aparecen reflejos generados. más continuo y menos distinto.

El suelo congelado, especialmente con una fina capa de nieve, a menudo puede ser una excelente superficie de acoplamiento de energía que produce poca variación en la forma de onda transmitida. De hecho, algunos de los datos de Georadar de la más alta calidad se han adquirido en condiciones de suelo helado, con una excelente penetración de

profundidad y el registro de ondas de gran amplitud. Los datos recopilados en el mismo suelo, después de que el suelo se descongela, a menudo pueden producir resultados decepcionantes debido a una diferencia drástica en el acoplamiento de energía. Un sondeo en particular que se llevó a cabo en Colorado es notable porque el suelo estaba congelado cuando la recopilación de datos comenzó temprano en la mañana, lo que produjo datos de reflexión de alta calidad. A medida que avanzaba el día y el sol derretía lentamente la superficie del suelo, se hizo evidente una disminución notable en la profundidad de penetración de la energía junto con una disminución en la amplitud de las ondas reflejadas. Este cambio fue totalmente el resultado de diferencias en el acoplamiento de energía y no diferentes componentes de los materiales en el suelo.

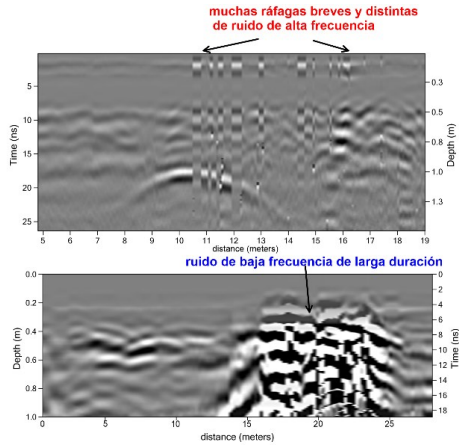
Se pueden producir perfiles de reflexión muy diferentes según las condiciones del terreno. El agua, el hielo y la nieve pueden afectar el acoplamiento de energía, así como la atenuación en la definición de la característica a profundidad y su reflexión. El contenido de agua en el suelo es la variable más importante en la penetración a profundidad y definición del Georadar. La distribución de humedad dentro de las unidades limítrofes de sedimentos y suelos de diferente porosidad y compactación es lo que produce reflejos en sus contactos, cuanto mayor es la diferencia de agua a lo largo de los límites, mayores son las amplitudes de reflexión producidas. En suelo totalmente saturado, los reflejos de las ondas de radar se generan en los contactos entre unidades de diferentes porcentajes de agua ligada. Por ejemplo, en un lago, los únicos reflejos generados son en las interfaces entre arena y arcilla donde las diferencias de porosidad (los vacíos retienen el agua) pueden variar entre 30 y 50% (Conyers 2012a: 75).

Las condiciones de congelación permiten que la energía del radar se acople fácilmente al suelo y, a menudo, se obtiene una excelente resolución y penetración de profundidad cuando las antenas se colocan directamente sobre el hielo. La nieve también es un medio excelente para la penetración de energía y el acoplamiento de antenas (figura 3.25) y se debe tener en cuenta la cantidad de energía que se propaga con la profundidad, en esas condiciones. Con nieve en el suelo, con una constante dieléctrica de 3 (Tabla 3.1) habrá una mayor dispersión del haz de transmisión del radar cuando sale de la antena (figura 3.19). Esto promediará efectivamente las reflexiones registradas de una interfaz en el suelo produciendo un perfil más "promedio" donde muchas reflexiones de fuentes puntuales más pequeñas son efectivamente invisibles (figura 3.26). La Figura 3.26 es una ilustración de este fenómeno que muestra dos perfiles a lo largo del mismo transecto recolectados en diferentes condiciones de superficie. Durante las condiciones de verano, se pueden

ver muchos más detalles en el perfil de reflexión, ya que la constante dieléctrica del suelo es de aproximadamente 12. Con esta constante dieléctrica, el diámetro de la "huella" de energía de 400 MHz a 1 m de profundidad es de aprox. 63 cm (tabla 3.2 y Ecuación 3 en la figura 3.18). Cuando la constante dieléctrica del suelo disminuye a 3 en suelo cubierto de nieve y congelado, el diámetro de la "huella" a 1 metro de profundidad con la misma antena aumenta a unos 210 cm. Este aumento en la propagación con la profundidad en el suelo congelado está provocando un promedio de los reflejos devueltos a la antena de superficie porque esas ondas se generaron a partir de una mayor cantidad de material reflectante en el suelo. Ese promedio filtra los reflejos de las características enterradas más pequeñas y solo las características de reflexión enterradas más amplias son visibles. Una comparación de reflexiones a lo largo del mismo perfil en estas dos condiciones muestra dramáticamente estas diferencias (figura 3.26)

Una complicación adicional que afecta la resolución de los reflejos en el suelo es el ruido de fondo, que casi siempre se registra durante los levantamientos de Georadar. Las antenas de radar de penetración terrestre emplean energía electromagnética de frecuencias similares a las que se utilizan en la televisión, la radio FM y otras bandas de comunicación por radio, por lo que casi siempre hay generadores de ruido cercanos de algún tipo (figura 3.2). Si hay un transmisor de radio activo en las cercanías del levantamiento, entonces puede haber más interferencia de lo habitual, pero incluso cuando se está lejos de la ciudad, generalmente habrá algún tipo de ruido de fondo. La mayoría de los transmisores de radio tienen un ancho de banda muy estrecho; si se conoce su frecuencia, teóricamente podría determinarse de antemano, y se puede seleccionar una frecuencia de antena que esté lo más alejada posible de cualquier frecuencia que pueda generar reflejos espurios en los datos. Sin embargo, con el ancho de banda amplio de la mayoría de las antenas de Georadar, generalmente es difícil evitar por completo tales efectos de transmisores externos, y cualquier ajuste importante en la frecuencia de la antena puede afectar los objetivos del estudio.

El ruido electromagnético externo generalmente solo se convierte en un problema significativo si el sitio de estudio está ubicado en una ciudad, cerca de una base militar, un aeropuerto o antenas de transmisión de radio. Un levantamiento realizado cerca de un sitio de investigación militar de EEUU fue interrumpido ocasionalmente por ruido de radar de fuentes desconocidas..



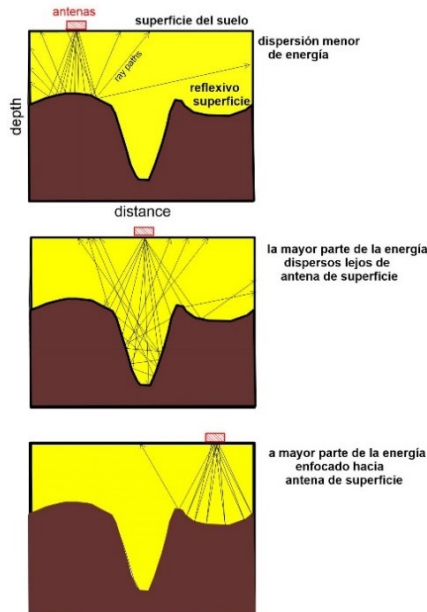
**Figura 3.27:** A veces, el ruido de energía electromagnética que se mueve a través de la atmósfera abrumará totalmente la energía registrada en una antena de superficie desde el interior del suelo. En el perfil superior, muchas pequeñas ráfagas de ruido de alta frecuencia abruma los reflejos desde el interior del suelo en distancias cortas a lo largo del transecto de la antena donde se estaban recogiendo los reflejos. Una duración más prolongada de ruido de frecuencia más baja en el perfil más bajo destruye totalmente cualquier energía reflejada del suelo durante un largo período de tiempo y unos 12 metros de reflejos desde el suelo son invisibles. Se desconoce la fuente de estas transmisiones, pero los datos se recopilaban cerca del campo de misiles White Sands en Nuevo México, donde se sabe que hay muchas instalaciones militares con comunicación por radio.

A veces, este ruido era visible durante la recolección como trazas periódicas de reflexión de muy alta amplitud que ocurrían en ráfagas cortas, y otras veces era una frecuencia más baja que abrumaba totalmente cualquier reflexión derivada del interior del suelo (figura 3.27). Cuando este misterioso transmisor o transmisores estaban activos, se intentaron muchos esquemas diferentes de filtrado de frecuencia, sin éxito. Finalmente, en aproximadamente una hora, todo el ruido desapareció por completo y la recopilación de datos pudo continuar. Las fuentes de la energía electromagnética interferente nunca se descubrieron.

La reciente proliferación de teléfonos celulares (móviles) que se pueden usar en las cercanías durante la adquisición de datos también se ha convertido en un problema, ya que producen ruido de radio FM en las mismas frecuencias que algunas antenas de Georadar. Este tipo de ruido se ha observado al recopilar datos de Georadar cerca de una carretera muy transitada donde la interferencia generada por los automovilistas que pasaban usando teléfonos celulares interrumpía periódicamente los reflejos grabados. La mayoría de las veces, un teléfono celular debe estar muy cerca de la

antena receptora y en uso para interferir con las antenas de Georadar.

El reflejo de una superficie enterrada que no es horizontal y que quizás contiene crestas o depresiones, o cualquier otra característica irregular, puede enfocar o dispersar la energía del radar, dependiendo de la orientación de la superficie y la ubicación de la antena en la superficie del suelo. Si un plano reflectante del subsuelo está inclinado lejos de la ubicación de la antena de superficie o tiene la forma de que la superficie sea convexa hacia arriba, la mayor parte de la energía se reflejará alejándose de la antena y no se registrará ninguna energía de retorno o se registrará una reflexión de muy baja amplitud. (figura 3.28).

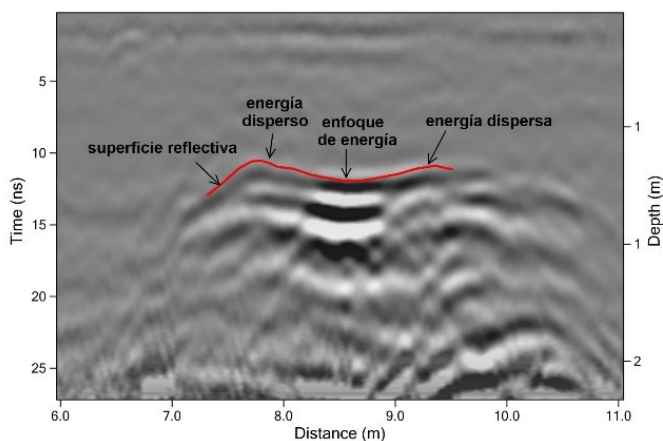


**Figura 3.28:** La energía de radar proyectada desde una antena de superficie se dispersará cuando una interfaz convexa ascendente sea la superficie de reflexión (imagen superior). Las trincheras zanjadas profundas u otras características casi verticales (imagen central) producirán una gran cantidad de dispersión y poca energía llegará a la antena de superficie para ser registrada, haciendo que las características de este tipo sean casi invisibles en los perfiles de reflexión. Las características cóncavas hacia arriba (imagen inferior) enfocarán la energía del radar, produciendo reflejos de gran amplitud a partir de características de este tipo.

Esto se denomina dispersión de radar. Lo contrario es cierto cuando la superficie enterrada se inclina hacia la antena o la

superficie es cóncava hacia arriba (figura 3.28). En este caso, la energía reflejada se enfocará y se registrará una reflexión de muy alta amplitud derivada de una parte de la superficie enterrada.

La Figura 3.28 ilustra un ejemplo arqueológico de los efectos de enfoque y dispersión cuando un foso estrecho enterrado está delimitado por un lado por un canal y por el otro por un montículo. Cuando la antena del radar está ubicada a la izquierda del foso profundo, algunos de los reflejos se dirigen de regreso a la antena de superficie, pero hay una pequeña dispersión, lo que genera un reflejo más débil de lo habitual en la superficie enterrada. Cuando las antenas están ubicadas directamente sobre la característica profunda, habrá un alto grado de dispersión y gran parte de la energía del radar, especialmente la que se refleja en los lados del foso, se dirigirá lejos de la antena de superficie y no será grabado. Este efecto de dispersión haría que el estrecho foso fuera casi invisible en los perfiles de reflexión. Cuando la antena está ubicada directamente sobre la depresión más ancha a la derecha del foso, habrá un enfoque de la energía del radar, creando una reflexión de mayor amplitud desde esta parte de la interfaz del subsuelo. Esta condición de enfoque y dispersión es bastante común y puede ocurrir repetidamente a lo largo de una superficie plana enterrada. Se notó al mapear pisos irregulares de edificios romanos enterrados (figura 3.29). Las áreas del piso que se habían hundido crearon una superficie que enfocaba la energía del radar, creando reflejos de mayor amplitud, mientras que pequeñas porciones arqueadas hacia arriba (convexas) de los pisos la dispersaban, produciendo reflejos más débiles.



**Figura 3.29:** Una capa reflectante cóncava hacia arriba enfocará la energía de regreso a la antena receptora de superficie y las amplitudes aumentarán. En áreas convexas hacia arriba de las mismas capas, la energía se dispersa y las amplitudes de reflexión disminuyen. Esta característica de reflexión es un piso en Ashkelon, Israel.

La energía irradiada desde una antena de superficie genera un fuerte campo electromagnético alrededor de la antena dentro de un radio de aproximadamente 1.5 longitudes de onda de la frecuencia central (Balanis 1989; Engheta et al. 1982; Kraus 1950; Sheriff 1984). Dentro de esta zona, se produce el acoplamiento de la energía del radar con el suelo, lo que genera un frente de onda de que se propaga en el patrón de transmisión cónico estándar. Se puede decir que el suelo dentro de aproximadamente 1.5 longitudes de onda de una antena dipolo estándar es técnicamente "parte de la antena" en el sentido de que no se produce radiación dentro de esta zona y, por lo tanto, técnicamente no hay propagación de ondas. Esta zona de campo cercano suele ser visible en los perfiles de Georadar como una región de pocos reflejos que comienzan en la superficie del suelo y continúan hasta cierta profundidad.

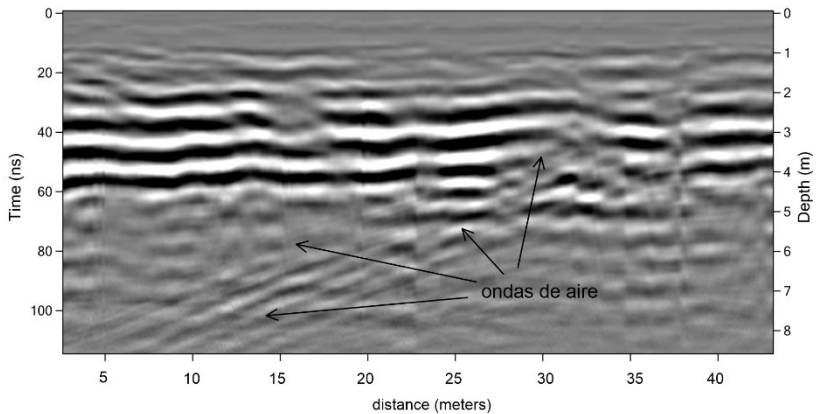
En la literatura de Georadar, esta zona a veces se denomina incorrectamente zona de interferencia cercana a la superficie. Para las antenas de 10, 100 y 1000 MHz, las zonas de campo cercano son de aproximadamente 30 m, 3 m y 30 cm, respectivamente, pero varían según la frecuencia de descarga real. Por lo general, esta zona de campo cercano se registra en perfiles en el área poco profunda donde se registra la onda directa o la onda superficial (figura 3.6) y generalmente se muestra como un área sin reflexión después de que esta onda superficial directa es eliminada por el software de eliminación de fondo (como en las figuras 3.16 y 3.26).

Si se utilizan antenas de baja frecuencia, la zona de campo cercano donde se generan pocas reflexiones significativas puede estar a veces entre 2.5 y 5 m. de la superficie del suelo. Si las características objetivo están ubicadas dentro de la zona de campo cercano, es poco probable que sean visibles en los perfiles de Georadar y se debe usar una antena de mayor frecuencia. Sin embargo, a veces puede haber importantes datos de reflexión registrados dentro de la zona de campo cercano, incluso si las reflexiones no son inmediatamente visibles en los perfiles de reflexión bidimensionales estándar (Ernenwein 2006). Debido al amplio ancho de banda de la transmisión del radar, se seguirá generando algo de energía de alta frecuencia (longitud de onda más corta) incluso desde una antena de frecuencia más baja, que se acoplará con el suelo a una profundidad mucho menor, y aún se pueden generar algunas reflexiones superficiales que serán visibles en perfiles dentro de lo que se define ampliamente como la zona de campo cercano. Si estas reflexiones son lo suficientemente altas en amplitud, aún podrían aparecer como reflejos débiles dentro de la capa cercana a la superficie que de otro modo no tendría reflejos. Es posible que algunos reflejos sutiles en el campo cercano nunca se noten en los



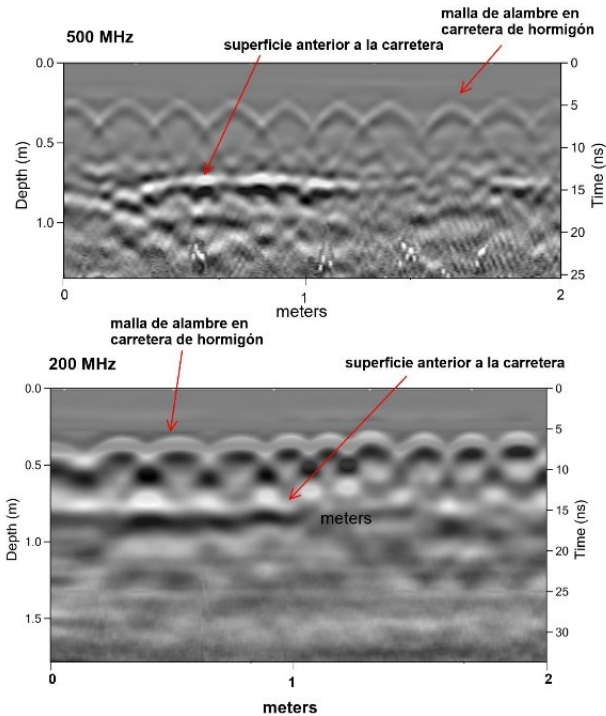
perfiles bidimensionales estándar, pero pueden volverse visibles después de que los datos se procesan por computadora para producir mapas de cortes de amplitud (Ernenwein 2006), que se analizan en el capítulo 7. Otros muy débiles, pero con importantes reflexiones en el campo cercano también se pueden mejorar en los perfiles aumentando las amplitudes en la parte más superficial de los perfiles con la ayuda de un software de computadora. Esta técnica, llamada ganancia, generalmente se realiza durante la configuración del equipo antes de recolectar datos (capítulo 4), pero también se puede aplicar después de regresar del campo, lo cual se analiza en el capítulo 6.

El amplio campo de transmisión de energía de la mayoría de las antenas de Georadar puede producir reflejos no deseados que se producen a partir de características que pueden no estar en el suelo, especialmente con antenas de baja frecuencia que no están bien protegidas. Cuando se utilizan antenas sin blindaje en áreas de líneas eléctricas de alta tensión o edificios cercanos, es probable que se produzcan reflejos a partir de estas características, creando lo que se denominan “ondas de aire” en los perfiles de reflexión (figura 3.30). Estos reflejos son a menudo de gran amplitud y pueden ocultar reflejos significativos del interior del suelo. Se llaman “ondas de aire” porque la energía del radar que las produce viaja hacia y desde las antenas de Georadar sin blindaje en el aire. Como la velocidad de transmisión del radar en el aire no cambia como lo hace en el suelo, las ondas de aire producen reflejos muy rectos que ocurren al mismo tiempo en los perfiles cuando las antenas se mueven paralelas a la superficie reflectante. Cuando las antenas se acercan o se alejan de una fuente reflectante de superficie, la energía que viaja en el aire se registrará como un reflejo directo que aumenta o disminuye gradualmente en el tiempo (figura 3.30). Una vez se intentó un levantamiento de Georadar con antenas de 300 MHz mal blindadas en un estacionamiento, delimitado en tres lados por edificios altos, y hubo muchas más reflexiones de ondas de aire registradas desde los edificios que desde el suelo, lo que hizo que los resultados del levantamiento fueran prácticamente inútiles.



**Figura 3.30:** La energía del radar que viaja en el aire desde la antena a un objeto en la superficie y de regreso a la antena se registra como ondas de aire, visibles como reflejos rectos e inclinados en este perfil. Estos datos se recopilaron con una antena de 300 MHz sin blindaje cerca de una carretera en El Salvador delimitada por una cerca de alambre que reflejaba la energía del radar. Las ondas de aire son rectas porque viajan a la velocidad de la luz hacia y desde la antena transmisora y no hay variación en la velocidad, a diferencia de todas las ondas que viajan en el suelo.

El problema de las “ondas de aire” se encontró en gran medida dentro de una excavación profunda cuyos lados estaban sostenidos por barreras metálicas para evitar que colapsaran (Carrozzo et al. 2003; Nuzzo 2005). Las ondas de aire de alta amplitud generadas a partir de las barreras metálicas abrumaron o interfirieron con los reflejos del interior del suelo, lo que requirió una compleja serie de pasos de procesamiento para eliminarlos. Esto se hizo primero produciendo un perfil medio de los reflejos de las ondas de aire generadas a partir de las paredes metálicas, lo cual fue posible porque las paredes estaban a una distancia conocida de las antenas y se conocía la velocidad de las ondas de aire (la velocidad de la luz) y se calcularon sus llegadas. Los perfiles de reflexión medios de las ondas de aire predichas se restaron luego de los perfiles de reflexión reales para producir perfiles de reflexión residuales, que luego se procesaron para aumentar las amplitudes restantes generadas desde el interior del suelo. Se lograron buenos resultados, pero solo después de importantes y prolongados pasos de procesamiento de datos.



**Figura 3.31:** Las barras de refuerzo metálicas enterradas en el hormigón producen reflejos hiperbólicos espaciados uniformemente. En el perfil superior recogido con antenas de 500 MHz, pasa suficiente energía a través de las obstrucciones metálicas cercanas a la superficie para producir una imagen útil de la superficie horizontal enterrada. En el perfil inferior, recolectado a lo largo del mismo transecto, la energía de 200 MHz se esparce más y mucho se refleja en las barras de refuerzo de metal, por lo que el horizonte enterrado está menos definido. Estos perfiles se recopilieron en el centro de Reno, Nevada, USA.

Los objetos metálicos superficiales o cercanos a la superficie a menudo pueden crear múltiples reflejos que “resuenan” a través de un perfil o crean una serie de hipérbolas de reflexión superficial, obstruyendo algunas o todas las características debajo de ellos (figura 3.31). Esto es muy común cuando se realizan levantamientos de Georadar en superficies de carreteras donde se utilizan barras de refuerzo metálicas para estabilizar el hormigón o donde hay una gran cantidad de tuberías enterradas. Los alambres o varillas metálicas enterrados que se usan como refuerzo en carreteras y aceras a menudo producen muchos reflejos hiperbólicos igualmente espaciados, los cuales son muy distintivos en los perfiles de reflexión (figura 3.31). Incluso con este tipo de obstrucción de energía cercana a la superficie, parte de la energía del radar seguirá viajando a través del metal, reflejándose en otros materiales enterrados

más profundamente en el suelo, y a veces aún se pueden obtener datos utilizables. La energía de frecuencia más alta está más enfocada y, por lo tanto, más ondas pueden viajar entre el metal, creando reflejos más coherentes debajo del metal (figura 3.31). El perfil de frecuencia más baja muestra la misma superficie, pero está mucho menos definido, ya que la mayor parte de energía se reflejó hacia fuera de la antena de superficie, ya que se extendió con la profundidad y encontró más barras de refuerzo metálicas.

## CAPITULO 4

### Software de Adquisición y Equipos de Radar de Penetración Terrestre

#### SISTEMAS GPR

En los estudios arqueológicos y geotécnicos se utilizan típicamente varios fabricantes diferentes de unidades GPR. Las unidades más utilizadas en América del Norte son fabricadas por Geophysical Survey Systems Incorporated (GSSI), ubicada en North Salem, New Hampshire, USRadar, ubicada en New Jersey y Sensors and Software Inc. de Mississauga, Ontario, Canadá. Hay una presencia creciente en Europa con MALÅ en Suecia e IDS en Italia, con otros fabricantes que comienzan en China y en otros lugares, todos los cuales comercializan sistemas GPR multiusos con excelentes aplicaciones arqueológicas y geotécnicas.

La mayoría de los sistemas producidos para estudios GPR de propósito general emplean antenas que transmiten energía de radar con pulsos de una frecuencia central, mientras que la mayoría también está desarrollando sistemas de canales múltiples. Los sensores, las antenas y el software se desarrollaron originalmente para moverse en pasos, registrando datos a intervalos específicos a lo largo de transectos en cuadrículas, pero los modelos recientes pueden operar tanto en modo continuo como en modo de adquisición de rueda topográfica (codificador u odómetro) y en algunos casos sus antenas están diseñadas para que puedan separarse o unirse para una recolección más normal.

Todos los sistemas GPR en el mercado tienen la capacidad de recolectar datos a lo largo de los transectos utilizando algún tipo de odómetro o unidad GPS que mide la distancia y los espacios de las trazas de reflexión por igual a lo largo de los transectos (figura 3.5) y se colocan con precisión en el espacio. Las ruedas de los odómetros ruedan a lo largo de la superficie del suelo y sus revoluciones y el número de trazas de reflexión recopiladas se calibran para conocer su distancia.

Existen muchas similitudes y algunas diferencias entre modelos y fabricantes de unidades GPR. La mayoría de los modelos nuevos son lo suficientemente compactos como para que una persona pueda, teóricamente, recolectar una gran cantidad de transectos por sí sola. Estos sistemas colocan las antenas, la fuente de energía y el sistema de control en un carro que se puede rodar por el suelo o colocar en una mochila, lo que alivia al operador de la antena de tener que estar atado a una estación base, que era la forma en que anteriormente solían recolectarse los datos GPR en la década de 1990. La mayoría de los sistemas pueden funcionar durante muchas horas con baterías ligeras recargables, mientras que

algunos sistemas especializados o anticuados funcionan con baterías de 12 voltios o con corrientes eléctricas domésticas. Todos los sistemas GPR contienen uno o más discos duros internos u otros medios de almacenamiento y ejecutan un programa de software para llevar a cabo la adquisición y almacenamiento de datos de reflexión. Los sistemas suelen tener varios puertos diferentes que permiten que los datos adquiridos se transfieran a una computadora personal después de que se completa un levantamiento. Los modelos más nuevos guardan datos en tarjetas de memoria flash o chips que pueden contener muchos cientos de megabytes de datos con poco uso de energía, lo que hace que estos sistemas sean muy livianos y permitan que los datos se descarguen rápidamente a otras computadoras para su procesamiento.

Todos los sistemas GPR emplean una pantalla de computadora que es necesaria para la calibración previa al levantamiento y que también permite ver los perfiles de reflexión en tiempo real durante la recolección. A veces, las pantallas están integradas en la caja de control del sistema o se puede usar una desde una computadora portátil periférica (figura 3.5).

Todos los fabricantes están introduciendo continuamente nuevos modelos de sistemas GPR, esforzándose por lograr un tamaño compacto, un uso de la batería de mayor duración, facilidad de transporte y de recopilación de datos. Ha habido algunos sistemas desarrollados recientemente que son versiones "simplificadas" de unidades GPR más estándar, que se pueden usar para encontrar tuberías o huecos en el suelo rápidamente y para la ubicación de servicios públicos enterrados que no requieren un complejo procesamiento posterior a la adquisición. Estos sistemas simples tienen poca capacidad para calibrarse en condiciones de campo inusuales o almacenar conjuntos de datos complejos que luego pueden procesarse con el software de GPR y deben evitarse para la mayoría de las aplicaciones arqueológicas, geológicas y geotécnicas.

Existe un tipo de sistema GPR que utiliza una tecnología de "frecuencia escalonada", que enfoca un haz de radar estrecho de diferentes frecuencias en el suelo. Esta técnica que utiliza un sistema de antena en espiral (Leckebusch 2011; Noon et al. 1994; Sala y Linford 2012; Tomizawa et al. 2000; Valle et al. 2000), aún no ha tenido mucha aplicación y no se discutirá más en este libro.

Se han desarrollado otros sistemas GPR para recolectar reflexiones de radar dentro o entre pozos (Wright y Lane 1998) colocando una antena transmisora dentro de un pozo debajo de una característica conocida y recolectando pulsos de radar en una matriz de antenas ubicadas en la superficie del suelo.

Los sistemas GPR estándar constan de tres elementos principales, la unidad de control (generador de impulsos, computadora y software

asociado), las antenas (antenas de transmisión y recepción emparejadas) y la unidad de visualización (pantalla de computadora) (figura 3.5). La unidad de control produce un pulso eléctrico de alto voltaje, que se envía a través de cables a la antena transmisora o se genera directamente en la antena transmisora, que amplifica el voltaje y da forma al pulso y luego lo emite. Los cables que conectan las antenas al sistema de control vienen en diferentes longitudes y están fabricados con filamento de cobre coaxial o material de fibra óptica. Estos cables conectan las antenas al sistema y transmiten los datos y el pulso eléctrico que produce la onda que se transmite, o solo los datos si el pulso eléctrico se crea directamente en la antena. Los sistemas que producen el pulso eléctrico directamente en la antena utilizan los cables de fibra óptica para transmitir solo una señal digital entre las antenas y el sistema de control, lo que reduce en gran medida parte del ruido relacionado con el equipo que puede afectar la claridad de la señal en algunos cables coaxiales. (Davis y Annan 1989). Los conectores de fibra óptica, sin embargo, no siempre son “duraderos en el campo” y la mínima cantidad de polvo en una conexión, o cualquier desgaste durante la adquisición de datos, puede hacer que funcionen mal. Cuando solo se necesitan cables cortos de fibra óptica para conectar dispositivos periféricos con la unidad de control, y todos los componentes se transportan en un carro o mochila, se puede minimizar el desgaste de los cables de fibra óptica.

Todos los sistemas GPR generan las ondas de radar que se propagan directamente en la antena. Algunos sistemas transmiten la forma de la onda recibida que regresa desde el suelo al sistema de control para registrarla como datos digitales o como datos analógicos en forma de cambios de voltaje, que luego se pueden digitalizar y almacenar en el sistema de control (Annan y Davis 1992). Por lo general, se obtiene una mejor calidad de los datos cuando las ondas transmitidas y recibidas viajan la menor distancia en cables analógicos, donde se puede generar ruido del sistema.

La mayoría de los sistemas GPR tienen un dispositivo marcador de mano que se puede utilizar para registrar la posición de la superficie (marca fiducial) de las antenas a lo largo de un transecto de levantamiento durante la adquisición de datos de reflexión en los días anteriores a la introducción de las ruedas topográficas o el hardware de ubicación GPS. Hoy en día, los marcadores manuales generalmente solo se activan para producir marcas digitales en un perfil de reflexión como una nota de una obstrucción en la superficie o alguna otra característica de evento de interés que se revisará durante el análisis posterior a la adquisición. Estas marcas de referencia se almacenan en la cadena de datos grabada como un bit identificable de datos en una traza de reflexión donde se coloca una

marca. Antes de los odómetros y la tecnología GPS, los botones marcadores se usaban para identificar la distancia a intervalos estándar a lo largo de los transectos de la antena, generalmente cada pocos metros, en las estaciones que habían sido levantadas previamente con una cinta métrica. Esto permitió que todos los datos de reflexión se colocaran en el espacio para el procesamiento posterior a la adquisición. En la actualidad, este procedimiento rara vez se utiliza.

### **SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS: PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN**

Los ajustes manuales siempre son necesarios antes de realizar cualquier levantamiento GPR (Conyers 2012a: 28; Kemerait 1994). En todas las unidades GPR recientes, los ajustes del equipo son controlados automáticamente por el software de adquisición, y hay configuraciones programadas específicamente para ciertos usos, como la ubicación de la tubería o el escaneo de concreto. Para la mayoría de las aplicaciones arqueológicas y geotécnicas, estas calibraciones de configuración previas a la recolección deben evitarse y las configuraciones deben ajustarse para todas las variables del suelo y del equipo que se encuentran comúnmente en cada nueva ubicación de levantamiento. Todos los sistemas GPR tienen una interfaz de software para programar parámetros de recopilación, que se pueden controlar desde un teclado o panel táctil o mediante una computadora portátil adjunta.

La mayoría de las unidades GPR digitales tienen un procedimiento en el que se puede ingresar información general de encabezado para cada archivo o la cuadrícula como un todo. Esta información generalmente incluye la fecha del trabajo de campo, la frecuencia de la antena, el nombre del sitio, el nombre o número de la red y otra información o comentarios pertinentes. Muchos sistemas GPR permiten que la mayor parte de esta información se ingrese al inicio de la adquisición, y se puede modificar para cada transecto y archivo dentro de una cuadrícula, si se desea. En algunos sistemas, las configuraciones de adquisición discutidas aquí se registran automáticamente en los encabezados de cada archivo y con otros en un archivo separado para cada perfil recopilado. Dondequiera que se almacenen estos datos de encabezado, la información que contienen se puede ver más adelante para determinar los parámetros de configuración y recopilación, lo que puede ser especialmente útil si no se guardan o se pierden buenas notas de campo. Todo el software de procesamiento utiliza los datos de los encabezados para producir imágenes a partir de los datos para su posterior análisis e interpretación. Cada perfil dentro de una cuadrícula generalmente se guarda



automáticamente como un archivo separado en el medio de almacenamiento de la computadora a medida que se recopilan.

Los nombres y la secuencia de estos archivos de datos también deben anotarse en un libro de campo a medida que se registran. Los archivos generalmente se registran secuencialmente, con el primer perfil de reflexión en una cuadrícula guardado como archivo1, archivo2, archivo3, etc. Para evitar confusiones cuando se recopila más de una cuadrícula de datos en un día, generalmente es bueno comenzar cada perfil en una cuadrícula como archivo1 en un directorio de computadora separado o con un nombre diferente, y es importante siempre tomar buenas notas de sus ubicaciones y orientaciones dentro de esas rejillas.

Todos los sistemas GPR permiten al usuario seleccionar el período de tiempo durante el cual se registran los datos de reflexión. La ventana de tiempo se define como la cantidad de tiempo de viaje en dos direcciones, medido en nanosegundos, en el que la antena receptora “escuchará” y registrará la energía de onda de radar reflejada (figura 3.6). Esta ventana normalmente se abrirá justo antes de que se transmita el pulso del radar y se cerrará después de que se hayan registrado todos los reflejos de interés, desde la profundidad deseada en el suelo. Si se conocen la velocidad del material y la profundidad aproximada de las características que se van a resolver, se puede estimar con anticipación la cantidad de tiempo necesario para que la energía del radar viaje hacia abajo y luego se refleje desde las zonas de interés.

La ventana de tiempo se puede ajustar para que esté abierta durante al este período de modo que se registren todas las reflexiones importantes en todos los transectos dentro de la cuadrícula de levantamiento. Por lo general, debe ajustarse para que se registren más datos de reflexión, a una mayor profundidad, de los necesarios. A menudo, debido a cambios imprevistos en la velocidad del subsuelo, es posible que las reflexiones de las características de interés se reciban en momentos posteriores a la estimación de los cálculos preliminares, y si la ventana de tiempo no está abierta durante el tiempo suficiente, no se registrarán. También es posible que los horizontes de interés enterrados se sumerjan a mayores profundidades o se cubran con un mayor espesor de sobrecarga en algunas partes de una cuadrícula que las estimaciones iniciales, lo que también requiere que se establezca con anticipación una ventana de tiempo más grande para registrarlos.

**Tabla 4.1:** Profundidad en metros a un reflector a través de un medio de un RDP dado

2-way Time (ns)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	40	50	60	80
10	1.50	1.06	0.87	0.75	0.67	0.61	0.57	0.53	0.50	0.47	0.39	0.34	0.27	0.24	0.21	0.19	0.17
20	3.00	2.12	1.73	1.50	1.34	1.22	1.13	1.06	1.00	0.95	0.77	0.67	0.55	0.47	0.42	0.39	0.34
30	4.50	3.18	2.60	2.25	2.01	1.84	1.70	1.59	1.50	1.42	1.16	1.01	0.82	0.71	0.64	0.58	0.50
40	6.00	4.24	3.46	3.00	2.68	2.45	2.27	2.12	2.00	1.90	1.55	1.34	1.09	0.95	0.85	0.77	0.67
50	7.50	5.30	4.33	3.75	3.35	3.06	2.83	2.65	2.50	2.37	1.94	1.68	1.37	1.19	1.06	0.97	0.84
60	8.99	6.36	5.19	4.50	4.02	3.67	3.40	3.18	3.00	2.84	2.32	2.01	1.64	1.42	1.27	1.16	1.01
70	10.49	7.42	6.06	5.25	4.69	4.28	3.97	3.71	3.50	3.32	2.71	2.35	1.92	1.66	1.48	1.35	1.17
80	11.99	8.48	6.92	6.00	5.36	4.90	4.53	4.24	4.00	3.79	3.10	2.68	2.19	1.90	1.70	1.55	1.34
90	13.49	9.54	7.79	6.75	6.03	5.51	5.10	4.77	4.50	4.27	3.48	3.02	2.46	2.13	1.91	1.74	1.51
100	14.99	10.60	8.65	7.50	6.70	6.12	5.67	5.30	5.00	4.74	3.87	3.35	2.74	2.37	2.12	1.94	1.68
110	16.49	11.66	9.52	8.24	7.37	6.73	6.23	5.83	5.50	5.21	4.26	3.69	3.01	2.61	2.33	2.13	1.84
120	17.99	12.72	10.39	8.99	8.04	7.34	6.80	6.36	6.00	5.69	4.64	4.02	3.28	2.84	2.54	2.32	2.01
130	19.49	13.78	11.25	9.74	8.71	7.96	7.37	6.89	6.50	6.16	5.03	4.36	3.56	3.08	2.76	2.52	2.18
140	20.99	14.84	12.12	10.49	9.39	8.57	7.93	7.42	7.00	6.64	5.42	4.69	3.83	3.32	2.97	2.71	2.35
150	22.48	15.90	12.98	11.24	10.06	9.18	8.50	7.95	7.50	7.11	5.81	5.03	4.11	3.56	3.18	2.90	2.51
160	23.98	16.96	13.85	11.99	10.73	9.79	9.07	8.48	7.99	7.58	6.19	5.36	4.38	3.79	3.39	3.10	2.68
170	25.48	18.02	14.71	12.74	11.40	10.40	9.63	9.01	8.49	8.06	6.58	5.70	4.65	4.03	3.60	3.29	2.85
180	26.98	19.08	15.58	13.49	12.07	11.02	10.20	9.54	8.99	8.53	6.97	6.03	4.93	4.27	3.82	3.48	3.02
190	28.48	20.14	16.44	14.24	12.74	11.63	10.76	10.07	9.49	9.01	7.35	6.37	5.20	4.50	4.03	3.68	3.18
200	29.98	21.20	17.31	14.99	13.41	12.24	11.33	10.60	9.99	9.48	7.74	6.70	5.47	4.74	4.24	3.87	3.35
210	31.48	22.26	18.17	15.74	14.08	12.85	11.90	11.13	10.49	9.95	8.13	7.04	5.75	4.98	4.45	4.06	3.52
220	32.98	23.32	19.04	16.49	14.75	13.46	12.46	11.66	10.99	10.43	8.51	7.37	6.02	5.21	4.66	4.26	3.69
230	34.48	24.38	19.91	17.24	15.42	14.08	13.03	12.19	11.49	10.90	8.90	7.71	6.29	5.45	4.88	4.45	3.85
240	35.98	25.44	20.77	17.99	16.09	14.69	13.60	12.72	11.99	11.38	9.29	8.04	6.57	5.69	5.09	4.64	4.02
250	37.48	26.50	21.64	18.74	16.76	15.30	14.16	13.25	12.49	11.85	9.68	8.38	6.84	5.93	5.30	4.84	4.19
260	38.97	27.56	22.50	19.49	17.43	15.91	14.73	13.78	12.99	12.32	10.06	8.71	7.12	6.16	5.51	5.03	4.36
270	40.47	28.62	23.37	20.24	18.10	16.52	15.30	14.31	13.49	12.80	10.45	9.05	7.39	6.40	5.72	5.23	4.53
280	41.97	29.68	24.23	20.99	18.77	17.13	15.86	14.84	13.99	13.27	10.84	9.39	7.66	6.64	5.94	5.42	4.69
290	43.47	30.74	25.10	21.74	19.44	17.75	16.43	15.37	14.49	13.75	11.22	9.72	7.94	6.87	6.15	5.61	4.86
300	44.97	31.80	25.96	22.48	20.11	18.36	17.00	15.90	14.99	14.22	11.61	10.06	8.21	7.11	6.36	5.81	5.03

En la mayoría de las aplicaciones arqueológicas y geotécnicas, una ventana de tiempo de 100 nanosegundos (tiempo de viaje de ida y vuelta) o menor suele ser suficiente para registrar reflejos de 2 a 4 metros de

profundidad, dependiendo de la velocidad de propagación de las ondas de radar. En un material con una permitividad dieléctrica relativa de 8, una ventana de 20 nanosegundos es capaz de registrar reflexiones hasta aproximadamente 1 metro de profundidad (tabla 4.1). Estos tipos de cálculos de profundidad son siempre independientes de la frecuencia de la antena.

Determinar la ventana de tiempo óptima antes de la recopilación de datos es extremadamente importante. Algunos materiales pueden tener permitividades dieléctricas relativas muy altas y, por lo tanto, la energía del radar viaja a través de ellos a velocidades muy lentas. Si ese material también tuviera una conductividad eléctrica baja y, por lo tanto, no atenúa la propagación de la onda de radar, la energía podría viajar muy profundamente en el suelo, pero a un ritmo lento, y sería necesario recolectar reflejos durante una ventana de tiempo más grande de lo habitual. Por ejemplo, si se asume un suelo superficial promedio con un RDP de 9, una ventana de tiempo de 30 nanosegundos permitiría la recolección de reflejos a aproximadamente 1,5 metros en el suelo (tabla 4.1). Si más tarde se determinaba que el RDP real del suelo era 20 (tal vez tenía una gran cantidad de agua que no se había contabilizado previamente), entonces la velocidad de propagación del radar sería mucho más lenta y esa misma ventana de tiempo solo sería habria permitido la recolección hasta aproximadamente 1 metro en el suelo (nuevamente, consulte la tabla 4.1). Si esto se determinara después de que se hubieran recolectado los datos, y las características de interés estuvieran ubicadas entre 1 y 1.5 metros en el suelo, se tendría que repetir todo el levantamiento ya que las reflexiones pertinentes de la profundidad de interés no estarían dentro de los límites programados, ventana de tiempo. Este triste escenario ha sucedido con más frecuencia de lo que muchos practicantes de GPR quisieran admitir. Solo se puede superar prestando mucha atención a las condiciones locales, haciendo estimaciones de velocidad por adelantado (capítulo 5) y ajustando los parámetros de configuración para la ventana de tiempo correcta antes de la recopilación de datos.

Una vez que se establece la ventana de tiempo, se debe seleccionar el número de muestras necesarias para registrar la onda reflejada. Algunos sistemas tienen software que permite elegir muestras en configuraciones, y otros tienen configuraciones predeterminadas para muestras por trazo dependiendo de la ventana de tiempo configurada. Siempre preferimos configurar manualmente las muestras por traza y nunca aconsejar a los usuarios que utilicen la configuración predeterminada.

Una muestra es un valor digital que define una parte de la forma de onda reflejada. Cuantas más muestras digitales haya para definir una onda,

con mayor precisión se definirá la onda digitalmente. Cuanto más tiempo esté abierta la ventana de tiempo, mayor número de muestras se necesitarán normalmente para definir adecuadamente la traza de reflexión de la onda reflejada. Sin embargo, cuantas más muestras se recolecten por traza, más grandes se vuelven los archivos digitales, lo que puede afectar potencialmente la velocidad del procesamiento y visualización de los datos posteriores a la adquisición.

En la mayoría de las unidades se puede seleccionar cualquier número de muestras de datos para definir cada trazo de reflexión. Tradicionalmente, los usuarios de GPR en la investigación geotécnica y arqueológica seleccionaban 512 muestras / traza; sin embargo, 1.024 y 2.048 también son tasas de muestreo comunes para ventanas de tiempo más grandes que las que son comunes en geotecnia y arqueología. Debido al muestreo incremental, que digitaliza un bit de datos por cada pulso generado, si se seleccionan 512 muestras para definir cada traza de reflexión, entonces también debe haber 512 pulsos transmitidos al suelo en sucesión para registrar cada traza. Si este fuera el caso, y también se programa una gran cantidad de trazas de reflexión para recolectar cada segundo o determinada distancia a lo largo del suelo en un transecto, algunos sistemas GPR no serían capaces de generar suficientes pulsos y registrar suficientes muestras por segundo para registrar adecuadamente los datos programados en el sistema. Esto podría convertirse en un problema potencial si las antenas se mueven a lo largo del suelo muy rápidamente y se ha programado la recolección de un gran número de pulsos, muestras y trazas por distancia.

La resolución máxima (definida por la forma de onda) que se puede obtener también depende de la longitud de onda de las ondas reflejadas que son generadas por la antena, la cual es una función de la frecuencia de la antena (tabla 3.2). Las antenas de alta frecuencia generan ondas de longitud de onda más corta que se registran en rápida sucesión, lo que puede necesitar más muestras digitales para definir las dentro de una ventana de tiempo determinada, ya que tienen una forma de onda muy compleja. Cuando se consideran todos estos factores, es fácil ver que se necesitan una serie de estimaciones y supuestos antes de determinar la definición de muestreo. Puede ser necesaria cierta experimentación en el campo mientras las antenas están estacionarias para obtener la tasa de muestreo óptima para la longitud de onda producida y la ventana de tiempo asignada.

Es muy importante en los ajustes previos a la adquisición asegurarse de que la ventana de tiempo no esté abierta durante demasiado tiempo. Cuanto más tiempo esté abierta la ventana de tiempo, más muestras por reflexión serán necesarias para una buena resolución de la forma de onda

grabada y más muestras deberán registrarse. Si se recopilan demasiados datos de reflexión durante una ventana de tiempo prolongada más allá de la profundidad de interés, se necesitarían demasiadas muestras para definir las ondas desde las profundidades en el extremo más alejado del rango donde no se registra nada de interés. La mayoría de los datos digitales registrados definirían entonces ondas reflejadas muy por fuera de la profundidad de interés y las formas de onda generales estarían mal definidas digitalmente. Si este fuera el caso, la capacidad de almacenamiento en un disco duro u otro medio podría llenarse rápidamente con datos inútiles, especialmente si se está realizando un levantamiento grande.

Se suelen aplicar dos métodos de promediado de trazas a los datos, a veces durante la recopilación o posteriormente durante el procesamiento. A veces se denominan filtros horizontales o filtros espaciales (a veces denominados suavizado horizontal). A menudo, los datos se recopilan sin promediar y estos procedimientos solo se pueden aplicar durante el procesamiento posterior a la adquisición (discutido en el capítulo 6). El resultado del filtrado horizontal promediará los reflejos a lo largo de un transecto de levantamiento, eliminando reflejos pequeños o anómalos y produciendo perfiles suavizados.

El apilamiento es un paso de procesamiento que requiere un cierto número de trazas para promediar a medida que se recopilan o más tarde durante el procesamiento de datos. El resultado es un perfil de reflexión que contiene solo las nuevas trazas promediadas. Por ejemplo, un apilamiento de 4 tomará las primeras 4 trazas en el perfil y las promediará, y creará una nueva traza (# 1) de esas trazas promediadas. Luego irá a las trazas 5, 6, 7 y 8 (las 4 siguientes) y producirá una nueva traza (# 2) de esas trazas promedio. El producto final es un perfil de reflexión promediado producido a partir de solo 1/4 de las trazas originales. Si este proceso está programado para que ocurra durante la recolección de datos, la digitalización tomará cuatro veces más tiempo que la recolección no apilada.

El promedio de trazas es muy parecido al apilamiento, pero este cálculo toma un "promedio móvil" de un número programado de trazas en un perfil para suavizar los reflejos. Hay dos tipos comunes de promedios. El promediado de vagones mueve una "caja" de un cierto ancho (definido por un número de trazas) a través del perfil, promediando los trazos dentro de ese "vagón" delante y detrás de cada trazo en el perfil. Esto creará un perfil más suave y promediado y el número de trazos en el perfil seguirá siendo el mismo al final de la operación. Los valores promediados de trazas para el filtrado de vagones son siempre números impares, ya que toma un cierto número de trazas antes y después de la traza en el medio

de la “caja” que se está promediando. Por ejemplo, con una traza con un promedio de 5, promediará 2 trazas al frente y dos detrás de la traza del medio, que es donde se coloca la traza promediada. Ese trazo promediado en el medio se registrará y se mostrará en el perfil suavizado horizontalmente. Este promedio se produce para cada traza a lo largo de un perfil y se puede programar para que se produzca durante la recopilación o durante el posterior procesamiento de datos. El riesgo de recopilar solo datos promediados en el campo es que las reflexiones que podrían ser de importancia se promedian “fuera” y nunca se recopilan para ser identificadas más adelante (Fisher et al. 1992; Grasmueck 1994; Majjala 1992)

Otras formas de promediado de trazas funcionan de la misma manera que los vagones, como las trazas de peso durante la promediación. Algunos programas permiten que se dé un mayor peso a la traza en el medio de una “caja” promediadora, y menos en las trazas más alejadas del medio.

Es importante reconocer que cuantas más trazas de reflexión se apilen o promedien durante el proceso de recolección, más lento debe moverse la antena a lo largo de la superficie del suelo y más trazas deben digitalizarse por cada medida de distancia a lo largo de un transecto para poder lograr el mismo número de trazas de reflexión compuesta por unidad de terreno cubierto. Esto puede ralentizar la recopilación de datos si se programa demasiado promediado para realizar en el campo. Por lo general, es mejor recopilar datos de reflexión en un formato “sin procesar” y realizar estos pasos de promediado de datos durante el análisis y procesamiento de datos posteriores.

Ambos tipos de filtrado horizontal de trazas secuenciales eliminarán eficazmente las formas de onda que pueden haberse generado a partir de irregularidades de la superficie, como pequeñas protuberancias o caídas en la superficie del suelo (Fisher et al. 1992; Grasmueck 1994; Majjala 1992). También filtra los efectos de los cambios de velocidad debido a cambios menores en la saturación del agua, pequeñas rocas o huecos en el subsuelo y cambios en la amplitud debido a las diferencias de acoplamiento de la antena con el suelo.

El filtrado horizontal suele ser una buena idea cuando la superficie del suelo es muy irregular o hay una estratigrafía muy variable en el subsuelo. A menos que se necesite un análisis inmediato en el campo, por lo general es mejor recopilar todas las trazas de reflexión disponibles y apilarlas más tarde durante el procesamiento de datos, solo si se determina que es necesario. De esta manera, los perfiles de reflexión sin procesar y procesados se pueden comparar para estudiar cómo este proceso cambia

los productos de visualización producidos en los procedimientos de datos posteriores a la adquisición.

La mayoría de las antenas GPR suelen generar pulsos de radar a una velocidad de más de 120.000 pulsos por segundo (a menudo medidos en kilohercios [KHz]). Con la tecnología GPR actualmente disponible, es imposible registrar cada traza reflejada individual generada a partir de cada pulso transmitido debido a la rapidez con la que se transmiten los pulsos y luego se reflejan de regreso a la superficie. Para superar este problema, los sistemas de radar muestrean de forma incremental, lo que significa que se debe transmitir un pulso por cada muestra que se registre. Si se programaron 512 muestras para recolectar para cada traza y el sistema se configuró para apilar o promediar 16 trazas secuenciales en una registrada, entonces debe haber al menos 512 pulsos por 16 (8.192) pulsos transmitidos por cada traza de reflexión registrada. En la mayoría de los procedimientos de adquisición, se generan pulsos de radar más que suficientes para que se registren todas las trazas.

La comprensión de la velocidad de transmisión y grabación generalmente se vuelve importante solo cuando se determina la resolución horizontal de los datos de reflexión registrados. Dependiendo de la velocidad a la que las antenas se muevan por el suelo, pueden ser necesarios ajustes de las tasas de grabación y apilamiento para obtener una buena cobertura del subsuelo. Por ejemplo, si es necesario registrar 4 trazas de reflexión completas (definidas por 512 muestras) por centímetro de distancia a lo largo de un transecto (después de apilar 16 trazas en una), entonces se deben transmitir 8.192 pulsos secuenciales multiplicados por 4 (32.768) por cada centímetro de movimiento de la antena. Si el sistema de radar que se está utilizando solo está programado para transmitir a una velocidad de 25.000 pulsos por segundo, no se transmitirán suficientes pulsos para permitir 4 trazos de reflexión registrados por centímetro. Si este fuera el caso, sería necesario realizar algunos ajustes menores antes de registrar los datos: (1) La velocidad de apilamiento podría reducirse; (2) las antenas tendrían que moverse sobre el suelo más lentamente, registrando más trazas de reflexión total por distancia recorrida; o (3) la ventana de tiempo se puede acortar, necesitando menos muestras para definir cada traza (o las tres anteriores). Este es raramente el caso de la mayoría de los sistemas GPR, ya que son capaces de generar tasas de generación de pulsos muy altas.

Si la ventana de tiempo es bastante corta, el apilamiento se minimiza, y si la frecuencia de muestreo se mantiene en 512 muestras por traza de reflexión o menos, generalmente se transmiten pulsos más que suficientes al suelo para registrar las trazas deseadas. Los ajustes que acabamos de comentar suelen ser necesarios solo si las antenas se mueven a una

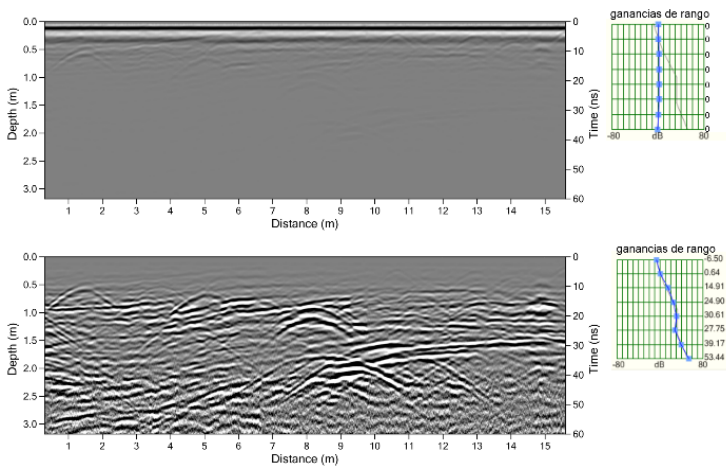
velocidad alta (tal vez remolcadas detrás de un vehículo), se aplican tasas de acumulación muy altas (más de 16 trazas apiladas o promediadas en una) o una velocidad extremadamente alta. La resolución de la forma de onda (muchas muestras por trazo de reflexión) es necesaria para definir las reflexiones del subsuelo dentro de una ventana de tiempo grande. Durante la recolección mediante el odómetro, si la frecuencia de muestreo no se establece lo suficientemente alta como para permitir que se registre el número programado de trazos de reflexión por unidad de distancia recorrida, la mayoría de los sistemas generalmente notificarán al operador con un "bip" advirtiendo al operador que ralentice la velocidad a la que desplaza la antena a lo largo del suelo. Esto permitirá que la frecuencia de muestreo "alcance" el número de trazos que se están registrando. Antes de adquirir datos de reflexión desde el subsuelo, se debe realizar una calibración para que el primer reflejo registrado de cualquier pulso emitido por la antena sea el reflejo de la superficie del suelo (también llamado onda directa). Esto se hace mientras la antena está estable en el suelo en la configuración que se utilizará para todas las adquisiciones de datos posteriores. Cuando se calibra para la posición cero, el primer reflejo visible suele ser de la superficie del suelo, y todos los reflejos posteriores registrados en el tiempo se recibirán de horizontes más profundos en el suelo (Yelf 2004). En todos los sistemas GPR con monitor de video, la onda directa se puede mostrar y es visible como la primera onda de gran amplitud después de un período sin registro de datos (figura 3.6). La mayoría de los sistemas GPR tienen un procedimiento de programación automática que identificará esta primera reflexión y establecerá la posición cero de modo que la reflexión de la superficie del suelo u "onda directa" sea de aproximadamente 1 nanosegundo o más en la ventana de tiempo, y todas las reflexiones posteriores desde las profundidades del suelo se registran más tarde en el tiempo. Los sistemas más antiguos muestran la traza de reflexión en un osciloscopio de manera similar, y la primera reflexión de la superficie del suelo debe ajustarse manualmente y luego se puede configurar el tiempo cero.

La ventana de tiempo también debe programarse siempre de modo que la primera reflexión registrada desde la superficie del suelo o la onda directa no sea exactamente en el tiempo cero, sino que se retrasó un poco por debajo de él, de modo que la superficie del suelo siempre se pueda encontrar en los perfiles de reflexión después de regresar del campo, si hay alguna duda. La mayoría de los sistemas bloquearán esa posición cero y todos los perfiles de reflexión se recopilarán con la superficie del suelo en el mismo lugar dentro de la ventana de tiempo. Cualquier retraso entre el tiempo cero y la reflexión de la superficie del suelo se puede compensar posteriormente durante el procesamiento de datos. Si la función de tiempo



cero automático no está bloqueada en su posición, es posible que la computadora que controla la adquisición de datos pueda reajustar constantemente el tiempo cero a medida que se recopilan los datos, y todos los rastros en el suelo se registrarán en diferentes momentos con respecto a cero, lo que generará un conjunto de datos muy confuso y resultados de levantamiento potencialmente desastrosos.

Debido a la expansión cónica de las ondas de radar transmitidas y la atenuación de la energía del radar a medida que pasa a través del suelo, las llegadas de reflexión posteriores generadas desde las profundidades del suelo casi siempre tendrán amplitudes más bajas que las llegadas anteriormente (figuras 3.3 y 3.6). Para recuperar estas ondas de menor amplitud, el control de ganancia (rango de ganancia) se aplica a todas las trazas de reflexión en un perfil durante el procesamiento de adquisición o posterior a la adquisición (Jol y Bristow 2003; Leckebusch 2003; Majjala 1992; Neal 2004; Shih y Doolittle 1984). Esto amplificará las ondas recibidas desde las profundidades del suelo para que sean visibles (figura 4.1).

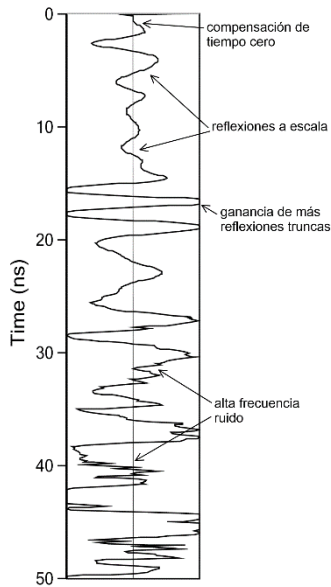


**Figura 4.1:** Un perfil de reflexión sin ganancia (perfil superior) no muestra reflejos significativos en profundidad porque las amplitudes de las ondas reflejadas disminuyen drásticamente cuanto más profundo viajan en el suelo. Cuando se aplican ganancias a las amplitudes registradas (perfil inferior), son visibles muchas reflexiones recibidas desde casi la superficie hasta 3 metros en el suelo. Datos recopilados en la playa de Ashkelon, Israel.

Los ajustes del rango de ganancia son estándar en la mayoría de los equipos GPR, y la mayoría de los sistemas tienen software que ajustará automáticamente las amplitudes de la forma de onda para que estén todas

"a escala". Los sistemas más antiguos deben ajustarse manualmente (Fisher et al. 1994; Geophysical Survey Systems, Inc. 1987). Por lo general, existe una relación lineal o exponencial entre la cantidad de ganancia que se debe aplicar a las amplitudes de onda registradas y el tiempo en que se recibe, y las ganancias más altas generalmente se aplican a las reflexiones registradas más adelante en la ventana de tiempo (figura 4.1).

Hay dos escuelas de pensamiento con respecto a los rangos de ganancia. Un grupo de profesionales de GPR y algunos fabricantes de sistemas GPR creen que no se deben aplicar ganancias durante la recopilación de datos y que las amplitudes de las ondas reflejadas solo deben ajustarse después de regresar del campo. De esta manera, se recopilará un conjunto de datos sin procesar que se puede ajustar de cualquier manera que se considere apropiada después de que todos los perfiles de reflexión se registren dentro de una cuadrícula. Esto se ha convertido en estándar con algunos sistemas GPR. La otra escuela de pensamiento cree que las ganancias deben aplicarse en el momento de la adquisición para que las variables que afectan las amplitudes en el suelo puedan ajustarse inmediatamente. De esa manera, los cambios en la humedad del suelo, las diversas profundidades de las capas y los materiales cambiantes de la superficie del suelo se pueden tener en cuenta y ajustar. La idea en este último método es que incluso si las ganancias no se aplicaron perfectamente en el campo, el procesamiento posterior a la adquisición se puede usar para aumentar o disminuir las amplitudes de las ondas reflejadas más adelante. Pero incluso este método de ganancia puede estar plagado de problemas. Si las ganancias se establecen demasiado altas antes de recopilar perfiles de reflexión (aumentando las amplitudes por factores grandes), y luego las antenas se mueven sobre un área con materiales enterrados muy reflectantes, entonces el aumento en las amplitudes registradas se "saldría de escala" y los valores más altos serían "recortados" y no registrados (figura 4.2). Un "compromiso" reciente de un fabricante de GPR permite al usuario establecer las ganancias en el campo, pero por defecto registra esas amplitudes al 25 por ciento de la configuración de campo para evitar que los operadores sin experiencia corten la amplitud. Esta "simplificación" de los procedimientos de adquisición (que se está volviendo más común a medida que los sistemas GPR llegan a un número más amplio de usuarios) es un poco lamentable porque, de todos modos, uno tendrá que reprocesar todos los datos de reflexión de todos modos después de regresar del campo en un intento de replicar la configuración de campo original.



**Figura 4.2:** Si la ganancia se aplica incorrectamente, las ondas grabadas se pueden "recortar", como se muestra en esta traza de 16 a 19 nanosegundos donde las ondas se salen de escala. Por debajo de aproximadamente 30 nanosegundos, solo se registra el ruido de fondo de alta frecuencia, ya que se atenuó toda la energía transmitida que se movía en el suelo.

Si uno decide establecer ganancias en el campo, es muy importante mover las antenas sobre gran parte del terreno que se estudiará durante el procedimiento de calibración antes de que se recopilen los datos de reflexión para obtener una idea general de la reflectividad (y, por lo tanto, de la amplitud de la onda registrada) de materiales enterrados. De esta manera, las ganancias se pueden establecer en el lugar donde probablemente se registrarán las reflexiones con amplitudes más altas y uno puede estar bastante seguro de que el resto de las amplitudes registradas en todos los perfiles de reflexión dentro de la cuadrícula que se estudiará estarán "en escala" y no se pierde debido a la ganancia excesiva, lo que resulta en un recorte de amplitud.

Si las características de interés enterradas reflejan poca energía de radar y, por lo tanto, se registrarían como reflejos de muy baja amplitud, podría ser aconsejable establecer las ganancias muy altas para poder verlas en los perfiles de reflexión. Esto se hace con el riesgo de recortar amplitudes de otras características que podrían no ser de interés. Se realizó un levantamiento en un área donde grandes pilas de escombros de ladrillos de las paredes derrumbadas y enterrados estaban creando reflejos de muy

alta amplitud. Los objetivos del levantamiento, sin embargo, los rasgos de entierro en tumbas cercanas y adyacentes fueron muy sutiles y similares a las paredes de ladrillo derrumbadas. Por lo tanto, se decidió aumentar las ganancias de todos los reflejos en todas las profundidades, lo que aumentó las amplitudes de los reflejos de los ladrillos fuera de escala (recortándolos) pero también aumentó las amplitudes de los rasgos sutiles de la tumba para que fueran visibles. La desventaja de este procedimiento de configuración de adquisición fue que las porciones de los perfiles que cruzaban el ladrillo altamente reflectante estaban abrumadas con reflejos muy altos, pero estos podrían descartarse fácilmente como áreas que tienen características de entierro intactas. Las amplitudes más altas registradas en las otras áreas de menor reflectividad donde se ubicaron las tumbas de interés tuvieron una ganancia suficientemente alta como para ser visibles. En este caso, habría sido mucho mejor recopilar los datos de reflexión totalmente y ajustar las ganancias más tarde durante el procesamiento de datos.

Si los datos de reflexión están muy atenuados con la profundidad en el suelo, a menudo no se recibirán reflejos desde debajo de una cierta profundidad en el suelo. Si la ventana de tiempo estuviera abierta a esa profundidad, pero no se registrarán amplitudes de onda desde el interior del suelo, la configuración de ganancia automática en la mayoría de los sistemas GPR aún aumentará la energía disponible. Dado que no hay ondas provenientes del interior del suelo en este caso, la configuración de rango de ganancia automática aumentará solo el ruido externo que se está registrando en esa parte de la ventana de tiempo. Los datos anómalos e inutilizables se registrarán desde esas profundidades y deben ignorarse durante el posterior análisis de datos. El ruido que aumenta de esta manera (generalmente en la última parte de la ventana de tiempo) se genera a partir del ruido del sistema dentro de la unidad GPR y otras interferencias aleatorias, como las transmisiones de radio. Las variaciones de amplitud generadas por las diferencias en el acoplamiento de energía del radar debido a cambios en los materiales de la superficie también pueden acentuarse en estas últimas porciones de la ventana de tiempo si no se registran reflejos de esas profundidades.

Una vez que se establecen las ganancias durante la calibración inicial del sistema GPR, deben permanecer constantes para toda la red que se está midiendo con una antena en particular. Si se ajustan por cualquier motivo, los datos de reflexión procesados mostrarán amplitudes de reflexión muy diferentes de las mismas profundidades en diferentes partes de la cuadrícula, lo que puede confundirse con cambios geológicos o arqueológicos de importancia. Si los ajustes de ganancia se cambian a propósito o por error y se anotan esos cambios, aún es posible normalizar

las amplitudes de las reflexiones registradas para lograr consistencia utilizando el procesamiento de datos posterior a la adquisición. El ajuste de cualquiera o todos los demás procedimientos de configuración, incluida la ventana de tiempo, el apilamiento, el filtrado y la frecuencia de muestreo, siempre necesitarán recuperar las amplitudes, ya que la forma de onda también se modifica con estos cambios.

Los filtros verticales eliminan el ruido de alta y baja frecuencia de los rastros de reflexión registrados que pueden generarse a partir del ruido del sistema o la interferencia de frecuencia. Al igual que con la ganancia de rango, una escuela de pensamiento que se ha integrado en los procedimientos de configuración de algunos fabricantes de equipos cree que todos los datos de reflexión deben registrarse en el campo como datos sin procesar, y el filtrado de frecuencia solo debe aplicarse durante el procesamiento posterior a la adquisición. De esta forma se adquieren todos los reflejos, sean buenos o malos. La idea es que, si se adquieren datos sin filtrar, lo que podría considerarse "datos incorrectos" posiblemente se pueda filtrar y mejorar más adelante.

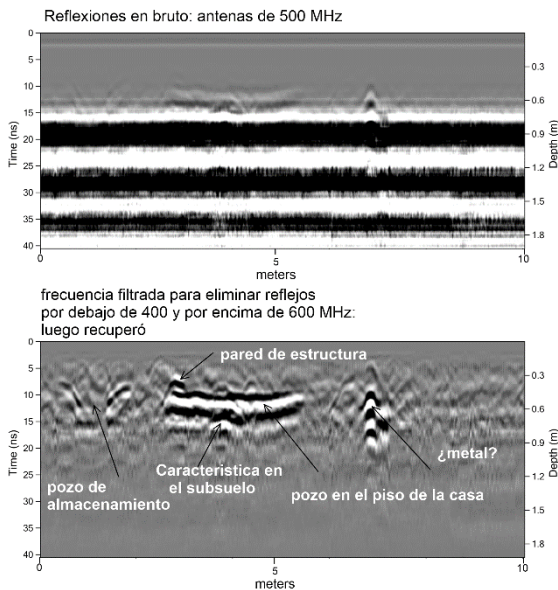
La otra idea es que el filtrado es necesario durante la recopilación para que los reflejos puedan ser más fácilmente visibles y comiencen a interpretarse mientras se recopilan y son visibles en la pantalla de la computadora. Además, si se aplican filtros antes de recopilar cualquier dato en el campo, generalmente se puede llegar a la calidad óptima de los datos, que solo se puede estimar en un momento posterior. Un poco de experimentación con el filtrado mientras aún se está en el campo suele ser el método más ventajoso, ya que a menudo se puede recopilar de inmediato la mejor calidad de datos posible. Si es necesario un filtrado adicional más adelante, los datos buenos solo se pueden mejorar.

Algunas unidades GPR permiten el registro de datos de reflexión en dos canales simultáneamente y, por lo tanto, se pueden adquirir datos de reflexión tanto en bruto como filtrados para cada transecto (Fenner 1992). Luego, ambos conjuntos de datos podrían procesarse una vez de regreso en la oficina y compararse, antes de elegir uno u otro para la interpretación final.

Los filtros verticales, también llamados filtros de pasabandas, se emplean para eliminar el ruido anormal de alta y baja frecuencia durante el registro de datos (Bucker et al. 1996; Fisher et al. 1994; Urliksen 1992). Los términos para este filtrado son pasaalta y pasabaja, que se acuñaron originalmente para las transmisiones de radio a principios del siglo XX. El filtro de pasaalta elimina las ondas de baja frecuencia (permite que las frecuencias más altas "pasen por" un corte de baja frecuencia donde se pueden registrar), que a menudo se generan a partir del "ruido del sistema" inherente a cada dispositivo de radar en particular. A veces, estos datos se

pueden ver en un osciloscopio o en la pantalla de una computadora de las trazas registradas como longitudes de onda largas superpuestas a una traza de reflexión estándar. La cantidad de ruido de baja frecuencia registrado cambiará con la antena utilizada, la longitud del cable y el tipo de unidad de control. Suele ser una función del diseño del sistema GPR.

Los datos de alta frecuencia anómala se pueden filtrar con filtros de pasabaja (las frecuencias inferiores a una frecuencia de corte pueden "pasar" y luego se registran). Estas frecuencias anómalas generalmente se reciben de varias transmisiones de radio u otras perturbaciones electromagnéticas cercanas. El ruido de alta frecuencia de este tipo es fácilmente visible cuando la antena no se mueve y la forma de onda generada, visible en una pantalla de computadora o en un osciloscopio, pueden verse como "parpadeando" debido al ruido de alta frecuencia (figura 4.2).



**Figura 4.3:** A veces, los datos de reflexión se recopilan con tanto ruido que pocas reflexiones utilizables son inmediatamente visibles en los perfiles. Cuando los datos se filtran por frecuencia y se elimina el ruido de fondo, a veces se pueden extraer importantes reflejos de importantes características enterradas. Estos datos se recopilaron con una antena de 500 MHz en Tucson, Arizona, EE. UU. Casi el 60% de los datos originales se eliminaron, incluidas todas las frecuencias por encima de 600 MHz y por debajo de 400 MHz mediante filtrado digital. Los reflejos resultantes se recuperaron para hacer visibles el pozo en el piso de la casa del pozo y un pozo de almacenamiento contiguo.

Debido a que la mayoría de las antenas son capaces de registrar frecuencias dentro de una octava más o menos de su frecuencia central, una antena de 400 megahertz podría recibir energía entre 200 y 800 megahertz, o incluso más en el ancho de banda de frecuencia. Si se genera una forma de onda "limpia" con filtros de paso alto y paso bajo colocados a 200 y 800 megahertz, es muy probable que se registren reflejos de alta calidad desde el interior del suelo dentro del ancho de banda de la antena de 400 megahertz. y ningún ruido externo. Si todavía se recibe una gran cantidad de ruido en la antena con estos filtros de pasabandas, podría ser una buena idea disminuir los filtros de paso bajo a 600 megahercios o incluso menos, lo que eliminaría gran parte de las frecuencias más altas, lo que es probable que se produzcan a partir de transmisiones de radio cercanas.

Se debe tener cuidado de no eliminar lo que pueden ser reflejos del interior del suelo durante este tipo de filtrado, pero a menudo los conjuntos de datos son tan ruidosos que no se ven reflejos coherentes en absoluto. Se recopiló un estudio notable en un área increíblemente ruidosa, y no parecía que se registraran reflejos desde el interior del suelo, sino solo ruido (figura 4.3). Los perfiles de reflexión eran tan ruidosos que parecía que el levantamiento sería un fracaso total. Este ruido probablemente fue causado por una gran cantidad de ruido de radio y otras bandas de comunicación en el área urbana donde se realizó el estudio, que estaba delimitada por dos carreteras con mucho tráfico, cerca de un grupo de antenas de radio y muy cerca de un aeropuerto. Cuando los filtros de pasaalta y pasabaja se redujeron a 200 megahercios a cada lado de la frecuencia central de la antena, el ruido de fondo se eliminó de manera efectiva y los reflejos en el suelo del piso de unpozo enterrado de una casa y otras características enterradas se volvieron inmediatamente visible (figura 4.3).

Es importante tener en cuenta que cuando se aplican filtros verticales y horizontales en el campo antes de la adquisición de datos, otros ajustes como la ventana de tiempo, la frecuencia de muestreo, la velocidad de transmisión y los rangos de ganancia también deben ajustarse y posiblemente restablecerse varias veces antes de que se recopilan los datos. Todos los ajustes manuales indicados aquí son parte de un proceso iterativo, y se deben recopilar varios perfiles experimentales, cada uno con diferentes configuraciones aplicadas, antes de recopilar los datos de reflexión final en transectos. Si se adquieren buenos datos de reflexión a las profundidades necesarias una vez que se establecen los ajustes, la configuración debe seguir siendo la misma para todos los perfiles de reflexión adquiridos dentro de una cuadrícula. A menudo, estos pasos de

calibración pueden llevar algo de tiempo de campo, y es prudente planificar siempre el tiempo para experimentar con todas las configuraciones previas a la adquisición para asegurar los datos de la más alta calidad. El software de computadora incluido con todas las unidades GPR puede realizar muchos de estos ajustes automáticamente o empleando configuraciones estándar almacenadas establecidas por el fabricante del sistema GPR. Esto nunca es una buena idea. Es bastante recomendable ajustar manualmente la configuración para las condiciones locales y nunca dejarse engañar por el uso de parámetros preestablecidos que podrían haber funcionado bien en el taller de la fábrica pero que son totalmente inapropiados para las condiciones locales encontradas.



## CAPITULO 5

### Análisis de velocidad

Uno de los propósitos principales de los levantamientos modernos de GPR es mapear con precisión la estratigrafía y las características arqueológicas enterradas en tres dimensiones. En el pasado, muchos estudios de GPR, especialmente aquellos realizados en investigaciones arqueológicas, tenían el objetivo limitado de definir “anomalías” enterradas que potencialmente podrían representar características arqueológicas, que podrían ser excavadas más tarde (Conyers 2012a: 14). La profundidad real y la orientación de cualquier característica descubierta, y la naturaleza de la estratigrafía circundante que puede haber estado relacionada con esas características, fueron generalmente de interés secundario.

En contraste con la mayoría de estos primeros estudios de GPR de “búsqueda de anomalías”, el trabajo más reciente se ha realizado con el propósito de mapear de manera no invasiva características enterradas en detalle, a veces sin tener que excavar (Conyers 2010, 2011). Muchas veces, cuando se planifican excavaciones como seguimiento de la cartografía geofísica, los mapas de GPR pueden delinear con mucha precisión áreas específicas (que con suerte son las áreas de importancia relacionadas con ciertas preguntas de investigación) en las que concentrarse sin la necesidad de una excavación extensa (Conyers 2010; Conyers y Leckebusch 2010). Para lograr estos objetivos, es necesario un mapeo preciso del subsuelo en profundidad real.

Los arqueólogos con experiencia en geología también han aprendido que los datos de GPR proporcionan información estratigráfica excelente sobre los sedimentos y suelos que rodean las características arqueológicas de interés (Barone et al.2011; Conyers 1995; Conyers et al.2002; Forte y Pipan 2008; Imai et al. 1987; Neal 2004), que generalmente son áreas de sitios que rara vez se estudian en detalle mediante métodos arqueológicos estándar. Este tipo de información estratigráfica, que no se puede obtener de ninguna otra manera, excepto con trincheras largas o núcleos densos, puede ser de gran valor al reconstruir topografía enterrada, estudiar perturbaciones antropogénicas, analizar procesos posdeposicionales o cartografiar zonas de suelo enterrado u otras características del paisaje antiguo (Conyers 2009).

El enfoque cambiante de la exploración, el mapeo y el análisis de GPR de materiales arqueológicos enterrados ha requerido un mapeo preciso del subsuelo en profundidad real, que va mucho más allá de la “búsqueda de anomalías”. Para mapear materiales enterrados en reflejos específicos de

tres dimensiones visibles en los datos GPR, que siempre se miden en el tiempo de viaje en dos direcciones, generalmente se debe vincular a estratigrafía conocida o características arqueológicas a profundidades medibles. Esta conversión del tiempo de viaje bidireccional a profundidad se puede realizar como parte del procedimiento de calibración del equipo de adquisición previa y, como mínimo, se debe realizar antes de que pueda comenzar una interpretación realista de los datos una vez que regrese del campo. La conversión de los tiempos de viaje del radar a profundidad se puede realizar si se puede calcular la velocidad de las ondas de radar a través del material por el que viaja la energía. Este capítulo describe una serie de pruebas de campo y de laboratorio que se pueden realizar para llegar a esas mediciones de velocidad.

El tiempo de viaje de las ondas de radar es una de las medidas directas obtenidas con equipos GPR en el campo. La profundidad (o distancia) a las interfaces enterradas o las características de interés se puede medir directamente solo con una cinta métrica u otro dispositivo de medición de distancia en una excavación o afloramiento abierto o mediante sondeo o extracción de muestras. Si se conocen tanto el tiempo como la distancia a partir de estas dos mediciones directas, se puede calcular la velocidad media de propagación de las ondas en el suelo. La otra medición directa importante es la amplitud de las ondas registradas, que con las mediciones de profundidad y distancia, produce una ubicación tridimensional precisa de toda la información del radar en el espacio.

Hay dos técnicas de campo generales para determinar la velocidad: el método de onda reflejada (o posiblemente refractada) y el método de onda directa. Los métodos de ondas reflejadas requieren que la energía del radar se refleje desde objetos o interfaces estratigráficas a profundidades que puedan medirse directamente (Conyers y Lucius 1996). Los métodos de onda directa transmiten ondas de radar directamente a través del suelo, de una antena a otra, también a lo largo de una distancia medida. Otros métodos para obtener la velocidad son una medición directa de la permitividad dieléctrica relativa de las muestras en el laboratorio (que rara vez imitan las condiciones de campo) o un análisis de la geometría de las hipérbolas de reflexión generadas a partir de fuentes puntuales enterradas utilizando varios programas informáticos.

Si es posible, se deben realizar múltiples pruebas de velocidad en diferentes ubicaciones en un área de estudio porque es común que la velocidad de los suelos y sedimentos en un área de prueba cambie tanto lateralmente como con la profundidad. Las variaciones de velocidad lateral son causadas más comúnmente por cambios en la saturación de agua y cambios de materiales en un sitio. El contenido de agua suele ser la variable más importante que afecta la velocidad de las ondas de radar

(Conyers 2004; Conyers 2012: 34). La arena de cuarzo seca tiene un RDP de aproximadamente 4 (tabla 3.1), que calcula una velocidad de onda de radar de 14,99 centímetros por nanosegundo (ecuación 3.1). Por el contrario, el RDP del agua es de aproximadamente 80, corresponde a una velocidad de radar de 3,35 centímetros por nanosegundo. Por lo tanto, si solo una pequeña cantidad de agua está contenida en los espacios porosos de la arena seca, la velocidad de la energía del radar que viaja en ellos disminuirá significativamente debido a esa humedad adicional. En la mayoría de los entornos, el contenido de agua del suelo y los sedimentos aumentará naturalmente con la profundidad y, por lo tanto, la velocidad promedio de la onda de radar del material disminuirá en consecuencia.

El grado de contenido de agua residual en los sedimentos y suelos ubicados por encima del nivel freático, así como la profundidad del nivel freático, a menudo pueden fluctuar drásticamente en un área debido a cambios en la topografía de la superficie, la estratigrafía y la ubicación de las características del drenaje. En contextos arqueológicos, las características antropogénicas enterradas también pueden crear capas de diferente composición que afectan la saturación del agua y crean cambios dramáticos de velocidad en un sitio. Por lo tanto, la velocidad está influenciada por las diferencias de saturación de agua, ya que están controladas por cambios en la composición de sedimentos y suelos. Muchas veces es difícil determinar las causas de las diferencias de velocidad en un área porque pueden estar relacionadas tanto con los cambios de saturación de agua como con las diferencias de materiales o, por lo general, con ambos.

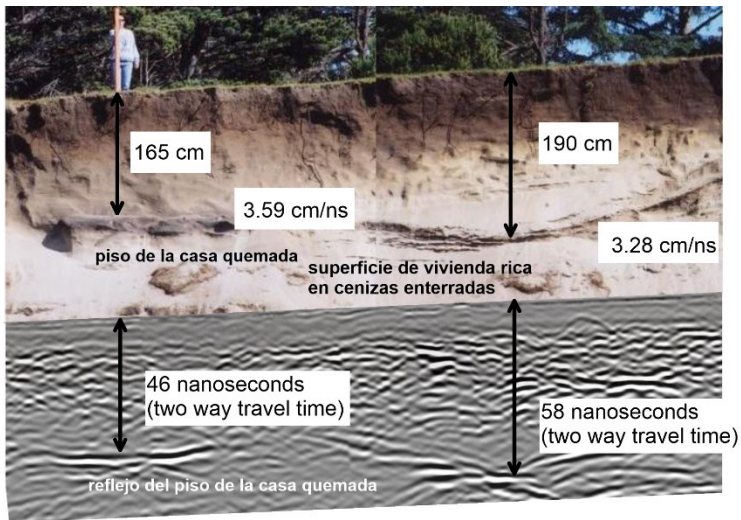
Es importante reconocer que las mediciones de velocidad en un sitio a menudo son válidas solo para los datos de GPR que se recopilan dentro de unos días (o, a veces, unas pocas horas) de cuando se realizan las pruebas. Los cambios en la velocidad pueden variar drásticamente con el tiempo, ya que los sedimentos y la humedad del suelo fluctúan estacionalmente y, a veces, pueden cambiar rápidamente, incluso durante el tiempo que se lleva a cabo un levantamiento, debido a lluvias torrenciales, deshielo o inundaciones. Por ejemplo, las pruebas de velocidad realizadas en un sitio en América Central, que consiste principalmente en ceniza volcánica, durante la temporada de lluvias arrojaron un RDP de 12 (velocidad promedio de 8.7 centímetros por nanosegundo) (Doolittle y Miller 1992), mientras que pruebas similares realizadas en el la misma área al final de una estación seca de 6 meses midió un RDP de aproximadamente 5, o una velocidad promedio de 13,4 centímetros por nanosegundo (Conyers 1995; Conyers y Lucius 1996). En este caso, si las pruebas de velocidad realizadas durante una temporada se usaran para procesar e interpretar los datos GPR adquiridos solo unos

meses después, las profundidades ajustadas a la velocidad de las reflexiones del radar serían extremadamente inexactas. El mismo tipo de cambios dramáticos también se han visto de la noche a la mañana. En el suroeste de Estados Unidos, se obtuvieron buenos reflejos de radar un día, desde profundidades cercanas a los 2 metros con una antena de 500 megahercios. Durante la noche cayeron 3 pulgadas de lluvia, y al día siguiente, se registraron reflejos pobres desde una profundidad máxima de solo 50 centímetros, con un RDP calculado completamente diferente (Conyers y Cameron 1998). En este caso, la adición de agua cambió no solo la velocidad de propagación del radar, sino también la profundidad de penetración de la energía del radar en el suelo.

### **MÉTODOS DE ONDA REFLEJADA**

El método más preciso y sencillo para medir la velocidad es identificar las reflexiones en los perfiles GPR que se producen a partir de objetos, artefactos o zonas de interés, que ocurren a profundidades conocidas. Estos métodos permiten una determinación directa de la velocidad media de las ondas de radar desde la antena de superficie hasta una profundidad medida. En el pasado, este tipo de pruebas de velocidad se han realizado en sitios arqueológicos en objetos tan diversos como huesos de ballena enterrados (Vaughan 1986), alambre de cobre (Kenyon 1977) y latas de pintura vacías (Doolittle y Miller 1992). Debido a que el metal es un reflector de energía de radar casi perfecto, los reflejos generados en un perfil que cruza un objeto metálico son fácilmente identificables en la mayoría de los perfiles GPR como hipérbolas distintas. Se pueden realizar otras pruebas de un tipo similar cuando una pared enterrada o alguna otra característica de reflexión de fuente puntual está parcialmente expuesta en una excavación y se puede identificar en los perfiles GPR (Conyers y Lucius 1996). De manera similar, identificar un reflejo distintivo generado a partir de un cambio de material notable en el suelo y luego perforar o excavar una zanja de prueba para exponerlo, o verlo en un afloramiento, servirá para el mismo propósito siempre que se pueda determinar la superficie de reflexión exacta. identificado positivamente. Esto se hizo donde el piso de una casa de arcilla compacta y una superficie viva asociada rica en carbón fueron expuestos por la acción de las olas a lo largo de la costa de Oregón (figura 5.1). Estas interfaces arqueológicas y geológicas podrían mapearse lateralmente y la reflexión generada de ambos inmediatamente visible en un perfil GPR recogido en la parte superior del material preservado. Se midió la profundidad de estas interfaces y se utilizó el tiempo transcurrido en las antenas de 400 MHz para calcular la velocidad.

El método más fácil y preciso para determinar la velocidad es excavar o encontrar una zanja o afloramiento cercano y colocar una barra de hierro horizontalmente en una cara vertical. Luego, las antenas se colocan lentamente sobre la barra mientras se registran los reflejos del subsuelo en un perfil. La barra de metal será evidente como una hipérbola de reflexión distinta, como las que se muestran en las tuberías enterradas en la figura 3.15. Para obtener la máxima cantidad de reflexión de una barra de metal delgada, el eje largo de las antenas de superficie (de lado a lado) debe estar orientado paralelo a la longitud de la barra horizontal.



**Figura 5.1:** El piso de una casa prehistórica quemada y una vivienda adyacente rica en carbón expuesta en un acantilado de la playa también son visibles en un perfil de reflexión de 400 MHz recogido a lo largo de la parte superior de ese acantilado. La profundidad de los horizontes que generaron las reflexiones se midió en dos ubicaciones y con los tiempos de viaje en dos direcciones medidos en los perfiles GPR, los tiempos de viaje promedio en dos áreas se calcularon fácilmente. En todos los casos, las velocidades medidas de esta manera son un promedio desde la superficie del suelo hasta la profundidad del objeto o interfaz medido. Múltiples pruebas de este tipo desde muchas profundidades en el suelo pueden determinar si hay un gran cambio en la velocidad con la profundidad y también lateralmente a través de un sitio. Sin mediciones de velocidad precisas, todas las interpretaciones de los perfiles GPR que requieren cualquier resolución tridimensional serán especulativas.

Esta orientación de la antena creará un campo eléctrico que también se orienta en paralelo a la barra, produciendo la máxima cantidad de reflexión. Además, al realizar este tipo de pruebas, se debe utilizar la frecuencia de antena correcta adecuada para la profundidad y el tamaño del objeto que se necesita iluminar. Si se utiliza una antena de baja frecuencia, puede ser necesario un objetivo bastante grande para que sea visible en perfiles bidimensionales estándar, debido a la menor resolución de esta antena.

Cuando los perfiles de reflexión son inmediatamente visibles en la pantalla de la computadora durante la recopilación de datos, y si se superpone una escala de tiempo al perfil, el vértice de la hipérbola se puede medir en el tiempo. El tiempo y la profundidad producirán velocidad, que se puede usar inmediatamente para calcular la ventana de tiempo para la profundidad necesaria para resolver las características de interés. Si la barra de hierro no es visible, es posible que el perfil deba procesarse más adelante para aumentar la visibilidad del objetivo, utilizando los métodos de filtrado y mejora de datos que se describen en el capítulo 6.

Cuando se realizan múltiples pruebas a diferentes profundidades en un área de estudio, a menudo se calcularán diferentes velocidades debido a los cambios en la saturación del agua y la composición del suelo con la profundidad. Si solo se usa una velocidad promedio (que suele ser el caso), podría haber distorsión vertical si se usara una velocidad derivada de una prueba de onda directa poco profunda (que probablemente tendría una velocidad relativamente alta) para corregir en profundidad todas las reflexiones en un perfil. Los reflejos producidos desde las interfaces cercanas a la superficie del suelo se corregirían aproximadamente a su profundidad correcta, pero los de las profundidades del suelo probablemente parecerían demasiado superficiales, ya que los tiempos de viaje del radar desde las profundidades del suelo probablemente sean más lentos. La alternativa también sería cierta si se usara una velocidad promedio obtenida de un objeto más profundo en el suelo, lo que produciría una velocidad promedio más lenta. Esa velocidad más lenta, cuando se aplica a un conjunto de datos completo, tendería a hacer que los reflejos superficiales parezcan más profundos de lo que realmente son.

Este es uno de los obstáculos que se encuentran al utilizar un RDP (velocidad) promedio para corregir los tiempos de viaje del radar a la profundidad durante el procesamiento de datos. Si se conocieran diferentes valores de RDP para profundidades específicas, es posible que algunos programas de computadora conviertan los perfiles medidos en el tiempo en perfiles de profundidad utilizando diferentes RDP para

diferentes profundidades. Es posible que aún exista alguna distorsión en los perfiles resultantes en los límites entre unidades con diferentes RDP porque se inferirían cambios abruptos de velocidad que pueden no ser reales. Un enfoque más preciso sería obtener valores de RDP a diferentes profundidades y luego compilar una curva de variación de velocidad para la sección estratigráfica en su conjunto. Algunos programas de procesamiento de datos GPR permiten este tipo de corrección sofisticada para crear perfiles de profundidad más precisos.

Es muy posible que la imposición de una sola velocidad (o RDP), derivada de una prueba realizada en una sola área del sitio, a todos los datos de GPR adquiridos en las redes circundantes podría producir cálculos de profundidad falsos si las condiciones del subsuelo cambian lateralmente. Por ejemplo, si hubiera mayores saturaciones de agua en un área debido a una capa freática encaramada (que produce velocidades más lentas), la profundidad real de las interfaces de interés también podría variar considerablemente. En su mayor parte, sin un conocimiento estratigráfico detallado de un sitio, estas variaciones probablemente pasarían desapercibidas y las interpretaciones con respecto a la profundidad de ciertas unidades serían inexactas. Un conjunto de datos de pruebas de calibración de velocidad más dispersos geográficamente podría permitir que se hiciera un mapa de gradiente de velocidad en tres dimensiones y producir perfiles y mapas más precisos. Sin ellos, estos problemas potenciales de velocidad deben aceptarse como parte de la imprecisión inherente del método GPR.

Otro tipo de error que es posible con las conversiones de velocidad se cometió en un área donde el único lugar disponible para una prueba de onda directa era un frente de excavación que había estado expuesto a los elementos durante dos años (Conyers et al. 2002). Esto ocurrió en un área desértica en Jordania donde la arena arrastrada por el viento era el material matriz del sitio. Se realizaron numerosas pruebas de onda directa en una barra de hierro a diferentes profundidades a lo largo de la cara expuesta y se encontró que las velocidades eran consistentemente muy altas en toda la sección, con un RDP de aproximadamente 3. Luego, todas las reflexiones en la cuadrícula se corrigieron usando esta velocidad promedio y se cartografiaron la profundidad de las características y las interfaces estratigráficas de interés en toda el área de estudio.

Cuando estas características fueron excavadas más tarde, se encontró que todas las características cartografiadas eran casi tres veces más superficiales de lo previsto en los mapas de GPR. Después de evaluar lo que pudo haber salido mal, se concluyó que la arena en la exposición donde se realizaron las pruebas de velocidad se había dejado secar significativamente a lo largo del frente de excavación, creando un material

anormalmente seco que permitió que las ondas de radar viajaran a una velocidad muy alta. El mismo tipo de material que permaneció enterrado (donde se recopilaron los datos de GPR) retuvo su humedad natural. Por tanto, se aplicó una velocidad muy errónea a todos los datos de reflexión. Este error simple, pero potencialmente desastroso, puso inmediatamente en duda la capacidad de los arqueólogos geofísicos que llevaron a cabo el estudio, ya que las características fueron descubiertas mientras aún estaban presentes en el campo (Conyers et al. 2002).

Afortunadamente, todos los involucrados entendieron (¡o se les hizo comprender!) Las posibles dificultades de velocidad en el procesamiento de GPR y pudieron corregir rápidamente los errores en el procesamiento antes de que se realizaran excavaciones adicionales. Si las excavaciones hubieran tenido lugar días o semanas después, después de que los geofísicos que realizaban el estudio hubieran abandonado el campo durante mucho tiempo, todos los resultados del estudio de GPR podrían haberse puesto en duda. En este caso, las pruebas de velocidad deberían haberse realizado en zanjas recién excavadas, no en las excavaciones más antiguas donde se había dejado secar el sedimento.

## **MÉTODOS DE ONDA DIRECTA**

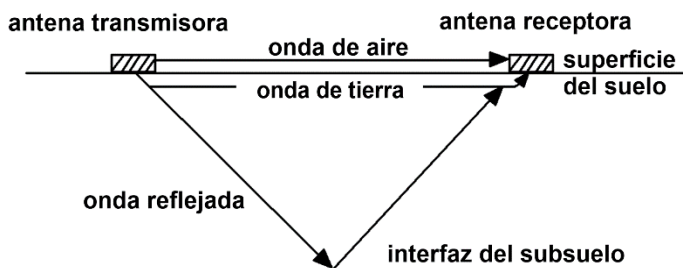
Aunque a veces no son tan precisos como los métodos de onda reflejada, las técnicas de onda directa proporcionan una forma adicional de determinar la velocidad de la onda de radar en el campo. En este tipo de pruebas, se separan dos antenas, con el material a probar ubicado entre las dos. Luego, una antena transmite a la otra y se puede medir el tiempo de transmisión unidireccional entre las dos. Si se conoce la distancia entre las dos antenas, se puede calcular la velocidad (Conyers y Lucius 1996). Un tipo de prueba de este tipo se llama punto medio común (CMP) (Fisher et al. 1994; Leckebusch 2003; Malagodi et al. 1994; Neal 2004; Perroud y Tygel 2005; Tillard y Dubois 1995), y una prueba similar es Refracción y reflexión de gran angular (WARR) (Imai et al. 1987; Milligan y Atkin 1993; Reynolds 2011). Las pruebas de transiluminación son un tercer tipo, todas las cuales se basan en el mismo método general en el que las ondas de radar se transmiten en una dirección unidireccional entre dos antenas que están separadas por el material a probar.

En todos estos tipos de pruebas es necesario un sistema GPR que permita separar dos antenas. Muchos sistemas GPR comúnmente utilizados por los arqueólogos recopilan datos con antenas duales que están conectadas permanentemente, grabando en un solo canal con un cable de antena que conduce a la unidad de control, y por esta razón, este tipo de pruebas de velocidad no son tan comunes como otros. Algunos



fabricantes producen antenas duales que se sujetan entre sí y se pueden separar fácilmente, pero generalmente se necesitan conexiones especiales para permitir esta separación (o dos cables: uno que conecta cada antena). De lo contrario, es necesario un divisor de cable con dos antenas independientes o un sistema GPR multicanal. Si las únicas dos antenas disponibles para una prueba de onda directa no tienen la misma frecuencia pero están cerca (por ejemplo, antenas de 400 y 500 megahercios), se pueden usar ambas, ya que ambas transmitirán y recibirán dentro del ancho de banda de la otra.

En las pruebas WARR y CMP, la energía del radar se envía de una antena a otra a medida que se separan cada vez más. Los trazos de reflexión individuales generalmente se recopilan (y a menudo se apilan para mejorar su calidad) en modo de pasos para este tipo de prueba. Las ondas de radar que se mueven entre las antenas atravesarán el aire y las capas cercanas a la superficie del suelo y se recibirán en la otra (figura 5.2). Si se conoce la distancia de separación y se pueden deducir las trayectorias de viaje de las ondas de radar, las ondas que llegan se pueden medir en el tiempo y potencialmente se puede calcular una serie de mediciones de velocidad de diferentes capas en el suelo. En el método CMP, primero se colocan ambas antenas una al lado de la otra en el suelo y se recopila un rastro de reflexión. Puede haber tres o más llegadas de olas recolectadas en esta ubicación: una que viaja en el aire, otra a lo largo de la interfaz aire-tierra y posiblemente más que se reflejan y refractan desde interfaces enterradas en el suelo. Luego, las antenas se separan una distancia medida (10 centímetros, quizás), y se registra otro rastro de reflexión (figura 5.3). Este procedimiento de recolección se repite muchas veces hasta que las antenas están separadas hasta por 5 o 10 metros. La energía continuará viajando por varios caminos entre las dos antenas, y si se pueden identificar las llegadas de ondas que han viajado dentro del suelo y se conoce la distancia entre las dos antenas, se puede calcular la velocidad. El mismo tipo de registro también se puede realizar en la adquisición de datos continua con la imposición de marcas de referencia para ceder la distancia medida a lo largo de una cinta métrica en el suelo.



**Figura 5.2:** Se registran al menos 3 ondas en las pruebas CMP y WARR: la onda de aire que viaja en el aire desde las antenas transmisoras a las receptoras, la onda terrestre que se mueve a lo largo de la interfaz entre el suelo y el aire, y una o más reflejadas (y a veces refractadas) que se mueven dentro del suelo.



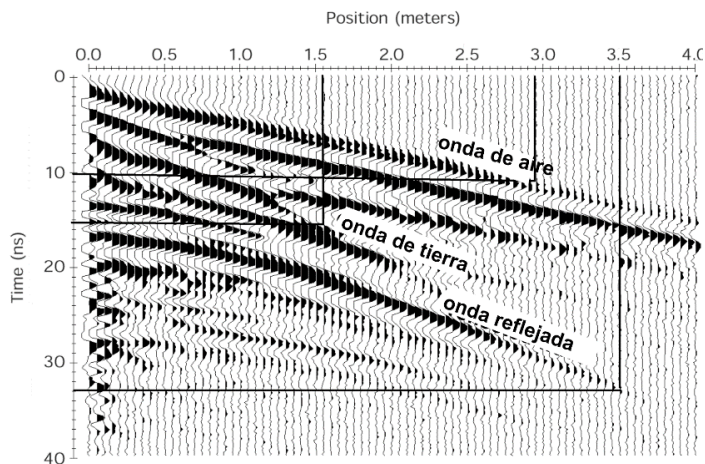
**Figura 5.3:** En las pruebas CMP, el envío y la recepción separados se mueven en pasos (en esta prueba indicados por banderillas a distancias medidas, con trazas de reflexión individuales se registran en cada ubicación).

Los rastros de reflexión se recopilan de la misma manera en el método WARR, excepto que solo se mueve una antena mientras que la otra permanece estable. A veces, se deben realizar pruebas WARR en lugar de pruebas CMP si no hay suficientes personas en el campo en el momento de la prueba para mover ambas antenas simultáneamente.

En las pruebas WARR, debe haber capas subsuperficiales para reflejar la energía que sea horizontal o que no se sumerja mucho (Reynolds 2011). Esto se debe a que la energía debe moverse de

forma predecible entre las dos antenas, lo que rara vez es el caso. Por esta razón, las pruebas CMP son el método preferible, ya que el punto medio entre las antenas sigue siendo el mismo, lo que permite determinar los puntos donde la energía se refleja en cada reflector subterráneo en cada ubicación de desplazamiento y, por lo tanto, la consistencia aérea en profundidad no es un requisito. Además, para que el resultado de las pruebas WARR sea exacto, se debe suponer que la velocidad de las capas individuales no cambia drásticamente lateralmente, lo que también es raramente el caso.

Los datos comunes de punto medio y WARR se muestran típicamente en un perfil de reflexión GPR estándar, con la distancia de separación de la antena en el eje horizontal y el tiempo en el eje vertical (figura 5.4). A medida que las antenas se separan, la primera onda recibida es la onda de aire. Idealmente, se registra en el momento cero cuando la distancia de separación de la antena es cero, o el desplazamiento cero se puede tener en cuenta posteriormente durante el procesamiento de datos. La llegada de la segunda onda suele ser la onda terrestre que viaja a lo largo de la interfaz tierra-aire y se registra poco después de la onda aérea. La tercera, y las llegadas posteriores, suelen ser ondas reflejadas o refractadas generadas en las interfaces del subsuelo. En áreas con niveles freáticos poco profundos, puede ser posible distinguir entre lo que se conoce como olas terrestres "secas" y las que están "húmedas" y que pueden viajar dentro de un suelo saturado cerca de la superficie (Fisher et al. 1994). La onda de tierra también debe cruzarse con la onda de aire en el tiempo cero en la parte del perfil del radar donde las dos antenas se tocaban (figura 5.4).



**Figura 5.4:** Los rastros recolectados a intervalos cuando las antenas están separadas de un punto medio común (prueba CMP) se apilan para su visualización. Se puede identificar que la onda de aire recta se mueve a la velocidad de la luz con una velocidad de aproximadamente 0,3 metros / nanosegundo (3 metros en el eje horizontal y 10 nanosegundos en el eje vertical). La velocidad de la onda terrestre es de aproximadamente 0,1 metros / nanosegundo (1,5 metros en el eje vertical; 15 nanosegundos en el eje horizontal). Una onda reflejada (o quizás refractada) de una profundidad desconocida en el suelo se registró cuando las antenas se separaron 3,5 metros a 33 nanosegundos (una velocidad de aproximadamente .11 metros / nanosegundo).

Otras ondas de radar que viajaron más profundamente dentro del suelo pueden refractarse dentro del suelo y las unidades estratigráficas y, a veces, reflejarse entre las capas del subsuelo antes de llegar a la antena receptora, creando lo que potencialmente puede ser una serie confusa de llegadas de ondas registradas. Estas llegadas posteriores generalmente se pueden diferenciar de las ondas terrestres o aéreas porque no se cruzan en el tiempo cero cuando las dos antenas se tocaban.

Cuando se mide el tiempo y se conoce la distancia (entre las antenas), y se pueden identificar los reflejos de ciertas distancias en el suelo, se puede calcular la velocidad promedio. En la figura 5.4, la onda de aire se puede identificar en cualquier punto a lo largo del diagrama de ondas tomando una lectura de tiempo y distancia y calculando la velocidad. En este ejemplo, la llegada de la onda de aire a una separación de antena de unos 3 metros se produjo a 10 nanosegundos, que es una velocidad de 0,3 metros por nanosegundo (exactamente la velocidad de la luz en el aire).

La onda de tierra llegó a 15 nanosegundos cuando las antenas se separaron 1,6 metros, que es una velocidad de poco menos de 0,1 metros por nanosegundo (una disminución de la velocidad de la onda de aire de aproximadamente un tercio). La onda reflejada de algún horizonte desconocido en el suelo llegó a 33 nanosegundos cuando las antenas se separaron 3,5 metros, dando también una velocidad de aproximadamente 0,1 metros por nanosegundo.

En la mayoría de los casos, las pruebas CMP y WARR generalmente solo miden las velocidades de los suelos superficiales u otro material que se encuentra muy cerca de la superficie del suelo. No deben verse como una forma de determinar la velocidad a una gran profundidad a menos que sea posible de alguna manera identificar las trayectorias reales de las ondas de radar que viajaron más profundamente dentro del suelo. Para determinaciones de velocidad más profundas, se deben utilizar métodos de onda directa. Muchos programas de procesamiento GPR tienen rutinas de software disponibles para procesar rápidamente los datos recopilados de esta manera y se puede estimar la velocidad promedio a varias profundidades en el suelo para el procesamiento posterior de los datos.

Se utilizó un método de recopilación de datos CMP modificado como una forma de recopilar un conjunto de datos de reflexión tridimensional muy preciso en un área pequeña donde se necesitaban volúmenes precisos de datos de reflexión en profundidad real (Perroud y Tygel 2005; Pipan et al. 1996; Pipan et al. 1999). Usando el método CMP dentro de una cuadrícula de 8 por 8 metros, se realizaron muchos cientos de pruebas CMP, recolectando miles de trazas que luego fueron apiladas y procesadas en un cubo tridimensional. Este enfoque innovador, aunque difícil de realizar y lento de procesar, produjo imágenes tridimensionales superiores del suelo que no están disponibles de ninguna otra manera.

### **Pruebas de transiluminación**

El método de transiluminación es otra prueba de velocidad de onda directa que es aplicable a entornos arqueológicos porque se puede realizar en dos excavaciones cercanas donde la sección de material a probar se conserva entre ellas. Originalmente fue desarrollado como un método para evaluar la integridad de estructuras intactas tanto para aplicaciones de ingeniería como arqueológicas (Conyers y Lucius 1996; Bernabini et al. 1994). Para realizar pruebas de transiluminación, las caras de las excavaciones deben estar lo más paralelas posible. También es mejor si las pruebas se realizan poco después de que el material esté expuesto en las excavaciones para que cualquier evaporación o filtración de agua a lo largo de las caras no cambie significativamente las características de saturación de agua del material que se va a probar.

Luego se colocan dos antenas, una para enviar y otra para recibir, en las paredes de las dos excavaciones, apuntando una hacia la otra (figura 5.5). Es importante que las dos excavaciones estén separadas por al menos una longitud de onda más o menos de la frecuencia central de la antena que se utiliza para transmitir, de modo que la antena receptora esté más allá de la zona de campo cercano de la antena transmisora.



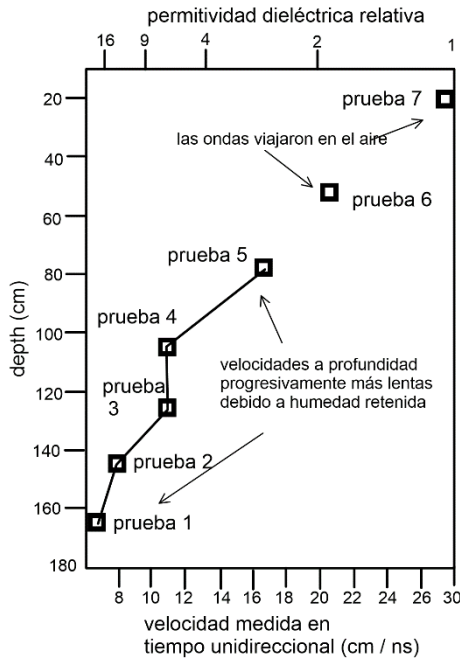
**Figura 5.5:** Al realizar una prueba de transiluminación, se sostienen dos antenas en caras verticales, apuntando una hacia la otra y separadas por el material a probar. Aquí, una antena transmisora de 500 MHz apunta hacia una antena receptora en el lado opuesto de este material, justo fuera de la imagen de la izquierda.

Luego se realiza una serie de pruebas de transiluminación comenzando en la base de las excavaciones y avanzando hacia arriba. Las dos antenas se pueden mover hacia arriba, ya sea en pasos, recolectando uno o muchos trazos de reflexión apilados en cada paso, o de forma continua a medida que la energía del radar se transmite entre las dos. Se debe tener cuidado de mantener las antenas separadas a una distancia y una altura conocidas de la base de la excavación a medida que se mueven. Si las antenas se mueven en pasos, es importante que cada antena se mueva a la misma distancia desde la parte superior o inferior de las caras expuestas para que siempre se conozca la distancia entre las dos. Si las paredes de la excavación están inclinadas, entonces se debe realizar una serie de mediciones de distancia para llegar a las separaciones de antena para cada uno de los pasos donde se recolectan los datos.

Cuando el material que se va a probar de esta manera está altamente estratificado, es importante que el campo eléctrico generado por la antena dipolo esté orientado en paralelo a los planos de cama. Para ello, los ejes largos (de lado a lado) de las antenas deben colocarse paralelos a los

planos de cama. De esta manera, la mayor parte de la porción eléctrica del campo electromagnético vibrará paralelamente a las capas del lecho y habrá un aislamiento máximo del haz del radar dentro de cada unidad estratigráfica (Conyers y Lucius 1996). Sin embargo, el cono de iluminación de la antena del radar aún puede transmitir energía del radar a capas adyacentes independientemente de la orientación de las antenas y, como siempre, las trayectorias de viaje de energía en el suelo son difíciles de predecir o definir a posteriori. En todos los casos, las antenas transmisora y receptora deben estar orientadas en la misma dirección para que exista la máxima "comunicación" entre las dos.

En una prueba de transiluminación de este tipo, dos excavaciones expusieron una sección gruesa de ceniza volcánica (Conyers y Lucius 1996). Se identificaron ocho unidades de ceniza diferentes en las caras de las excavaciones y se recogieron rastros de reflexión en cada lecho en siete pasos, desde la base de la excavación hacia arriba. Se colocó una antena de 300 megahercios en un lado de la exposición para recibir y una antena de 500 megahercios en el otro para transmitir. Un análisis de los tiempos de viaje en cada paso mostró que la velocidad aumentó de unos 6 centímetros por nanosegundo en la base (RDP de 23,2) a 28 centímetros por nanosegundo (un RDP de 1,1) en la parte superior (figura 5.6). Las dos mediciones de velocidad en la parte superior probablemente no midieron el viaje de la onda del radar en el suelo, ya que la energía del radar probablemente se "filtró" por la parte superior de la excavación y viajó en el aire entre las dos antenas, produciendo un RDP de 1,1, que es casi el de la velocidad de transmisión del radar en el aire.



**Figura 5.6:** En las pruebas de transiluminación, las mediciones de velocidad se pueden determinar en función de la profundidad, donde la energía se mueve horizontalmente en una dirección unidireccional a medida que las antenas se mueven hacia abajo en pasos desde cerca de la superficie hasta 170 cm de profundidad. En esta prueba hay una disminución gradual de la velocidad con la profundidad, debido a una mayor saturación de agua en el material que se está probando. Las pruebas 6 y 7 midieron las ondas de radar que viajaban en el aire sobre la parte superior de la excavación y cualquier energía que viajara a través del material no fue identificable.

La identificación de las ondas de aire "filtradas" que viajaron entre las dos excavaciones ilustra la importancia de utilizar excavaciones bastante profundas al realizar pruebas de transiluminación. Si las pruebas se realizan demasiado cerca de la superficie, las ondas de radar viajarán por encima o alrededor del material que se va a probar, y las primeras llegadas pueden ser solo ondas de aire. También es fundamental que se obtengan distancias precisas entre las antenas en todas las posiciones para que se puedan realizar cálculos de ondas de aire y sus tiempos de llegada calculados con anticipación y luego identificados.

Conociendo la separación horizontal de las antenas y el tiempo de viaje en un sentido de la energía del radar entre las dos antenas en cada paso, se pueden calcular las velocidades y determinar el RDP, utilizando



la ecuación 3.1. Cuando se trazaron las mediciones de velocidad en cada uno de los siete pasos, como se muestra en la figura 5.6, frente a la profundidad de las antenas, se construyó un gráfico de gradiente de velocidad. La información de velocidad derivada de las pruebas de transiluminación puede ser de gran importancia porque identifica los cambios de velocidad en función de la profundidad, lo que generalmente no es posible en los métodos de onda directa. En el gráfico de la figura 5.6, la velocidad aumenta a un ritmo bastante constante con mayor profundidad, lo que probablemente indica un aumento gradual de la saturación de agua residual, que también fue visible como cambios de color menores en la sección expuesta de ceniza volcánica probada. El pequeño cambio en el gradiente de velocidad a 100 centímetros puede indicar un cambio en la velocidad entre capas de composición muy diferente y, por lo tanto, diferentes saturaciones de agua.

Si los cambios en la velocidad pueden correlacionarse con la litología u otros cambios de composición o de saturación de agua en el material, pueden producir información importante para interpretar los perfiles de reflexión cercanos, ya que siempre es importante comprender los orígenes de las reflexiones al intentar comprender los datos GPR de cualquier sitio. Debido a que todas las reflexiones se generan en interfaces enterradas donde hay distintos cambios de velocidad, las pruebas de transiluminación pueden ser uno de los mejores métodos para comprender estas variaciones y posiblemente correlacionar las reflexiones con unidades estratigráficas conocidas en el subsuelo.

Los datos de las pruebas de transiluminación deben usarse con precaución porque las trayectorias de viaje de las ondas de radar dentro del material que se está probando nunca pueden conocerse con certeza, al igual que con las pruebas CMP y WARR. En todos estos tipos de pruebas de ondas directas, la energía del radar tenderá a viajar preferentemente dentro del material de mayor velocidad, y el tiempo de la primera llegada que se utiliza para calcular la velocidad puede ser de las ondas que viajaron en la "velocidad más rápida". Material, no necesariamente aquellos dentro del material de la profundidad a la que se colocan las antenas. Cualquier llegada de ola que pueda haber viajado a través de la capa de menor velocidad sería entonces abrumada, oscurecida o irreconocible de otra manera en las trazas resultantes.

Las pruebas de transiluminación, CMP y WARR siempre deben realizarse junto con las pruebas de onda directa de objetos a profundidades conocidas. La combinación de ambos tipos de métodos de prueba de velocidad producirá tanto mediciones de velocidad vertical promedio como un gradiente de velocidad con profundidad.

## MEDICIONES DE LABORATORIO DE RDP

En la mayoría de los sitios arqueológicos, generalmente se pueden recolectar muestras de unidades subterráneas para su posterior procesamiento en el laboratorio para determinar la permitividad dieléctrica relativa, la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética. Estas mediciones se pueden utilizar para estimar la atenuación de la velocidad y la energía de los materiales en un sitio. También son valiosos para la construcción de modelos informáticos bidimensionales, que se analizan en el capítulo 7. Si las muestras de suelo y sedimentos se recogen y se almacenan inmediatamente en recipientes herméticos, se pueden considerar como condiciones de campo aproximadas. Sin embargo, en realidad, las muestras que se almacenan y transportan en bolsas o botellas de plástico nunca replicarán las condiciones del campo, ya que su porosidad, empaque de granos y saturación de agua cambiarán algo en el proceso de recolección y transporte.

Desafortunadamente, solo unos pocos dispositivos pueden realizar este tipo de mediciones de laboratorio, ninguno de los cuales está disponible para la mayoría de los arqueólogos. Una forma de determinar las propiedades magnéticas y eléctricas en el laboratorio es mediante el uso de técnicas descritas por Olhoeft y Capron (1993) y Saarenketo (1998). En estas pruebas, las muestras primero se secan y trituran y luego se someten a diferentes frecuencias de energía electromagnética en un dispositivo llamado analizador de redes (Conyers 2004). Las mediciones de RDP, conductividad y permeabilidad magnética se pueden realizar cuando las muestras están totalmente secas y con diferentes saturaciones de agua. Los cambios de saturación de agua que se pueden encontrar en el campo se pueden simular humedeciendo progresivamente las muestras con agua de un gotero entre las pruebas, dando tiempo para que el agua penetre adecuadamente en el material.

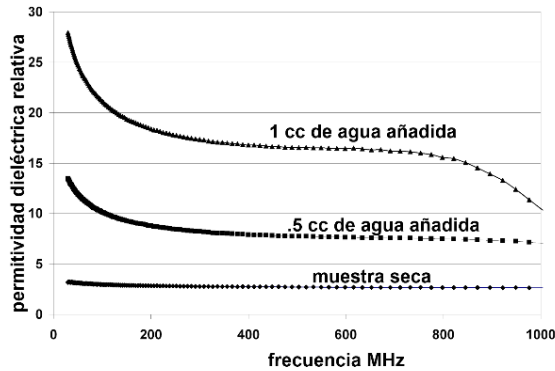
Existe un peligro cuando se utilizan datos de este tipo de pruebas de laboratorio porque los cambios en el material que afectan el empaque y la porosidad del grano siempre ocurren durante el procedimiento de prueba (Olhoeft 1986). Además, cuando el agua se vuelve a colocar artificialmente en una muestra después de que se haya desecado artificialmente en el laboratorio, se crean condiciones diferentes a las del campo. Los dispositivos que miden las propiedades electromagnéticas de las muestras también tienden a transmitir más energía a una muestra de la que normalmente ocurriría en el campo, donde siempre se produce la atenuación y la dispersión de ondas con la profundidad.

Se realizó una prueba de laboratorio de este tipo en lo que parecía ser un suelo arcilloso del centro de Illinois (Conyers 2004). Más tarde se determinó que era una arcilla limosa, y se determinó que la arcilla no era arcilla mineralógica sino fragmentos de roca del tamaño de arcilla arrastrados por el viento. La muestra se desecó primero totalmente en un horno durante la noche para eliminar toda el agua residual. Luego se midió su permitividad dieléctrica relativa en muchas frecuencias que van desde 10 a 1200 megahercios (figura 5.7).

Un análisis de esas lecturas indicó que estos tipos de mediciones dependen un poco de la frecuencia con variaciones en el extremo superior y inferior del rango, pero el RDP se mantuvo bastante estable dentro del rango de frecuencia de la mayoría de las antenas GPR (200 a 1000 megahertz). Estos tipos de mediciones de laboratorio siempre dependen de la frecuencia. A altas frecuencias, se pierde algo de energía electromagnética en la estructura atómica de los materiales debido a las corrientes de desplazamiento, provocadas por pequeñas perturbaciones dentro de las órbitas de los electrones. A bajas frecuencias, los iones en el material no pueden responder lo suficientemente rápido al campo electromagnético impuesto y hay una mayor conductividad iónica y, por lo tanto, se miden valores de RDP más altos.

Dejando a un lado esas variaciones de frecuencia, lo más notable de la prueba que se muestra en la figura 5.7 es la sensibilidad de las muestras a la adición de agua. Cuando solo se agregaron 0,5 centímetros cúbicos de agua destilada a la muestra total de sedimento de 13 centímetros cúbicos, el RDP aumentó de 3 a aproximadamente 8. Y con 0,5 centímetros cúbicos adicionales de agua aumentó aún más, a aproximadamente 17. Esta prueba drásticamente ilustra lo importante que es la adición de una pequeña cantidad de agua para la velocidad de desplazamiento del radar y, por lo tanto, el RDP del material en el suelo (Conyers 2012a: 34).

Este mismo fenómeno es también visible en el ensayo de transiluminación de la figura 5.6 donde los lechos de ceniza de idéntica composición tienen valores de RDP muy variables con mayor profundidad en el suelo (y por tanto mayor saturación de agua), así como con cambios de porosidad entre diferentes unidades estratigráficas (que también cambia la cantidad de agua contenida en cualquier estrato).



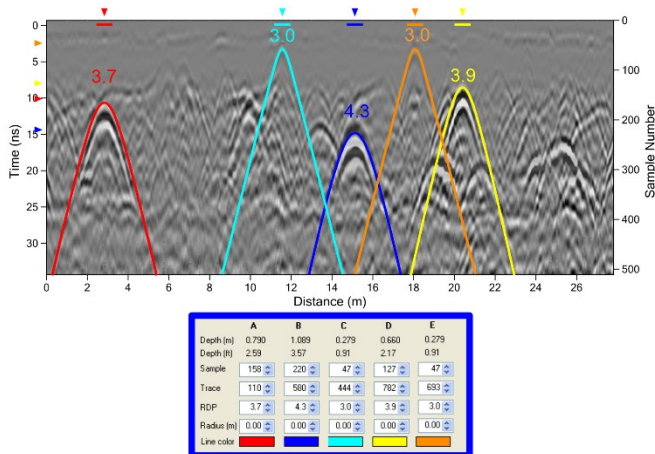
**Figura 5.7:** Una prueba de laboratorio de RDP en una muestra de arcilla. Cuando se secó, este material tuvo un RDP de 3, que aumentó rápidamente a medida que se agregaron pequeñas cantidades de agua destilada, lo que ilustra la importancia del agua para la transmisión de la energía del radar en el suelo. Muchas de estas pruebas se han realizado en diferentes materiales molidos y casi todas producen resultados similares con muestras secas que tienen un RDP de 3 y todos los cambios en el RDP son una función de la cantidad de agua añadida.

Sternberg y McGill (1995) en Arizona adoptaron un enfoque interesante para las mediciones de laboratorio. En sus sitios, se tomaron muestras de unidades de sedimentos subterráneos, que se analizaron para determinar su tamaño de partícula, componentes mineralógicos y saturación de agua. Sin tener que depender de mediciones de laboratorio de RDP y conductividad eléctrica, compararon sus mezclas de arena, arcilla y agua con tablas publicadas de RDP y otras mediciones para esos materiales (Olhoeft 1986) de una manera bastante simplista pero efectiva. Luego se estimaron la permitividad dieléctrica relativa y la velocidad para sus condiciones de campo únicas, y los tiempos del radar se convirtieron a profundidad aproximada, con buenos resultados.

### **ANÁLISIS DE HIPERBOLAS DE REFLEXIÓN DE FUENTE PUNTUAL**

Cuando los transectos de GPR cruzan características del subsuelo que generan fuentes puntuales, como tuberías, paredes, rocas o pequeños espacios vacíos, se generan reflejos hiperbólicos (figura 3.15). La geometría de la hipérbola generada (en general, la inclinación de los brazos de la hipérbola) es una función de la velocidad promedio del material a través del cual pasa la energía del radar (Leckebusch 2000;

Lucius y Powers 2002; Martinaud et al.2004; Paniague et al.2004; Tillard y Dubois 1995) y el tamaño de la fuente puntual que generó la hipérbola. Cuando se recopila un perfil con marcas de referencia de superficie igualmente espaciadas (o con una rueda de medición donde las trazas de reflexión están igualmente espaciadas a lo largo de un transecto), la distancia se conoce en una dimensión y las velocidades de muchas trayectorias de viaje de onda hacia y desde la fuente puntual en el suelo se mide cuando la antena está en diferentes ubicaciones de superficie. Luego, una hipérbola generada por computadora se “ajusta” a la hipérbola generada en el suelo y se calculan sus dimensiones (figura 5.8). Luego se pueden medir la velocidad y la distancia, y se puede calcular la velocidad promedio desde la superficie del suelo hasta la fuente puntual utilizando programas de computadora que aplican funciones trigonométricas a estas mediciones. La mayoría de los programas de procesamiento GPR disponibles realizan los mismos cálculos.



**Figura 5.8:** Se pueden utilizar programas informáticos para ajustar hipérbolas de una geometría conocida a hipérbolas de reflexión en perfiles de radar con el fin de llegar a obtener la velocidad. En esta prueba, las fuentes puntuales poco profundas calcularon una RDP de aproximadamente 3. En reflexiones más profundas se calcularon valores promedio para RDP de hasta 4.3.

Un levantamiento GPR que genera muchas hipérbolas en perfiles de reflexión se puede usar fácilmente para evaluar la velocidad tanto en profundidad como a lo largo de una cuadrícula sin tener que recurrir a ninguno de los métodos de prueba de velocidad de campo anteriores

(figura 5.8). En este método, se pueden probar hipérbolas que se generaron a diferentes profundidades en el suelo (asumiendo que hay hipérbolas presentes) y se pueden determinar variaciones en la velocidad tanto con profundidad como espacialmente a lo largo de un perfil, y con suficiente información de múltiples perfiles, a través de un perfil. red. A menudo, se trata de más información de la necesaria, o incluso deseada, y normalmente una velocidad media para el conjunto de datos en su conjunto es suficiente para corregir los tiempos de viaje del radar a una profundidad aproximada.

## **CONCLUSIONES ANALISIS DE VELOCIDAD**

Las pruebas de velocidad más precisas son las realizadas en el campo que miden directamente los tiempos de viaje del radar de los objetos a profundidades conocidas. El objeto a resolver debe ser de metal para maximizar los reflejos del radar. Si es posible, se deben realizar una o más pruebas de velocidad dentro o cerca de una cuadrícula de GPR propuesta para probar la velocidad de todos los materiales que potencialmente se estudiarán. A profundidades superiores a unos pocos metros, es posible que las barras de hierro u otros objetos relativamente pequeños no sean visibles, y los objetos más grandes, como una pared de estructura enterrada, pueden usarse como objetivo. Sin este tipo de pruebas, la correlación de unidades estratigráficas importantes o materiales culturales enterrados con los reflejos medidos en los tiempos de viaje del radar siempre será sospechosa, a menos que la estratigrafía sea tan simple y las características arqueológicas tan dramáticas que el origen de los reflejos resultantes no esté en duda. Esto es raramente el caso.

Si las excavaciones no están disponibles en un sitio, la velocidad de las zonas cercanas a la superficie se puede estimar usando pruebas comunes de reflexión y refracción de punto medio o gran angular. Estas pruebas se pueden usar para estimar velocidades cercanas a la superficie, pero generalmente no son tan valiosas para obtener información de velocidad desde grandes profundidades.

Es importante comprender que cualquier dato derivado de las pruebas de velocidad de campo de cualquier tipo debe aplicarse solo a los perfiles de reflexión GPR que se adquirieron aproximadamente al mismo tiempo. Las condiciones del suelo pueden cambiar con la temporada o debido a otros factores, como lluvias intensas o deshielo, y la velocidad del radar subterráneo puede cambiar en consecuencia.

A falta de pruebas de velocidad de campo de cualquier tipo, las muestras de material de sobrecarga recolectadas en el campo pueden analizarse en el laboratorio o compararse con tablas estandarizadas para

obtener propiedades eléctricas y magnéticas. Estos datos pueden usarse para llegar a una permitividad dieléctrica relativa aproximada, a partir de la cual se puede calcular la velocidad, si no se dispone de otra información. Por lo general, esto es más trabajo del necesario para la mayoría de los proyectos de GPR, ya que generalmente se puede obtener una buena información de velocidad a partir de un análisis de hipérbolas de reflexión después de regresar del campo.

Una cuadrícula GPR que contiene una gran cantidad de hipérbolas de reflexión generadas a partir de fuentes puntuales enterradas suele ser el mejor conjunto de datos para calcular la velocidad. Los programas de computadora que se ajustan a la geometría de las hipérbolas son muy rápidos y pueden ser tan precisos como otros métodos. Estos análisis se pueden realizar sin necesidad de excavaciones y son muy buenos para obtener muchas estimaciones de velocidad promedio en áreas extensas que fueron levantadas.

Todas o algunas de las pruebas de velocidad descritas en este capítulo deben realizarse de forma habitual durante los levantamientos GPR. En su mayor parte, no son difíciles ni requieren mucho tiempo y proporcionarán información valiosa en profundidad y tiempo que es necesaria para procesar datos de reflexión GPR sin procesar. Los reflejos que se registran e interpretan solo en el tiempo solo se pueden usar como una estimación aproximada de la profundidad sin conversiones precisas de tiempo-profundidad.

## CAPITULO 6

### Procesamiento de datos posterior a su adquisición (Post-Proceso)

Por lo general, los perfiles de reflexión de GPR que se ven durante o inmediatamente después de ser adquiridos en el campo están ensombrecidos por lo que los intérpretes denominan "ruido", "reverberaciones", "interferencia", "múltiples", "desorden", "picos" y "nieve." Los perfiles de reflexión pueden contener reflejos extraños, como ondas de aire, reflejos múltiples e hipérbolas de reflexión de fuentes puntuales (elementos aislados), que también dificultan su interpretación o procesamiento en mapas utilizables. Los perfiles de reflexión de campo en bruto tampoco suelen recopilarse con escalas precisas de profundidad u horizontal, y deben colocarse en los registros de reflexión después de regresar del campo para que todas las reflexiones de radar se coloquen con precisión en el espacio. En casi todos los casos, los datos de reflexión "sin procesar" deben "limpiarse" y ajustarse de alguna manera antes de la interpretación.

Hay disponible una gran cantidad de programas de procesamiento GPR comerciales, patentados y gratuitos para este tipo de procesamiento de datos. Muchas de las técnicas de procesamiento de GPR incluidas en estos programas se tomaron originalmente y luego se modificaron de las utilizadas en la industria del petróleo, que procesa datos de reflexión sísmica y otras aplicaciones de teledetección que se ocupan del procesamiento complejo de imágenes (Hatton et al. 1986; Jeng 2009); Leucci et al.2012; Malagodi et al.1996; Milligan y Atkin 1993; Sheriff y Geldart 1985; Udphuay et al.2010; Ulriksen 1992; Yilmaz 2001). En todos los casos, para procesar reflexiones GPR, los datos originales deben haber sido registrados digitalmente o ser datos analógicos que hayan sido digitalizados.

Nunca se debe intentar utilizar programas de procesamiento "listos para usar" sin comprender las implicaciones de cada técnica de manipulación de datos. Esto se debe a que muchas técnicas se escribieron para objetivos muy específicos, y algunas o incluso todas, pueden no ser aplicables a los objetivos arqueológicos o geológicos de uno. Siempre es peligroso procesar datos solo con la esperanza de que el producto final "se vea mejor", sin comprender exactamente qué está haciendo el paso de procesamiento en los registros de campo originales (Conyers 2012: 42). En la tabla 6.1 se encuentra una lista de las técnicas comunes de procesamiento de datos que pueden usarse potencialmente para datos GPR y sus objetivos. Hay muchas otras recomendaciones publicadas para los



pasos de procesamiento, muchas de ellas tomadas de procedimientos sísmicos (Neal 2004).

**Tabla 6.1:** Objetivos y métodos de procesamiento posterior a la adquisición

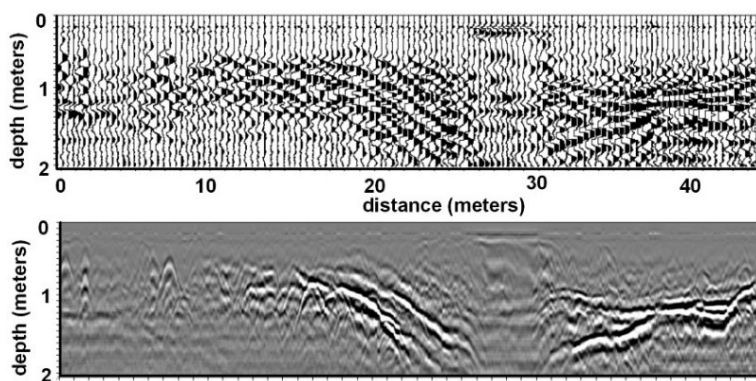
<b>Objetivo de procesamiento</b>	<b>Métodos a utilizar</b>
Corregir escalas verticales y horizontales en perfiles de reflexión; Reflexiones medias o suaves a lo largo de los transectos.	"hojas elasticas" estándar; comandos de normalización de distancia y exageración vertical; seguimiento de apilamiento
Elimina el ruido del sistema de bandas horizontales y la interferencia de frecuencia	Eliminación de antecedentes; filtros de pasa-altas verticales
Eliminar el ruido de alta frecuencia ("nieve")	Filtros de frecuencia de pasa-bajas; Filtros F-k
Eliminar múltiples reflejos	Deconvolución
Eliminar y comprimir hipérbolas de fuentes puntuales en sus fuentes; corregir la orientación de las capas de inmersión pronunciada	Migración
Cambiar la resolución de reflejos de diferente tamaño y profundidad	Filtrado de frecuencia
Aumente la visibilidad de reflejos sutiles o de baja amplitud.	Ganancia; Transformada de Hilbert

Como ocurre con la mayoría de los procesos posteriores a la adquisición, algunos pasos deben realizarse en un orden determinado (Neal 2004; Pedley y Hill 2003; Woodward et al. 2003). En la tabla 6.1, estos pasos se enumeran en el orden aproximado en el que deben intentarse después de regresar del campo. Por ejemplo, los perfiles de reflexión siempre deben corregirse espacialmente en las dimensiones horizontal y vertical antes de iniciar otros pasos. La eliminación del ruido de fondo puede eliminar los reflejos horizontales extraños en los perfiles, pero esto generalmente provocará una disminución en las amplitudes

restantes de algunos reflejos, que luego deben aumentarse con el aumento de rango de ganancia para ser visibles. También es posible que la eliminación del ruido de fondo elimine reflejos que son importantes si son horizontales, por lo que este paso a veces debe realizarse con precaución. Entonces, es posible que los datos de reflexión tengan que filtrarse por frecuencia, aplicar filtros horizontales y luego volver a obtenerlos para mejorar los reflejos importantes que de otro modo no serían visibles. En algunos casos, los perfiles resultantes deberán migrarse una vez que se hayan calculado las velocidades para eliminar los ejes de hipérbola no deseados o colocar los reflejos en su profundidad precisa.

### **CORRECCIÓN DE ESCALA Y CREACIÓN DE PERFILES DE REFLEXIÓN**

El procedimiento de procesamiento más simple toma las trazas de reflexión individuales de cada transecto y las coloca en orden secuencial para que puedan verse como un perfil vertical bidimensional a través del suelo. Estos pueden imprimirse en formato de “trazo ondulado”, que muestra los trazos individuales y sus amplitudes, o en una imagen interpolada en escala de grises, donde las amplitudes de los reflejos individuales varían en tonos de gris (figura 6.1). En un mismo paso, los perfiles de reflexión pueden exagerarse tanto en la dimensión vertical como horizontal para enfatizar ciertos aspectos de la estratigrafía o elementos geotécnicos o arqueológicos enterrados, lo que corrige la distorsión en los ejes vertical u horizontal.

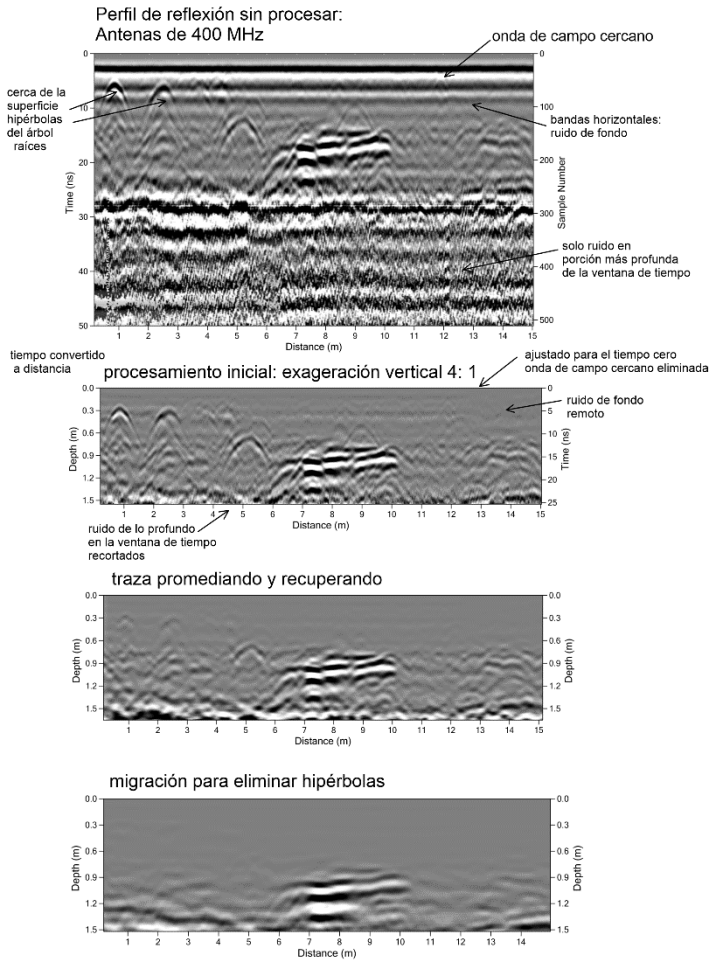


**Figura 6.1:** Los trazos individuales se pueden mostrar en formato de trazo ondulado (perfil superior) o en un perfil de escala de grises que tiende a mezclar todos los trazos de reflexión (perfil inferior). Este es un canal de corriente en la costa de California.

Los cambios en la exageración del perfil a menudo se pueden lograr con un "mouse" mientras los perfiles están visibles en la pantalla de la computadora, lo que expandirá las escalas rápidamente hasta que se logre el aspecto deseado. Una vez que se han determinado, una serie de estos pasos de procesamiento bastante simples, se pueden aplicar automáticamente a todos los perfiles de reflexión dentro de una cuadrícula utilizando algunos programas de software (figura 6.2).

Los perfiles de reflexión estándar también se pueden modificar para asignar colores a las amplitudes relativas de las reflexiones. De esta manera, los reflejos significativos que pueden representar interfaces importantes en el suelo son más fácilmente visibles para el ojo humano. Sin embargo, se debe tener cuidado al elegir una paleta de colores, porque a veces los perfiles de reflexión de muchos colores pueden estar "ocupados" y ser difíciles de interpretar (Leckebusch 2003; Milligan y Atkin 1993), y la escala de grises a menudo es más fácil de interpretar para el cerebro humano que muchos colores complejos.

Si los datos de reflexión se recopilan en modo continuo o con GPR como la única medida de distancia utilizada, siempre habrá un número desigual de trazas de reflexión entre las marcas de referencia debido a las inconsistencias en la velocidad de remolque de la antena. Los comandos de normalización de distancia harán las trazas de reflexión en estiradas o comprimidas como si fueran "láminas de goma" para que haya un espaciado igual de trazas entre las marcas fiduciales, creando una escala horizontal normalizada en todos los perfiles de reflexión. Cuando los datos se recopilan en pasos o con una rueda de medición, la ubicación de las trazas de reflexión en la distancia a lo largo de los transectos ya está normalizada, pero aún se debe insertar una escala horizontal y vertical para crear el producto final (figura 6.2).



**Figura 6.2:** Pasos para procesar datos de reflexión en un perfil. El perfil superior muestra todos los reflejos sin procesar medidos en muestras por trazo en la escala vertical, que luego se convierten en tiempo de viaje bidireccional en nanosegundos. La escala horizontal se mide en distancia, en función de la calibración de el codificador (odómetro). Muchas reflexiones horizontales son visibles dentro del campo cercano (ondas directas de la antena transmisora) así como el ruido de fondo. La exageración vertical se tiene en cuenta en el segundo perfil, se elimina el ruido de fondo y los tiempos de viaje se convierten en profundidad en el suelo. Un tercer paso de procesamiento promedia los rastros para suavizar los reflejos en la superficie de vivienda enterrada. El paso de procesamiento final elimina las hipérbolas de fuente puntual con migración de datos para producir esta imagen muy "limpia" de la superficie del piso enterrado.

Durante este proceso, siempre es importante corregir la posición de compensación cero que se estableció antes de la recopilación de datos (figura 4.2). Este es el desfase en el tiempo entre cero en la ventana de tiempo y cuando se recibe la primera reflexión de la superficie del suelo o la onda directa (a menudo 1 o más nanosegundos). Su ajuste colocará todos los reflejos en el tiempo correcto de viaje bidireccional por debajo de la superficie del suelo. Si se conoce la permitividad dieléctrica relativa o la velocidad promedio del material a través del cual viaja la energía del radar a partir de las pruebas de velocidad, los tiempos de llegada de todas las reflexiones se pueden ajustar para aproximar la profundidad en el suelo. Si aún no se han determinado las velocidades, siempre es bueno dejar la escala vertical en el tiempo de viaje bidireccional y ajustarla más tarde, después de que se haya calculado la velocidad.

Si los perfiles se recolectaron sobre un terreno irregular o exhiben otras discontinuidades debido a cambios de velocidad o diferencias en la vegetación de la superficie, las trazas de reflexión se pueden apilar fácilmente (figura 6.2) o promediar horizontalmente durante este proceso. Estos filtros horizontales suavizan los datos de reflexión y, a veces, eliminan las anomalías de acoplamiento y las pequeñas reflexiones conocidas como desorden. Esta función se puede realizar durante la recopilación de datos en el campo utilizando algunos sistemas GPR (capítulo 4), pero para aquellos que solo guardan datos de reflexión sin procesar, también se puede realizar en este momento.

Cuando se recopilan datos sobre áreas topográficamente complejas, las elevaciones de la superficie deben compensarse para que todos los reflejos del subsuelo se puedan ajustar a sus posiciones correctas en el espacio (figura 3.8). Si no se hace esto, la orientación y ubicación de las características del subsuelo nunca se pueden conocer con exactitud y, a menudo, se crean resultados interpretados muy extraños. La corrección de la elevación de la superficie de los perfiles de reflexión es un paso de procesamiento que a veces se denomina corrección estática en los comandos de software, un término tomado del procesamiento sísmico. Cuando los sitios tienen un gran cambio de relieve topográfico, por ejemplo, los realizados en los flancos de grandes montículos o colinas y valles, no existe una forma adecuada de ajustar perfectamente los reflejos en el suelo (Lehmann y Green 2000). Esto se debe a que las trayectorias de los rayos de las ondas de radar en el suelo son increíblemente complejas cuando las antenas y el cono de transmisión de energía están inclinadas en una pendiente y, por lo tanto, las fuentes de reflejos en el suelo siempre están cambiando. Algunos programas de software pueden ajustar la inclinación de la antena (Goodman et al. 2006), pero como las trayectorias

de los rayos en el suelo siempre solo se estiman, solo pueden corregir en forma general este tipo de complejidad de transmisión y reflexión.

### **ELIMINAR LAS BANDAS HORIZONTALES**

El tipo de filtrado más común que se puede aplicar a cualquier conjunto de datos es la eliminación de las bandas horizontales que aparecen en la mayoría de los perfiles de reflexión GPR (figura 6.2). Debido al "timbre" de algunas antenas, las bandas horizontales se registran en la mayoría de los perfiles (Jeng 2009; Leckebusch 2003; Shih y Doolittle 1984; Sternberg y McGill 1995). A menudo, este tipo de bandas se pueden generar como "ruido del sistema", que es inherente a cualquier unidad GPR y también comúnmente a partir de transmisiones de radio cercanas y otras interferencias de transmisión electromagnética (figura 4.3). El ruido de baja frecuencia que produce las bandas horizontales es denominado "wow" por algunos (Neal 2004), que es una jerga que proviene directamente del procesamiento sísmico. Las bandas horizontales en los perfiles también pueden ser el producto de los reflejos de los objetos de la superficie que estaban a la misma distancia de la antena durante la adquisición, como la persona que tira de las antenas o un vehículo remolcador. Independientemente de cómo se produzcan, las bandas a menudo oscurecen importantes reflejos del subsuelo que de otro modo serían visibles en los perfiles.

La mayoría de los programas de procesamiento tienen la capacidad de eliminar estas bandas por medio de un proceso aritmético simple que suma todas las amplitudes de las reflexiones que se registraron al mismo tiempo a lo largo de un perfil de reflexión completo (o en algún software una cierta cantidad de trazas de reflexión contiguas) y divide por el número de trazas sumadas. La forma de onda digital compuesta resultante, que con suerte es un promedio de todo el ruido de fondo que produce las bandas horizontales, se resta del conjunto de datos. Estos perfiles a los que se ha eliminado el ruido de fondo, después del filtrado mostrarán solo los reflejos no horizontales, o los reflejos horizontales que son de corta duración. Algunos programas de procesamiento también pueden eliminar un promedio móvil de cualquier número de trazas de reflexión deseadas en cada perfil de reflexión (Leckebusch 2003). Esto se denomina filtrado "de-wow" en algunos programas (Neal 2004).

Se debe tener mucho cuidado al aplicar un filtro de eliminación del fondo en áreas donde la estratigrafía del subsuelo, o las características de interés, es horizontal o casi horizontal. Si este paso de procesamiento se usara en perfiles GPR que han registrado reflexiones horizontales

producidas a partir de interfaces enterradas horizontales, la mayoría, si no todas, de esas reflexiones importantes se pueden restar. La eliminación del fondo también debe aplicarse solo en un conjunto de datos de reflexión digital con un número suficiente de trazas de reflexión. Esto se debe a que los filtros de eliminación del fondo eliminan todas las ondas que ocurren al mismo tiempo, dejando solo aquellas que son más aleatorias. Si se han adquirido muy pocos trazos de reflexión en un perfil en una distancia demasiado corta, o si solo se promedian unos pocos trazos para crear la onda compuesta que se va a restar, la onda compuesta que se eliminará podría estar compuesta por todas las reflexiones importantes en el perfil (Leckebusch 2003). El promedio involucrado en la eliminación del fondo eliminaría la mayoría de los reflejos del suelo, así como el ruido, dejando pocos datos de reflexión de cualquier tipo.

El ruido de bandas horizontales también se puede eliminar con filtros de frecuencia, tanto de pasa-alto como de pasa-baja. El ruido de bandas horizontales también puede ser causado por interferencias de baja frecuencia que producen variaciones de longitud de onda larga dentro de las trazas de reflexión. Puede eliminarse durante la recopilación de datos aplicando los filtros de pasa-altas correctos, como se explica en el capítulo 4, o, si las frecuencias que crean el ruido pueden aislarse y eliminarse durante los pasos de filtrado posteriores a la adquisición (Malagodi et al. 1996; Neal 2004).

Si todos estos pasos de procesamiento aún no “limpian” los datos de reflexión, o si se encuentran condiciones inusuales en el subsuelo o una gran cantidad de interferencia electromagnética, pueden ser necesarios pasos adicionales. La mayoría de los personas no suelen utilizar las siguientes técnicas, pero en determinadas situaciones pueden mejorar en gran medida la calidad y la claridad de los datos. En algunos casos drásticos, se debe eliminar un gran porcentaje de los datos brutos originales para mejorar las reflexiones restantes y producir resultados de calidad (Conyers 2012a: 34; Conyers y Cameron 1998).

## **ELIMINACIÓN DE RUIDO DE ALTA FRECUENCIA**

Este proceso puede volverse bastante complejo, ya que hay una serie de parámetros de procesamiento que se pueden ajustar para mejorar la calidad de los datos. Si hay una gran cantidad de interferencias de alta frecuencia de teléfonos móviles, transmisores de radio u otros dispositivos cercanos, los perfiles de reflexión pueden contener tanta "nieve" y "bandas" que no se interrumpen. Cuando esto ocurre, la eliminación del fondo, que suele ser el primer y más sencillo paso de

procesamiento, puede producir todavía perfiles de reflexión muy deficientes (figura 6.2). Varios filtros en algunos programas de procesamiento intentan eliminar las frecuencias que interfieren con filtros de respuesta de impulso infinito (IIR) o de respuesta de impulso finito (FIR). Ambos procesos de filtrado eliminan ciertas frecuencias con la diferencia entre el número de trazas de reflexión utilizadas en el promedio y el tipo de algoritmos de promediado e interpolación utilizados en el proceso de filtrado. En todos los casos, lo que se está haciendo es un método sofisticado para eliminar frecuencias altas (y a veces bajas) específicas que podrían estar contribuyendo al ruido.

Existen muchas técnicas de filtrado experimentales de este tipo, desarrolladas originalmente para el procesamiento de datos sísmicos por la industria de exploración petrolera, que se han aplicado a los datos de reflexión GPR (Lehmann et al. 1996; Majjala 1992; Milligan y Atkin 1993; Neal 2004; Yilmaz 2001; Yu et al.1996). Se debe tener cuidado al utilizar estos pasos de procesamiento porque existen algunas diferencias importantes entre los datos de reflexión sísmica y de radar. La apertura de las antenas de radar, que transmiten y reciben reflejos desde una gran área subterránea en un cono de transmisión, hace que cualquier aplicación automática de técnicas sísmicas a veces sea difícil ya que sus propiedades de transmisión de ondas son muy diferentes (Neal 2004). Otra diferencia es que la energía del radar se ralentiza durante su propagación en el suelo, mientras que las ondas sísmicas aumentarán su velocidad con la profundidad (Leckebusch 2003).

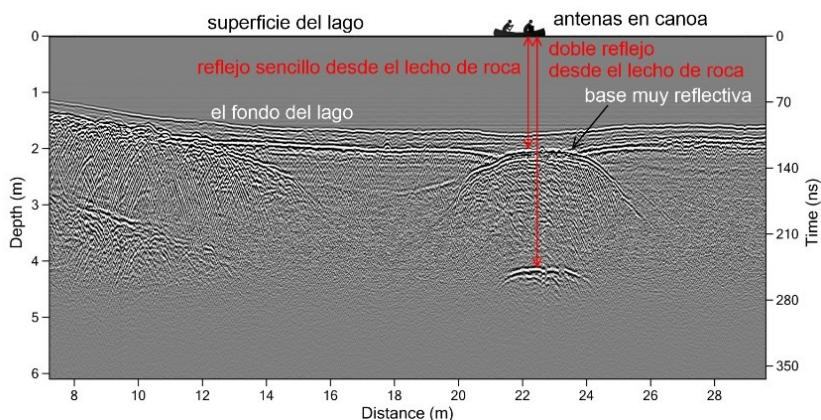
El filtrado F-k es una técnica tomada del procesamiento sísmico donde las reflexiones registradas en el tiempo se transforman en datos de frecuencia utilizando programas de transformación estadística (Majjala 1992; Yilmaz 2001). El resultado de este procedimiento de procesamiento es que se eliminan las reflexiones de ángulo alto (posiblemente también hipérbolas de reflexión de fuente puntual), que pueden estar ocultando datos horizontales importantes (Neal 2004). Las variaciones en este método también se utilizan para migrar los reflejos a su posición correcta con información detallada de la velocidad. Esta técnica de procesamiento de datos sísmicos se ha aplicado incorrectamente a algunos datos de GPR y solo debe usarse con precaución.

## **ELIMINACIÓN DE MÚLTIPLES REFLEXIONES**

Los reflejos múltiples (a menudo llamados simplemente múltiplos) se producen cuando la energía del radar se refleja hacia adelante y hacia atrás entre un objeto enterrado y la superficie del suelo, o entre las capas del



subsuelo. Cuando cada una de las reflexiones de estos objetos o interfaces se reciben en la antena de superficie y se registran, se muestran de perfil como reflexiones horizontales repetitivas (figura 6.3), todas las cuales están separadas por la misma distancia (medida en el tiempo). A menudo, los múltiplos de este tipo se pueden confundir con reflejos "reales" que podrían haberse creado a partir de múltiples capas apiladas en el suelo. Por lo general, se pueden diferenciar porque los múltiplos están espaciados en un intervalo de tiempo igual a medida que se apilan uno encima del otro dentro de los perfiles de reflexión. A veces, los múltiplos también se crean mediante "antenas que suenan" que están ubicadas dentro del campo cercano del otro y, por lo tanto, reverberan, creando el mismo efecto.



**Figura 6.3:** Pueden producirse múltiples reflejos en superficies horizontales con altos coeficientes de reflectividad. La energía del radar se refleja desde la interfaz enterrada de regreso a la antena de grabación, y luego de regreso al suelo, para ser re-reflejada numerosas veces desde ambas interfaces, creando muchas reflexiones apiladas. En este caso, las ondas reflejadas probablemente se produjeron desde el fondo de una canoa en la superficie del lago, donde se recopilaron los datos. Datos recopilados en Mesa Lake, Colorado.

Estos reflejos múltiples no deseados a menudo oscurecen reflejos importantes que podrían haberse registrado al mismo tiempo en los trazos de reflexión y, de ser así, deben eliminarse (Neal 2004). Este proceso se llama deconvolución, o más precisamente "deconvolución predictiva", porque el método intenta predecir la forma del pulso de radar transmitido desde la antena de superficie y cómo cambiará a medida que se mueva en el suelo. Estos cambios de amplitud y longitud de onda de las ondas de radar que se propagan en el suelo ocurren debido a variaciones en el acoplamiento a lo largo de cambios en la superficie, la imposición de ruido

de fondo, variaciones del agua y muchas otras variables difíciles de identificar (Neal 2004). Esta técnica de procesamiento es otro paso que ha sido modificado para datos GPR de estudios sísmicos (Belina et al 2009; Fisher et al. 1994; LaFleche et al. 1991; Maijala 1992; Malagodi et al. 1996; Neal 2004; Neves et al. 1996; Rees y Glover 1992; Todoeschuck et al. 1992; Xia et al. 2003). Se basa en la teoría de que a medida que se transmite un pulso de radar al suelo, las porciones de la onda electromagnética cambiarán de forma o se convulsionarán. El propósito de este filtro es eliminar la parte de las ondas registradas que se han convulsionado durante la transmisión en el suelo. El procesamiento de deconvolución teóricamente restaura las ondas reflejadas en un perfil a su patrón original y presenta los datos con un "aspecto diferente". La técnica de deconvolución se puede utilizar para identificar y luego eliminar múltiples reflejos, si se pueden predecir con precisión.

Uno de los problemas con el procesamiento de deconvolución es que restaurar las ondas reflejadas a sus formas originales son principalmente conjeturas. Por lo general, es difícil determinar cómo se formaron las ondas transmitidas originales y cualquier proceso de deconvolución puede estar modificando los datos de maneras irreales. Aunque muchos expertos en GPR afirman comprender lo que hacen las ondas de radar en el suelo, gran parte de esta técnica de procesamiento aún permanece oscura. Si se puede mejorar el procesamiento de deconvolución de los datos del radar, se pueden obtener pistas importantes para comprender cómo las propiedades físicas del suelo modifican las ondas electromagnéticas transmitidas y ayudar en todos los tipos de interpretación de datos GPR. La mayoría de los intentos de aplicación de este paso de procesamiento hasta ahora han demostrado ser insatisfactorios (Maijala 1992; Rees y Glover 1992) o, en el peor de los casos, han eliminado reflejos importantes de forma involuntaria y, por lo tanto, deben usarse con precaución (Neal 2004).

## MIGRACIÓN

Los sistemas GPR estándar muestran una imagen distorsionada de la estratigrafía del subsuelo y las características del suelo. Esto se debe tanto al ancho del haz de propagación del radar que produce múltiples trayectorias de rayos como a cambios en la velocidad y, por lo tanto, a la refracción del haz transmitido con la profundidad. La migración es más comúnmente un proceso de imágenes bidimensionales que se ha utilizado con éxito para eliminar algunas de estas distorsiones causadas en todos los procedimientos de recopilación de datos de reflexión (Beres et al. 1999; Fisher et al. 1992; Fisher et al. 1994; Grasmueck 1994); Malagodi

et al.1996; Milligan y Atkin 1993; Moran et al.1998; Young y Jingsheng 1994). También se puede utilizar con conjuntos de datos tridimensionales, y en cuadrículas de datos poco espaciadas, las ondas de aire complejas y las hipérbolas de reflexión se pueden eliminar y migrar de regreso a su fuente (Grasmueck et al.2004; Kinlaw et al.2007; Orlando y Slob 2009).

Las distorsiones que pueden corregirse más fácilmente mediante la migración son causadas por el amplio haz de transmisión de las antenas de radar que generan reflejos de fuentes puntuales, que aparecen como hipérbolas (figura 3.17). Antes de que los datos del perfil de reflexión puedan procesarse en mapas bidimensionales e imágenes tridimensionales, estas hipérbolas a menudo deben eliminarse (Conyers 2012a: 42; Conyers et al. 2002).

Las superficies de inmersión pronunciada también difractan la energía del radar durante su transmisión hacia y desde una superficie reflectante plana (Jol y Bristow 2003; Neal 2004). Los tiempos de viaje más largos que resultan de esta difracción colocarán reflejos en profundidades o ubicaciones incorrectas en el subsuelo, distorsionando el tamaño y la geometría de algunos lechos o características del subsuelo. El proceso de migración se puede utilizar para ajustar espacialmente este tipo de reflejos distorsionados o hiperbólicos y “colapsarlos” de regreso al punto de origen (figura 6.2).

El método de migración más fácil para eliminar la hipérbola se logra sumando todos los reflejos a lo largo de los ejes de una hipérbola y colocando el promedio resultante en su vértice. Por lo general, esto debe hacerse manualmente para todas las hipérbolas en un perfil, lo que generalmente requiere primero identificarlas todas, lo que puede ser un proceso tedioso. Un proceso más sofisticado llamado método de Kirchoff (Geophysical Survey Systems 2000; Neal 2004) calcula el ángulo de incidencia y la distancia a la que se encuentra la característica reflectante debajo de la superficie. Luego aplica velocidades o perfiles de velocidad (que a menudo deben asumirse) a los datos y corrige la ubicación de los reflejos, colapsando también de manera efectiva todos los “brazos” de hipérbola de regreso a sus vértices. Se puede utilizar el mismo procedimiento de procesamiento para lechos de inmersión pronunciada, donde se puede realizar el mismo tipo de correcciones geométricas. Hay otros tres algoritmos de migración que se utilizan para la migración denominados Stolt, cambio de fase y diferencia finita (Neal 2004). Las pruebas realizadas por Leckebusch (2003) no mostraron diferencias entre ellas ni con el método de Kirchoff.

La migración se está convirtiendo en una técnica estándar en la mayoría de los programas de procesamiento GPR, pero puede llevar mucho tiempo y también potencialmente distorsionar muchos reflejos de

manera incorrecta. Por lo tanto, debe emplearse para tipos muy específicos de análisis de datos, y solo después de estar seguro del origen de los reflejos distorsionados, la velocidad de los materiales en el suelo y la geometría de las trayectorias de viaje de las ondas en el subsuelo.

Además de la migración de perfil de reflexión bidimensional más estándar, la migración tridimensional es posible (Grasmueck 1996; Leckebusch y Peikert 2001; Orlando y Slob 2009; Shragge et al. 2004). Este método colapsará no solo los reflejos hiperbólicos que se generan "en línea" (a lo largo de la dirección en que las antenas se mueven en transectos), sino también los reflejos que se reciben desde fuera del plano del transecto de antena (desde los lados).

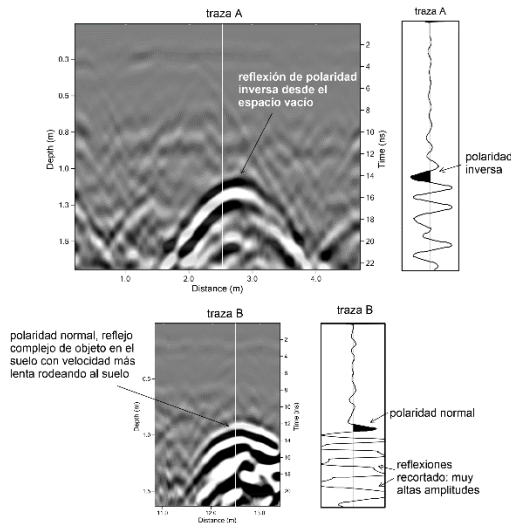
En muchos casos, puede ser mejor ver primero los perfiles de reflexión del radar en un formato no migrado porque las hipérbolas de fuentes puntuales son muchas veces capaces de identificar reflejos subterráneos que representan características arqueológicas de interés. Si todas las hipérbolas se colapsaron hasta el punto de origen (suponiendo que las técnicas de procesamiento de migración se estén aplicando correctamente), las fuentes puntuales suelen ser más difíciles de reconocer, lo que posiblemente haga que algunas características u objetos enterrados importantes no se reconozcan cuando se ven de perfil. Lo contrario también podría ser cierto si se generaran reflejos importantes (distintos de los que crean las hipérbolas) dentro de los ejes de las hipérbolas de origen puntual. En este caso, la migración de las hipérbolas de regreso a su punto de origen podría permitir que reflejos importantes, pero de otro modo oscurecidos, se hagan visibles en los perfiles de reflexión.

## **AUMENTAR LA VISIBILIDAD DE REFLEXIONES SUTILES**

Las reflexiones de baja amplitud siempre se pueden mejorar para que se hagan visibles en los perfiles de reflexión aumentando el rango de ganancia en ciertos tiempos de grabación (profundidades en el suelo). Muchos programas de procesamiento tienen la capacidad de mover un "mouse" a lo largo de una curva de ganancia, aumentando las amplitudes en momentos específicos para todos los trazos de reflexión en un perfil (figura 4.1). Cuando se aumentan las amplitudes de todas las reflexiones en una ventana de tiempo deseada, se deben aplicar filtros de eliminación de ruido de fondo como un segundo paso de procesamiento para eliminar las bandas horizontales resultantes, que también aumentan. Este proceso puede repetirse hasta que sean visibles reflejos invisibles. El riesgo en esta serie de métodos de procesamiento, como con todo el procesamiento posterior a la adquisición, es que cada paso filtra y potencialmente

distorsiona las formas de onda iniciales, haciendo que el producto final esté potencialmente tan distorsionado que sea irreconocible.

Los reflejos generados a partir de cambios muy sutiles en el suelo también se pueden mejorar con un paso de procesamiento llamado transformación de Hilbert (Sensors and Software 1999; Todoeschuck et al. 1992; Turner 1992; Yilmaz 2001). Este paso transforma las amplitudes de reflexión y su geometría en el suelo en información de fase y frecuencia espacialmente distinta. La fase de las reflexiones (ya sean deflexiones positivas o negativas en la forma de onda de una media) a menudo indica cambios importantes en la permitividad dieléctrica relativa de los materiales en una interfaz reflectante. Por ejemplo, la fase de una onda reflejada a menudo cambiará si se genera en una interfaz donde la velocidad aumenta en lugar de disminuir. Si bien esto no es tan común en la mayoría de las condiciones de campo, puede ser muy evidente donde hay espacios vacíos en el suelo, como es común con los ataúdes en los cementerios (Conyers 2012a: 134; Damiata et al. 2012).



**Figura 6.4:** Los cambios de fase (polaridad) de las ondas reflejadas en las interfaces son una función de los cambios en la velocidad a medida que las ondas viajan a través de los diferentes medios. En estos dos perfiles, recogidos en un cementerio en Pala, California, la hipérbola de fuente puntual superior se generó en un espacio vacío en un ataúd. La traza A de ese perfil muestra una polaridad inversa de la onda reflejada a medida que la energía del radar aumentaba su velocidad en el espacio vacío. La traza B en el perfil inferior exhibe polaridad normal en algún otro objeto en el suelo donde la energía disminuyó su velocidad en la interfaz reflectante.

En otros casos, un cambio de fase puede ser más sutil, por ejemplo, un reflejo que se genera en la interfaz de una arcilla húmeda sobre una arena. En este caso, la arcilla permitiría solo una transmisión relativamente lenta de ondas de radar, que luego se acelerarían al moverse hacia la arena subyacente. La onda reflejada resultante tendría un cambio de fase, y si se conociera la naturaleza general de los lechos en el suelo, este sutil cambio de fase podría decirle al intérprete qué tipo de materiales están generando los reflejos (figura 6.4).

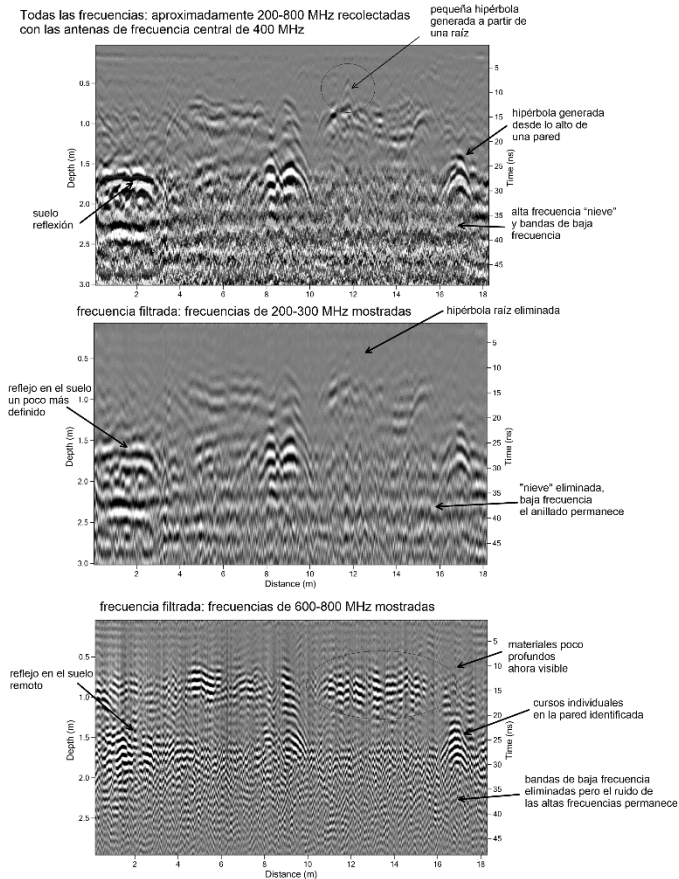
## **FILTRADO DE FRECUENCIA**

Recientemente se ha dedicado algún trabajo a analizar las variaciones de frecuencia de las ondas reflejadas generadas por diferentes materiales en el suelo y cómo esas variaciones están relacionadas con los materiales enterrados que las reflejan (Grealy 2006). Si bien se sabe desde hace mucho tiempo que la frecuencia de propagación de las ondas de radar en el suelo está relacionada con la profundidad de penetración (Neal 2004; Ranalli et al. 2004; Utsi 2004) y que la resolución de las características es una función de la longitud de onda (Orlando 2007; Yilmaz 2001), el procesamiento de los datos de reflexión para estudiar solo ciertas longitudes de onda es cada vez más común. Si bien el procesamiento de deconvolución intenta hacer esto, un método de procesamiento más sencillo es filtrar los datos de reflexión de modo que solo se muestren y analicen ciertas frecuencias (Annan 2005 Fisher et al. 1996; Grandjean et al. 2000), que se ha utilizado más comúnmente para análisis de agua subterránea y hormigón. En el trabajo arqueológico, este proceso está en su infancia (Conyers 2012a: 44; Grealy 2006).

La teoría es que una antena dipolo típica transmite energía al suelo en una banda ancha (figura 3.9) y, por lo general, son solo las ondas dominantes (o más fuertes) las que se ven y analizan en la mayoría de los programas de procesamiento de reflexión. Por ejemplo, una antena de 400 MHz está transmitiendo energía desde unas frecuencias de 200 a 800 MHz al suelo.

La mayoría del software que muestra datos sin procesar ni filtrar mostrará solo los reflejos de la frecuencia dominante (figura 6.5) o un promedio de todas las frecuencias, que es esencialmente la frecuencia central. Pero cuando las frecuencias más altas o más bajas se aíslan y luego se muestran, se pueden generar pantallas muy diferentes de los reflejos. Un filtro de pasa-altas de 200 MHz (que muestra solo las frecuencias superiores a 200 MHz) combinado con un filtro de pasa-bajas de 400 MHz (que aísla las frecuencias inferiores a 400 MHz) genera un perfil de

reflexión de solo las longitudes de onda más largas en el espectro de frecuencias de la antena de 400 MHz (figura 6.5).



**Figura 6.5:** El mismo perfil de reflexión que muestra energía reflejada de frecuencia diferente. El perfil superior muestra todas las frecuencias de una antena de frecuencia de 400 MHz. El perfil medio muestra solo la energía de 200-300 MHz, que elimina muchos de los reflejos más pequeños y la "nieve" generada por la energía de frecuencia más alta mientras crea un reflejo más bien definido desde el piso plano. El perfil inferior muestra solo las frecuencias de 600-800 MHz, lo que elimina efectivamente los reflejos amplios de baja frecuencia del piso y permite que los reflejos más pequeños y poco profundos sean visibles.

Se trata de reflejos de las capas más gruesas del suelo o de aquellas que están separadas por una mayor distancia vertical. Un filtro similar aplicado a este mismo conjunto de datos que aísla solo las frecuencias de

600-800 MHz mostrará las características de reflexión más pequeñas, o aquellas variaciones en el suelo que son delgadas o geográficamente aisladas (figura 6.5). Las ondas de esas frecuencias más altas no penetrarán a la misma profundidad que las frecuencias más bajas, pero tendrán una resolución más alta.

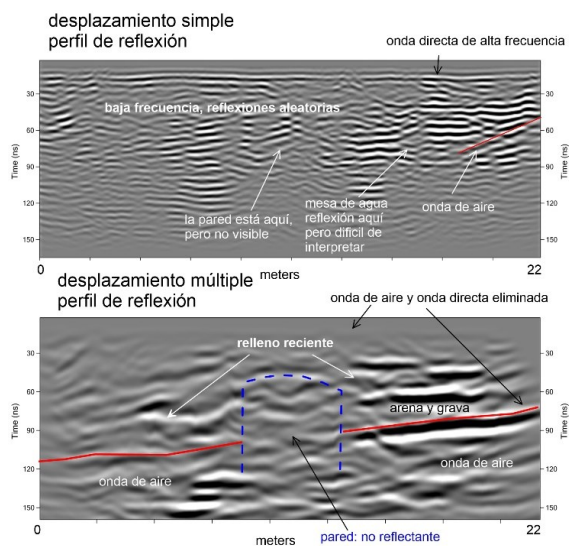
En los perfiles de reflexión individuales, este tipo de filtrado no suele producir imágenes que sean mucho más interpretables y, de hecho, pueden volverse bastante confusas. Pero cuando se procesan grandes conjuntos de datos de perfiles en una cuadrícula de esta manera, y luego se construyen mapas de amplitud, la resolución de algunos materiales que de otro modo serían invisibles en el suelo se puede mejorar enormemente (Conyers 2012a: 450). Un mapa de amplitud (discutido con más detalle en el Capítulo 7) de las ondas reflejadas de frecuencia más alta en reflexiones procesadas de este tipo generará muchos más detalles sobre algunas características enterradas.

### **PROCESAMIENTO DE MÚLTIPLES DESPLAZAMIENTOS**

Un método de procesamiento que ha sido objeto de mucha investigación recientemente es la adquisición de compensación múltiple (Berard y Maillol 2007, 2008; Booth et al., 2008, 2010; Brown et al. 2009; Perroud y Tygel 2005; Pipan et al. 1996, 1999, 2001). El proceso de recolección antes del procesamiento debe utilizar un sistema que emplee una antena transmisora y receptora que se puedan separar. Para recopilar perfiles de reflexión de desplazamiento múltiple, la antena transmisora se mantiene estacionaria mientras la antena receptora se aleja de ella a lo largo de un transecto lineal, en pasos. En cada paso, que puede ser de 10 o 20 cm o más, se recopila una traza de reflexión individual. La separación máxima de la antena puede ser de 5 metros o más en este proceso. Después de que se recogen todos los rastros en la antena receptora en múltiples distancias de compensación de una antena transmisora estacionaria, la antena transmisora se mueve hacia adelante a lo largo del transecto y se repite el procedimiento. Las trazas recopiladas suelen ser una combinación de muchas trazas apiladas en la ubicación de cada paso para minimizar el ruido de fondo. Este procedimiento requiere mucho trabajo y tiempo, pero los perfiles de reflexión resultantes pueden tener una mejor relación "señal/ruido", una mejor profundidad de penetración y una migración más precisa de las reflexiones (Berard y Maillol 2008; Booth et al. 2010). En este proceso también se pueden eliminar las ondas de aire producidas por objetos de la superficie cercana. Los perfiles de reflexión resultantes producen reflejos que se colocan con mayor precisión en el espacio, ya que la migración se logra calculando los cambios de velocidad



tanto a profundidad como lateralmente. El inconveniente es que este procedimiento requiere mucha mano de obra y un software especializado para generar el producto final. Un ejemplo de procesamiento de compensación múltiple se utilizó a lo largo de un muro medieval en el Este de Inglaterra, que fue construido en 1390. El muro se construyó con pequeñas piezas de pedernal, ladrillo y tiza, cementadas con barro local (Booth et al. 2010). La recolección y procesamiento de GPR en el sitio fue particularmente desafiante, ya que se encontraba en un entorno urbano adyacente a una iglesia, con numerosos automóviles y otros objetos que producían reflejos de ondas de aire. Se recogieron dos perfiles de reflexión a lo largo de una línea perpendicular a los restos enterrados del muro. Su presencia fue confirmada por agujeros en el núcleo después de que se procesaron los datos de GPR. Un perfil de reflexión típico, con una antena de transmisión y una de recolección que se mantienen a la misma distancia, se compara con un perfil de desplazamiento múltiple, los cuales fueron recolectados con antenas de 200 MHz (figura 6.6).



**Figura 6.6:** Se recogió un perfil de reflexión estándar de 200 MHz de desplazamiento único en la parte superior sobre un muro enterrado de la Edad Media delimitada por capas de arena y grava en la costa de Inglaterra. La pared, que es una característica homogénea que no produce reflejos, no es visible y hay reflejos aleatorios de baja frecuencia y ondas de aire de los automóviles estacionados cerca. Cuando se aplica procesamiento de desplazamiento múltiple a lo largo de este mismo transecto, el área de no reflexión que designa el área del muro es visible, las ondas de aire se eliminan y las capas de arena y grava fuera del muro son visibles.

El perfil de reflexión de desplazamiento único contiene ruido de alta frecuencia, una onda de aire producida por un automóvil estacionado y la onda directa cercana a la superficie está presente. La pared, que se compone de muchas piezas pequeñas de material en una matriz de arcilla y tiza, no es reflectante con las antenas de 200 MHz y, por lo tanto, no es visible en el perfil de reflexión de desplazamiento único. Además, el nivel freático definido por la extracción de núcleos no produce un reflejo distinto. El perfil de desplazamiento múltiple de 22 metros se recopiló en pasos de 20 cm con una separación máxima de antena de 5,1 metros. Las trazas recolectadas se procesaron en el perfil de reflexión de desplazamiento múltiple con un programa de software sísmico. La información detallada de velocidad proporcionada a partir de los datos de desplazamiento múltiple permitió migrar todas las reflexiones a su ubicación correcta en el suelo y se eliminó el ruido de baja frecuencia. La onda de aire generada por el automóvil estacionado también se eliminó en este proceso, ya que su velocidad podría determinarse fácilmente como la velocidad de la luz. En el perfil de reflexión resultante, procesado y corregido, el nivel freático es ahora fácilmente visible y la pared no reflectante se puede discernir como el área sin reflexión. Además, se eliminaron todos los reflejos de alta frecuencia y solo se mostraron los recibidos desde más profundidad en el suelo.

Este perfil tardó aproximadamente 3 horas en recopilarse, y el procesamiento de datos después de la recopilación también fue laborioso, lo que requirió un software costoso que no está escrito para datos GPR. Los resultados aquí merecen la pena, ya que la característica arqueológica de interés (la pared) y los estratos geológicos circundantes y el nivel freático no eran visibles sin este tipo de procesamiento.

## **CONCLUSIONES DEL TRATAMIENTO DE DATOS**

Por supuesto, todos los perfiles de reflexión deben procesarse para normalizar la distancia tanto horizontal como verticalmente. La eliminación del fondo también es una técnica muy simple e importante que siempre debe intentarse para eliminar el ruido extraño del entorno o del sistema GPR para la visibilidad de reflejos importantes del subsuelo. Todos, excepto estos pasos de procesamiento de datos GPR más simples, pueden distorsionar potencialmente los datos de reflexión y hacer que no sean reconocidos y deben usarse con precaución.

Si bien los datos muy ruidosos o distorsionados a menudo se pueden corregir con la migración para mejorar la resolución de reflejos importantes, siempre existe el riesgo de "sobrepesamiento".

Demasiado procesamiento de datos con la esperanza de obtener resultados útiles de lo que podría considerarse un levantamiento marginal a menudo puede producir resultados que son aún más difíciles de entender (Conyers 2012a: 40). La migración, la deconvolución y el filtrado de frecuencia pueden ser muy útiles en algunas situaciones, pero no se recomienda aplicarlos arbitrariamente a todos los conjuntos de datos con la esperanza de obtener resultados “diferentes”. Existen razones muy concretas para aplicar este tipo de procedimientos de procesamiento, y si no se comprenden los métodos de manipulación de datos, los resultados lo serán aún menos.

En el negocio del procesamiento sísmico, algunas personas han dedicado su vida al procesamiento de datos posteriores a la adquisición y, a menudo, pueden hacer maravillas con datos de mala calidad. Pero también hacen bromas entre ellos sobre su capacidad para modificar datos hasta tal punto que pueden producir casi cualquier resultado deseado por un cliente. La broma estándar en el laboratorio de procesamiento de datos sísmicos es que, si los datos de reflexión no producen los resultados deseados, simplemente envíelos a los expertos en procesamiento de datos, ya que pueden producir los resultados que uno desee.

Aunque se espera que uno nunca se confunda intelectualmente dentro de la red de procesamiento de datos, el potencial existe con la abundancia de pasos de procesamiento discutidos aquí, pocos de los cuales son realmente entendidos en su complejidad por muchos profesionales de GPR, y mucho menos por los típicos usuarios arqueológicos.

## CAPITULO 7

### Interpretación de datos GPR

Cuando los datos de GPR se aplicaron por primera vez a la arqueología en la década de 1970, la mayoría de las interpretaciones se hicieron observando perfiles de reflexión sin procesar y buscando "anomalías" que podrían haber sido producidas por reflejos de características arqueológicas enterradas (Bevan 1977; Conyers 1995; Sheets et al. 1985). A menudo, los perfiles de reflexión se imprimieron y analizaron en papel a medida que se recopilaban en el campo o se veían e interpretaban en un monitor de video. Estos métodos de interpretación eran, en el mejor de los casos, toscos e inexactos, pero eran casi todo lo que se podía hacer con datos de reflexión analógica que no estaban almacenados en algún tipo de medio digital para su posterior procesamiento.

Desafortunadamente, muchos usuarios de GPR todavía practican este tipo de interpretación, pero generalmente solo cuando los datos se adquieren en el campo y se pueden ver inmediatamente en la pantalla de la computadora a medida que se recopilan.

La mayoría de los usuarios de GPR que todavía emplean este tipo de interpretaciones "sobre la marcha" son conscientes de los peligros que pueden surgir al intentar realizar interpretaciones de esta manera.

Ahora todos deben saber que los registros de campo deben procesarse para eliminar el ruido, las escalas deben corregirse en dirección vertical y horizontal y que "detectar anomalías" en la pantalla pueden tener o no algún significado para las preguntas que se plantean (asumiendo que pueden ser reconocidas) y está plagado de problemas.

Desafortunadamente, muchos novatos que usan GPR todavía se concentran en encontrar y mapear "anomalías", lo que significa buscar cualquier cosa que sea "diferente" en un conjunto de datos de reflexión.

Casi todos los perfiles de reflexión de GPR están llenos de "anomalías", ya que no son más que reflejos creados por un cambio en la velocidad de las ondas a lo largo de las interfaces enterradas. Por lo tanto, cualquier cambio en el terreno producirá reflejos, que no son necesariamente "anómalos". Son solo reflejos que tienen una forma, orientación, amplitud, frecuencia específica o contienen variaciones en todos estos parámetros que son potencialmente interesantes. Por lo tanto, recomiendo no aplicar la palabra anomalía a un conjunto de datos de GPR, excepto de ciertas formas específicas (cuando realmente hay algo que es muy diferente de lo que se puede ver en un levantamiento). En cambio, las reflexiones deben describirse en términos de sus parámetros físicos y

geométricos, y luego interpretarse dentro de un marco de condiciones del terreno conocidas, materiales y posibles características enterradas (Conyers 2012a: 30).

Con el advenimiento del filtrado de datos digitales y el sofisticado procesamiento de datos, a fines de la década de 1980, los perfiles finalmente pudieron interpretarse de una manera más refinada y científica de lo que era posible anteriormente (Conyers 1995; Conyers y Goodman 1997; Goodman 1994). Sin embargo, hasta el advenimiento de los análisis de amplitud tridimensional a mediados de la década de 1990, la mayoría de la interpretación de datos de GPR consistía en analizar reflejos en perfiles que "parecían" características de interés enterradas y correlacionarlas con otros reflejos en perfiles adyacentes utilizando un método que algunos intérpretes lo denominan "meneo". Usando esta técnica laboriosa y a menudo inexacta, las características enterradas aún pueden identificarse, determinar su profundidad y su ubicación espacial dentro de una cuadrícula mapeada. Al utilizar el método de interpretación visual, los intérpretes a menudo no están seguros de qué reflejos se generaron a partir de características de interés y cuáles podrían haberse producido a partir de un "fondo" geológico y, por lo tanto, el origen de muchas características de reflexión mapeadas a menudo son poco más que conjeturas.

Mediante una interpretación basada en el conocimiento del terreno, los reflejos que produce y utilizando análisis tridimensionales, así como interpretaciones manuales de perfiles de reflexión, se pueden obtener excelentes resultados. Desafortunadamente, muchas personas aún no practican este tipo más holístico de interpretación de datos, y continúan buscando "anomalías" y esperan que se hayan generado a partir de algo en el terreno de interés. Una interpretación más informada utiliza una combinación de perfiles de reflexión procesados, modelado sintético, corte de tiempo de amplitud y representación de características tridimensionales.

## **MODELOS SINTÉTICOS GPR**

El modelado sintético de perfiles de reflexión bidimensionales utilizando una computadora se desarrolló en un intento de modelar objetos enterrados, estratigrafía y superficies de reflexión importantes (Conyers y Goodman 1997; Goodman 1994). El modelado puede proporcionar al intérprete una idea de cómo "deberían verse" los datos de reflexión de GPR del mundo real y permitirá una interpretación más precisa de los perfiles de reflexión de GPR una vez procesados (Conyers y Goodman 1997; Goodman 1994; Goodman y Nishimura 1993). También puede

permitir que el intérprete construya un modelo de estratigrafía y características arqueológicas conocidas antes de ir al campo para determinar si un levantamiento GPR será capaz de definir los materiales de interés enterrados. Una vez que se construyen los modelos en la computadora, se pueden modificar rápidamente para antenas de diferentes frecuencias y así determinar el equipo óptimo para llevar al campo y realizar levantamientos a la profundidad necesaria para poder resolver las características de interés. Una vez que se han adquirido los datos de GPR y se han procesado en perfiles de reflexión, los modelos se pueden reajustar para representar con mayor precisión las condiciones de campo conocidas como una guía en la interpretación. Cuando se usan de esta manera, son un gran beneficio al realizar interpretaciones, especialmente para determinar el origen de los reflejos visibles en los perfiles GPR.

Desafortunadamente, muchos practicantes de GPR recientemente han tendido a proceder directamente al mapeo de amplitud tridimensional como su primer paso en la interpretación de datos, lo que tiende a evitar cualquier comprensión de lo que realmente está produciendo los reflejos en el suelo (Conyers 2012a: 17).

Los perfiles de radar simulados por computadora se generan rastreando las trayectorias teóricas de las ondas de radar durante la transmisión a través de varios medios con permitividades dieléctricas relativas, conductividades eléctricas y permeabilidades magnéticas específicas. Se tienen en cuenta todas las posibles reflexiones de las interfaces modeladas en el suelo (Goodman 1994). La geometría bidimensional de la estratigrafía del subsuelo y las características arqueológicas están programadas en el modelo para generar lo más parecido posible a un caso de la vida real.

Como suele ser el caso, los perfiles de reflexión bidimensionales pueden verse significativamente diferentes de cómo se verían las estructuras enterradas en sección transversal si se vieran en la pared de una zanja. Lo más importante es que no se parecen en nada a lo que la mayoría de nosotros estamos acostumbrados a ver en otras imágenes mejoradas por computadora más comunes, como las de rayos X o tomografías computarizadas (TC) en medicina. Una vez que se estudian los modelos sintéticos y se puede comparar la generación de reflejos con las características arqueológicas o geotécnicas modeladas, también pueden ser una excelente herramienta de aprendizaje para ayudar a comprender cómo se propaga la energía del radar y luego cómo se reflejan o refractan las ondas en el suelo.

Solo se pueden producir modelos sintéticos de componentes importantes de un sitio si se dispone de información previa sobre las condiciones del subsuelo. Las características eléctricas y magnéticas de

los sedimentos y las condiciones del suelo a menudo deben estimarse, así como la geometría de las unidades de sobrecarga y la composición de las características de interés enterradas. Estos datos luego se alimentan a la computadora en un modelo bidimensional que es una simplificación de un corte vertical a través del suelo. La computadora usará esta información para predecir los coeficientes de reflectividad (ecuación 3.2) encontrados en varias interfaces, la atenuación de energía con la profundidad y dentro de cada unidad, la velocidad de la energía del radar en diferentes capas y la amplitud de las reflexiones recibidas en la superficie (Goodman 1994). Se pueden simular varias trayectorias de rayos dependiendo del cono de radiación que se modele para una antena particular y se pueden simular múltiples reflejos, refracción y transmisión a lo largo de interfaces modeladas. También se pueden modelar antenas de diferentes frecuencias y sus pulsos de onda generados.

Cuando se genera un modelo, las reflexiones resultantes se trazan en dos dimensiones de la misma manera que los perfiles de reflexión GPR estándar, y las escalas horizontal y vertical se pueden ajustar, al igual que con los perfiles de reflexión reales. Después del análisis de cualquier modelo, se pueden cambiar los parámetros de entrada y volver a ejecutar la simulación hasta que se obtenga una coincidencia razonable entre los perfiles de reflexión real y sintético. Este proceso iterativo de entrada de parámetros y comparación con datos del “mundo real” se denomina modelado directo en la prospección geofísica (Powers y Olhoeft 1994, 1995; Zeng et al. 1995) y es una poderosa herramienta de interpretación.

### **Creación de un modelo informático sintético**

Para generar un perfil de reflexión sintético, se calculan en una computadora un gran número de trayectorias potenciales de ondas de radar a través del modelo bidimensional, que se aproximan a las trayectorias que tomarían las ondas de radar en el suelo. Este tipo de modelado bidimensional es bien conocido en el procesamiento sísmico y a menudo se lo denomina en terminología geofísica como trazado de rayos (Cai y McMechan 1994; Goodman 1994; Leckenbusch y Peikert 2001). A diferencia del modelado sísmico, los modelos GPR también deben tener en cuenta los patrones de transmisión de forma cónica de las antenas transmisoras de superficie (Goodman 1994; Irving y Knight 2006). Los modelos de trayectoria de rayos en GPR se basan en algoritmos que tienen en cuenta una serie de ecuaciones complejas relativas a la teoría de la propagación electromagnética conductiva-disipativa (Grandjean et al. 2000; Jackson 1977).

Algunas posibles trayectorias de onda que deben tenerse en cuenta al crear un perfil de reflexión sintético por computadora se muestran en el

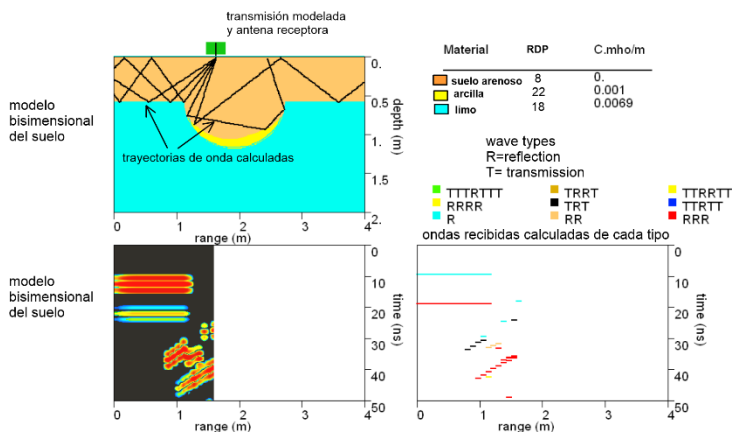
ejemplo de 7.1. Estos, y muchos otros posibles caminos de rayos similares a ellos deben programarse en la computadora para generar un modelo preciso de lo que hará la energía del radar en el suelo. En el ejemplo de la figura 7.1, hay cuatro medios diferentes en los que las ondas de radar pueden viajar y reflejarse desde: aire (no se muestra, pero directamente debajo de la antena), suelo arenoso cerca de la superficie, limo arenoso debajo de la arena y capa de arcilla llenando una zanja. Por lo tanto, un perfil de reflexión sintético que se produciría para este modelo debería tener en cuenta las ondas que se reflejan en cada interfaz del subsuelo, pero también las trayectorias de los rayos que se reflejan parcialmente en algunas interfaces y se transmiten y refractan parcialmente en otras.

A continuación, en el modelo se programan muchos recorridos de rayos y rutas de reflexión diferentes (- figura 7.1). Algunas ondas se reflejarán en la interfaz entre la arena y la unidad de limo arenoso, otras se transmitirán a través de esta interfaz y se perderán mientras la arcilla en el fondo de la trinchera, refleja una gran cantidad de energía. La mayoría de las ondas que se reflejan en la unidad de arcilla se registran, pero algunas se reflejan lejos de la antena y se pierden. En el mundo real, solo una parte de la energía de cada pulso se reflejaría y refractaría en cada límite, pero por simplicidad, el modelo está configurado para que cada rayo de radar tenga una ruta de viaje distinta. Por ejemplo, una onda se reflejará en la interfaz entre la arena y la arena limosa, otra onda viaja en ángulo desde la antena de superficie y se refleja desde el borde de la zanja en la interfaz de arcilla. Las ondas de estas múltiples reflexiones luego viajarán de regreso al suelo para ser reflejadas de nuevo a la superficie en la misma interface.

Hay muchas otras rutas dentro del cono de transmisión de la antena, y todas se simulan en la computadora miles de veces para llegar a una composición de todas las ondas reflejadas que regresan a la antena de superficie. Luego, la computadora mueve la antena a lo largo de la superficie del suelo modelada, y el proceso se repite para muchas ubicaciones de la antena a lo largo del transecto programado. La computadora predice el momento en que las ondas modeladas regresan a la antena receptora en la superficie y registra sus amplitudes resultantes. El modelo final (figura 7.2), muestra el "perfil de reflexión sintético" resultante utilizando estos parámetros y una comparación de un perfil de reflexión de una característica similar en el mundo real. La trayectoria de un rayo en este modelo ilustra lo complejo que puede ser el reflejo de las ondas de radar en el suelo. En este modelo, el lado opuesto del canal produce los reflejos de mayor amplitud y los reflejos de los bordes del canal son apenas visibles en el perfil modelado.



Goodman (1994) proporciona detalles sobre la teoría electromagnética involucrada y la descripción matemática de todos los pasos del modelo. En condiciones de campo reales, también deben tenerse en cuenta numerosas reflexiones fuera del plano (Carcione 1996; Grasmueck 1996; Leckebusch 2003). Recientemente se han desarrollado técnicas de modelado tridimensional mucho más complicadas para los datos de reflexión sísmica utilizados en la exploración de petróleo, que apenas están comenzando a aplicarse a los estudios de GPR (Brown et al. 2009; Lehmann et al. 2000).

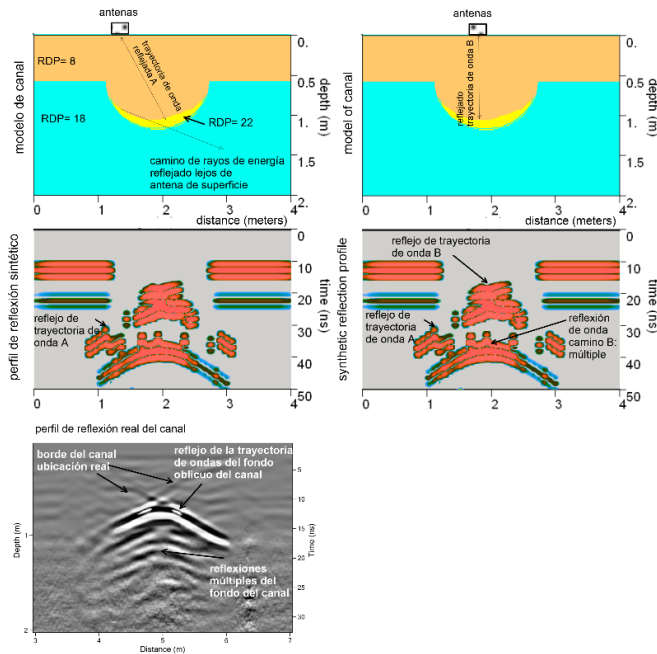


**Figura 7.1:** Muchas vías de ondas de radar pueden ocurrir en el suelo, la más simple es desde la antena de superficie hasta una interfaz enterrada y de regreso a la antena de superficie. Pueden ocurrir múltiples reflejos a medida que la energía se propaga a medida que viaja en el suelo, algunos regresan a la antena de registro superficie, pero otras ondas se pierden y no se registran. Este modelo, producido en la computadora, puede generar un perfil de reflexión calculado basado en el RDP de los materiales en el suelo, su conductividad eléctrica y los tipos de ondas (reflejadas o transmitidas) esperadas. Esta imagen muestra uno de los muchos miles de ondas modeladas generadas en este modelo de computadora.

### Aplicaciones de modelado sintético

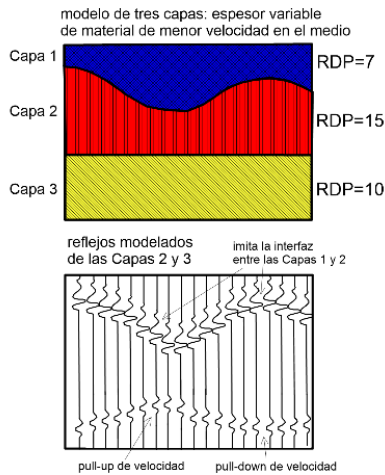
En el caso del modelo de canal / zanja (figura 7.2), si el modelo sintético no se construyó y analizó, los reflejos debajo de una característica de este tipo podrían confundirse con una hipérbola de fuente puntual derivada de algo posiblemente enterrado en el fondo de la zanja, o quizás algún otro tipo de rasgo enterrado debajo de la zanja. Un perfil de reflexión real de un canal de riego prehistórico en el sur de Arizona (figura 7.2) se parece mucho a la característica modelada e ilustra la

importancia de los modelos para comprender las características complejas del suelo (Conyers 2012b). Sin el modelo, la característica del sur de Arizona podría haberse interpretado de manera diferente. En la figura 7.3 se muestra un modelo que ilustra cómo los materiales en capas de espesor variable, con diferentes RDP, producen reflejos. En este modelo, la interfaz plana entre las Capas 2 y 3 representa una superficie de vivienda enterrada y es la interfaz, la capa de interés. La complejidad de este modelo surge de las diferencias en el RDP y los cambios de espesor en las dos unidades superpuestas.

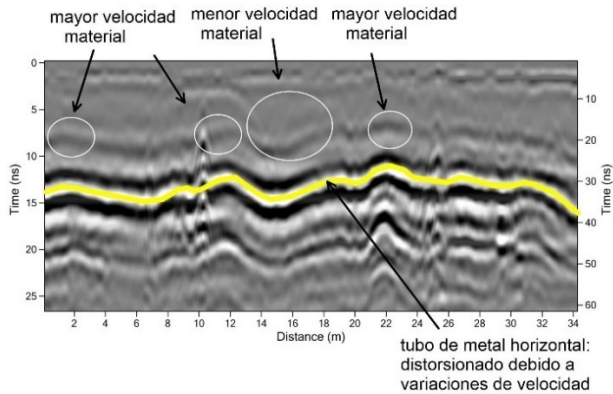


**Figura 7.2:** El modelo que se muestra se genera en la Figura 7.1 que demostró cómo las ondas de radar que se reflejan en las superficies modeladas en un canal se muestran en un perfil sintético. La fina capa de arcilla en el fondo del canal es altamente reflectante y refleja la energía transmitida directamente desde abajo, pero solo cuando la antena está directamente encima de la base del canal. La energía reflejada por esta unidad de arcilla cuando las antenas no están directamente sobre la base del canal se refleja lejos de la antena de superficie y se pierde. El modelo resultante muestra una reflexión en forma de hipérbolico de alta amplitud generada a partir de la capa de arcilla a medida que la energía se mueve delante y detrás de la antena transmisora (como la trayectoria de la onda A). Los bordes del canal no reflejan energía en este modelo. Esto es exactamente lo que se ve en un perfil de reflexión "real" del sur de Arizona a través de un canal de irrigación prehistórico (perfil de reflexión más bajo).

La sección gruesa de material con un alto RDP en la Capa 2 ralentizará la energía del radar a medida que viaja verticalmente desde la superficie del suelo hasta la interfaz de interés y de regreso a la superficie del suelo. La sección más delgada de este material de alto RDP en el medio del modelo ilustra cómo la energía del radar viajará desde la superficie del suelo hasta la interfaz de interés, y luego regresará a la superficie del suelo en un período de tiempo más corto que en los bordes porque viaja menos distancia en material de menor velocidad. Las reflexiones resultantes generadas a partir de la interfaz de interés en la parte superior de la Capa 3, cuando se trazan en el tiempo de viaje bidireccional, por lo tanto, se distorsionarán debido a estas diferencias de velocidad y espesor en la unidad superpuesta. Debajo del área donde se modela una sección más delgada de material de baja velocidad (RDP más alto), la interfaz inferior parecerá arquearse hacia arriba. Este arqueamiento hacia arriba y hacia abajo de la interfaz inferior, causado solo por diferencias en la velocidad y el grosor del material superpuesto, crea la ilusión de una superficie ondulada de la interfaz entre las unidades 2 y 3, denominada “pull-up” de velocidad en un área y un desplegable en la otra (figura 7.3).



**Figura 7.3:** Un modelo que muestra reflejos en un sistema de 3 capas con una capa relativamente "lenta" con un RDP de 15 que varía en espesor sobre una superficie plana de reflexión en la base. La cantidad variable de material de velocidad más lenta varía el tiempo transcurrido en el que la energía se mueve hacia y desde la superficie reflectante inferior, creando características de velocidad "pull up" y "pull down" (sube y baja). Los reflejos de la superficie ondulada superior se colocan correctamente en el espacio.



**Figura 7.4:** La velocidad "sube" y "baja" en un tubo de metal horizontal. Una variación en la velocidad de la arena que se superpone a esta tubería crea este reflejo distorsionado. Es probable que las velocidades se deban a la saturación de agua diferencial en los lechos de arena eólica que recubren la tubería en este cementerio en Denver, Colorado

Esto es exactamente lo que es visible en un perfil de reflexión de una característica horizontal conocida que tiene materiales superpuestos de diferente velocidad (figura 7.4). En este caso, los cambios de velocidad en el material superpuesto son causados por variaciones en la saturación de agua. El reflejo proviene de una tubería de metal perfectamente horizontal conocida y el material que lo recubre son unidades de arena arrastrada por el viento.

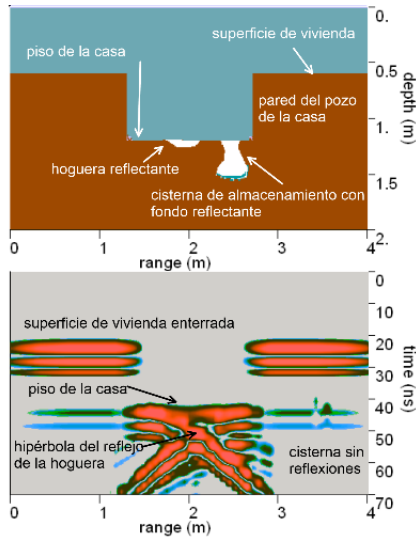
Un "pull-up" de velocidad similar al modelo de la figura 7.4 también se notaría en el campo debajo de un gran espacio vacío enterrado. El aumento en la velocidad de las ondas de radar a medida que las ondas viajan dentro del vacío crearía una inclinación hacia arriba artificial de reflejos que se generaron a partir de materiales debajo de él. También podría ocurrir una caída donde las condiciones localizadas crean una disminución en la velocidad de la onda del radar, posiblemente debido a un cambio estratigráfico lateral abrupto a lo largo de una característica o un posible cambio en las condiciones del suelo suprayacente. Una capa freática fluctuante, o cambios en la saturación de agua de las unidades enterradas ubicadas por encima de la capa freática, también pueden ralentizar las ondas de radar y distorsionar los reflejos subyacentes debido a variaciones de la velocidad. El modelo de la figura 7.3 y la tubería ondulada, que en realidad es horizontal (figura 7.4), demuestran uno de los muchos escollos con que se pueden encontrar los intérpretes de los datos de GPR cuando hay grandes cambios en la velocidad dentro del suelo sobre los materiales enterrados de interés. Estas variaciones de

velocidad que afectan la geometría de los reflejos se encuentran en casi todas las condiciones de campo, pero son mucho más pronunciadas cuando se mapean cuevas o túneles con grandes aberturas que no contienen nada más que aire, donde las ondas de radar viajan a la velocidad de la luz, creando una atracción muy distinta “pull-ups” (Conyers 2012a: 171).

Además de estos problemas, debido a la refracción y transmisión complejas dentro de las capas del subsuelo, la energía del radar puede no transmitirse en absoluto a través de algunos tipos de materiales debido a la atenuación total de la energía o la reflexión completa. Estas regiones “no iluminadas” que se encuentran debajo de estos tipos de materiales también se conocen como zonas de sombra (Goodman 1994). Son áreas donde no ocurren reflejos a pesar de que están presentes características que potencialmente podrían reflejar energía. A menudo, estos y muchos otros escenarios de reflexión y transmisión “no intuitivos” no serían reconocidos sin generar primero modelos sintéticos de las condiciones del mundo real y estudiar sus resultados.

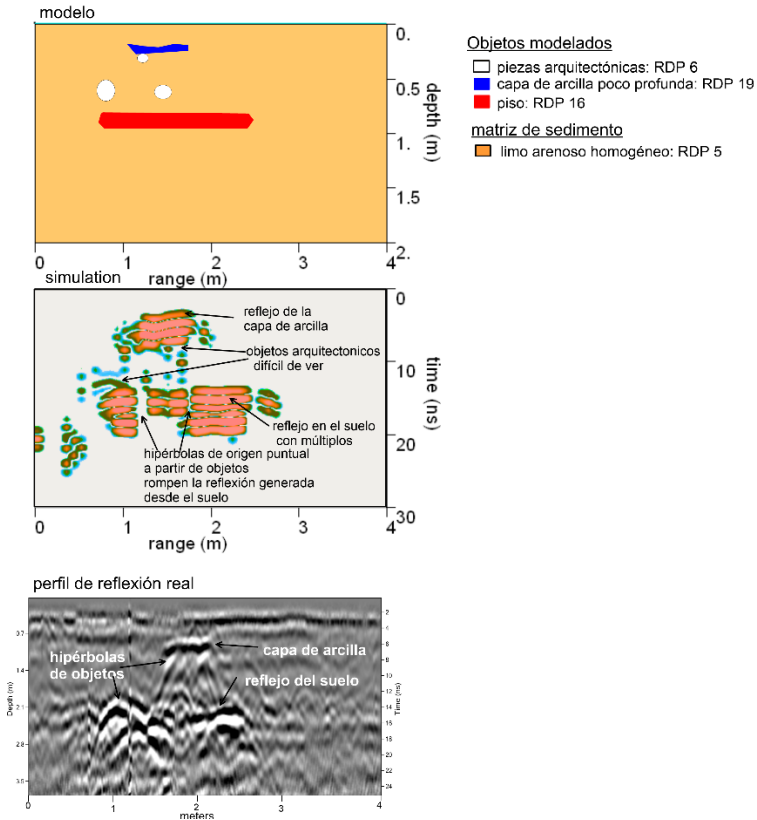
### **Modelos sintéticos comparados con perfiles GPR**

Se modeló un perfil de reflexión relativamente simple de un pozo de casa enterrada que se muestra en la figura 2.1 con un piso de arcilla, una hoguera en ese piso y una cisterna de almacenamiento con un fondo duro (figura 7.5). El modelo muestra que las paredes de la estructura no serían visibles ya que son verticales y no proporcionan una superficie de reflexión, o cualquier energía que las encuentre se reflejaría lejos de la antena de superficie. El piso y la hoguera en el piso proporcionaron reflejos distintos, pero los reflejos de la cisterna de almacenamiento (si se generaban) quedarían oscurecidos por la hipérbola de reflexión distinta generada desde la hoguera (figura 7.5). Se extrajo el núcleo de perforación de una cisterna real muy similar a este modelo (figura 2.1) para confirmar su presencia y también para evaluar las propiedades de su piso compactado y parcialmente cocinado, así como la cubierta de sedimentos que se utilizó en el modelo (Conyers y Cameron 1998). No se sabe si existe una cisterna de almacenamiento allí, ya que el modelo muestra que no sería visible en un perfil GPR. Se han descubierto muchos pisos similares con GPR en el suroeste de Estados Unidos, y muchos muestran solo este tipo de características de reflexión (Conyers 2012b).



**Figura 7.5:** Modelo realizado para una caseta de pozo con un piso reflectante y una cisterna de almacenamiento debajo de ese piso. La superficie habitable, el piso y el hogar producen reflejos muy distintos, pero si se generaron reflejos desde el piso de la cisterna, se ven abrumados por los demás reflejos. Las paredes de la casa no son visibles en el perfil sintético ya que no reflejan la energía de regreso a las antenas de superficie. Este modelo se parece mucho a un perfil de reflexión del piso de un pozo de casa que se muestra en la Figura 2.1.

Se recopiló un perfil de reflexión más complejo a lo largo de lo que parecía ser un piso enterrado, pero esta característica de reflexión era bastante compleja y había una serie de otras características de reflexión cuyo origen se desconocía (figura 7.6).



**Figura 7.6:** Se produjo un perfil de reflexión sintético para ayudar en la interpretación de un perfil muy complejo recopilado en un sitio romano en Ashkelon, Israel. Los parámetros de la computadora se cambiaron y variaron varias veces antes de que se produjera este modelo final basado en lo que se sabía sobre los materiales enterrados en este sitio. Un piso cubierto por objetos arquitectónicos y una capa de arcilla superficial es el mejor "ajuste" para lo que es visible en el perfil de reflexión real dentro de una matriz de limo arenoso.

Se sabía que este sitio en el Medio Oriente contenía características de pisos enterrados y escombros arquitectónicos que los cubrían. Se generó un modelo y se modificó varias veces para intentar replicar el perfil de reflexión real. El mejor ajuste entre el modelo y el perfil de reflexión real fue un piso reflectante (que se sabe que existe en esta área por excavaciones cercanas), con materiales arquitectónicos superpuestos y una capa de arcilla cercana a la superficie (también conocida por otras excavaciones). Las distorsiones en el suelo podrían explicarse por la interferencia de reflejos hiperbólicos de los objetos superpuestos y la capa

de arcilla poco profunda de baja velocidad. El uso de modelos de esta manera, como una forma de interpretar las características después de regresar del campo, proporciona un método útil para ganar confianza en las interpretaciones después de que se recopilan los datos. En este caso, algunas pocas excavaciones fueron cruciales para proporcionar información sobre qué tipo de características se esperarían en esta área, de modo que el modelo pudiera proporcionar imágenes de las características más probables en el suelo visibles con GPR.

### **INTERPRETACIÓN Y MAPEO DE MUCHOS PERFILES DE REFLEXIÓN EN UNA CUADRÍCULA**

Antes del desarrollo del mapeo de amplitudes, que se analiza a continuación, el único método para interpretar datos GPR era identificar visualmente y luego mapear reflejos de interés dentro de una cuadrícula que contiene muchos perfiles (Conyers 1995). Usando este método, primero es necesario determinar la génesis de los reflejos para diferenciar las características geológicas de las de interés arqueológico (Conyers 2012a: 47). En este proceso, las características de reflexión deben definirse primero, luego correlacionarse y comprenderse, quizás utilizando la geometría de las reflexiones con la ayuda de un análisis de modelos sintéticos bidimensionales, o ambos. Una vez diferenciadas y definidas las reflexiones en los perfiles, y comprendido el origen de las reflexiones importantes, es posible producir mapas manualmente. Antes de algunos de los programas de mapeo por computadora más sofisticados desarrollados en la década de 1990, el único método de interpretación posible era correlacionar las reflexiones de un perfil a otro dentro de una cuadrícula y entre cuadrículas en un área. En este método, si se realizan correcciones topográficas de velocidad y superficie, se pueden construir mapas de profundidad precisos que definan la topografía enterrada, o modificaciones antropogénicas a ese paisaje (Conyers 1995; Conyers y Goodman 1997: 137; Imai et al. 1987; Milligan y Atkin 1993).

Este tipo de interpretación manual de perfiles puede llevar mucho tiempo y siempre se basa en la experiencia interpretativa. El origen de las reflexiones y su importancia para las preguntas en cuestión también deben determinarse de antemano o se podría dedicar una gran cantidad de energía a identificar e interpretar reflexiones que pueden no responder a ninguna pregunta arqueológica. Por esta razón, el análisis de velocidad, la correlación de reflexiones con materiales conocidos en excavaciones y el modelado bidimensional (o todo lo anterior) deben realizarse antes de cualquier interpretación manual del perfil. Debido a la ubicuidad y confiabilidad de los métodos de procesamiento por computadora más



recientes que pueden tomar una gran cantidad de perfiles y producir imágenes muy rápidamente del subsuelo (Conyers 2004; Conyers 2012a), muchos usuarios de GPR ya no usan métodos de interpretación manual. En algunos casos, esto es apropiado, como cuando distintos objetos o capas de interés están enterrados en una matriz que tiene baja reflectividad y, por lo tanto, se destacan las características de reflexión. En la mayoría de los demás entornos, sigue siendo apropiado utilizar el mapeo manual perfil por perfil, con el fin de proporcionar interpretaciones precisas, así como otros métodos de producción de imágenes por computadora. En todos los casos, como mínimo, es necesario realizar alguna interpretación de perfiles individuales para confirmar o mejorar los métodos de mapeo por computadora. A menudo, el mapeo de amplitudes o los métodos de producción de isosuperficies promedian o mezclan las reflexiones, a veces descuidando o promediando las características sutiles y posiblemente importantes que son visibles solo en los perfiles (Conyers 2012a: 54). También es importante reconocer que áreas sin reflexión, o conteniendo solo reflejos sutiles, pueden estar definiendo materiales enterrados importantes de una determinada propiedad, y estos a menudo se ignoran en los programas típicos de “procesamiento masivo” (Conyers 2011, 2012b).

### **Ejemplo de reconstrucción de un paisaje enterrado a partir de interpretación manual de perfiles de reflexión**

En estudios estratigráficos complejos donde es necesario mapear horizontes enterrados específicos, el georadar puede ser una herramienta excelente, pero los conjuntos de datos pueden ser bastante difíciles de interpretar. Esto es particularmente cierto si hay varias capas que producen reflejos o esos reflejos tienen orientaciones complejas. En casos de este tipo, el único método para identificar y luego estudiar una capa es utilizar el método de interpretación manual perfil por perfil.

En 2010, durante la construcción de un parque industrial al este de Nazaré, Portugal, se descubrieron artefactos de piedra del Paleolítico Superior (Edad de Hielo tardía) en una capa de arena del Pleistoceno cerca de la base de un horizonte de suelo enterrado (figura 7.7). Las interpretaciones preliminares de los artefactos sugieren que se trataba de un campamento temporal o un área de trabajo donde se fabricaban herramientas de piedra (Conyers 2013). Los artefactos, que se encontraron dentro de la arena, justo encima de un contacto de erosión con el lecho de roca subyacente de la era jurásica. La superficie del lecho rocoso jurásico que se puede identificar hoy en afloramientos cercanos era la superficie que apenas comenzaba a estar cubierta por arena arrastrada por el viento cuando estos cazadores de la Edad de Hielo tardía ocupaban y usaban esta

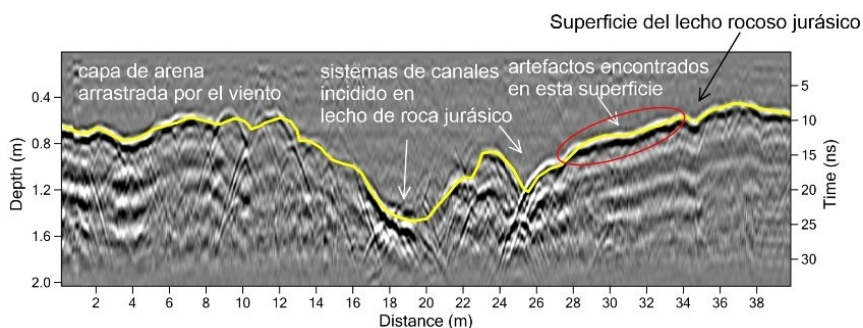
área. Fue esta superficie la que fue de interés para el mapeo por georadar, ya que un mapa topográfico construido sobre ella ilustraría los accidentes geográficos en tres dimensiones que existían en el momento en que la gente vivía en esta área.



**Figura 7.7:** Una superficie de lecho rocoso de la edad jurásica es visible en un afloramiento en la costa de Portugal, cubierta por dunas de arena. Se encontraron artefactos del Pleistoceno tardío justo por encima del horizonte del lecho rocoso, a unos 40 metros al este de esta imagen. La superficie del lecho de roca basal era la antigua superficie viviente en la que estas personas de la Edad de Hielo tardía fabricaban y afilaban herramientas, y un mapeo tridimensional de la misma indicaría cómo era el paisaje antiguo antes de ser cubierto y preservado por dunas de arena.

Los arqueólogos, geógrafos y geólogos han comenzado recientemente a pensar más en reconocer paisajes pasados, ubicar a las personas en entornos antiguos e intentar comprender las complejas relaciones entre las características físicas de un paisaje y la percepción y el uso que las personas hacen de ellos (Stern 2008). Ubicar sitios arqueológicos dentro de un contexto estratigráfico y luego extraer información del sitio a partir de un análisis del ambiente geológico, entorno ambiental y evidencia arqueológica puede ser difícil, pero el resultado puede ser gratificante como análisis holístico del comportamiento de los pueblos antiguos a una amplia escala. Se han utilizado otros métodos geofísicos para estudios de este tipo (Campana y Piro 2009; Conyers et al. 2008; Conyers 2008; Kvamme 2003;), pero el georadar tiene una capacidad única para mapear entornos antiguos

enterrados en tres dimensiones. El uso de la geofísica en el análisis del paisaje es una innovación relativamente reciente, pero que ha sido acogida con entusiasmo por parte de la comunidad arqueológica (Bruno y Thomas, 2011; Campana y Piro 2009).

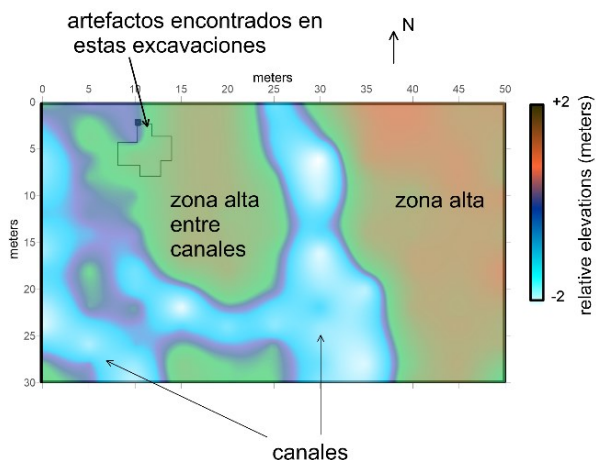


**Figura 7.8:** Un perfil de reflexión de 400 MHz cerca de la imagen que se muestra en la Figura 7.7 muestra dos canales que incidieron en la superficie del lecho rocoso jurásico, cubiertos por arena no reflectante arrastrada por el viento.

Se recopilaron varios perfiles de reflexiones de georadar a lo largo de afloramientos cercanos para determinar si la energía del radar penetra lo suficientemente profundo como para definir tanto la unidad de suelo del Pleistoceno tardío como la superficie subyacente del lecho de roca jurásico, en la cual se encuentra la unidad de arena que contiene los artefactos (figura 7.8). Se encontró que las capas del lecho rocoso jurásico creaban reflejos de gran amplitud, que se correlacionaban directamente con la profundidad medida en los afloramientos. La velocidad de la energía del radar se calculó utilizando un ajuste de hipérbola, y se utilizó una permitividad dieléctrica relativa de aproximadamente 6 correspondiente a una velocidad de viaje de 12 cm / ns para convertir los tiempos de viaje medidos en perfiles de reflexión a una profundidad aproximada (6 cm / ns de tiempo de viaje de dos vías). Las antenas de 270 MHz transmitían energía a aproximadamente 6 metros en este paquete de suelo y sedimento eléctricamente resistivo.

Las antenas de 400 y 270 MHz se utilizaron para recopilar perfiles que podrían correlacionarse directamente con los afloramientos del sedimento (figura 7.7) mediante la recopilación de datos directamente sobre los afloramientos. Luego se recopiló una cuadrícula de datos de 50x30 metros alrededor de las excavaciones anteriores que descubrieron los artefactos, que consta de 22 perfiles de reflexión espaciados a 5 metros de distancia (figura 7.9). Se utilizaron antenas de 270 y 400 MHz, las

cuales proporcionaron una resolución de datos y una profundidad de penetración comparables. Los perfiles de 270 MHz se utilizaron para interpretar manualmente la superficie jurásica, ya que se vieron menos afectados por pequeñas irregularidades en la superficie del suelo y, por lo tanto, se obtuvo un buen acoplamiento de energía en todas las trazas recolectadas. La profundidad de la superficie jurásica se midió luego cada 50 cm a lo largo de todos los perfiles y todos esos puntos de profundidad con ubicaciones x, y individuales importadas a un programa de mapeo.



**Figura 7.9:** Un mapa de la antigua topografía de la superficie del lecho rocoso jurásico en el momento en que la gente descartó los artefactos encontrados en las excavaciones dentro de la cuadrícula. La superficie jurásica fue mapeada interpretando todos los perfiles manualmente en la cuadrícula y luego produciendo un mapa topográfico generado por computadora de la antigua superficie viviente. Los artefactos se encontraron al noroeste de un área topográfica alta entre dos pequeños canales de arroyos. Esta era un área protegida cerca del agua, invisible para los animales que habrían estado cazando en el valle del río más grande, justo al este de esta cuadrícula de GPR.

El mapa resultante (figura 7.9) muestra que la superficie de interés del lecho rocoso jurásico se inclina generalmente hacia el este, pero las características más interesantes que se hicieron visibles son dos canales que bisecan la cuadrícula. Una amplia zona baja entre los canales entre los antiguos y ahora enterrados barrancos es el sitio que la gente de la Edad de Hielo había elegido para acampar y fabricar herramientas. Esta zona alta de lecho rocoso quizás actuó como una barrera visual que ocultaba a un grupo de cazadores en la llanura aluvial del este.

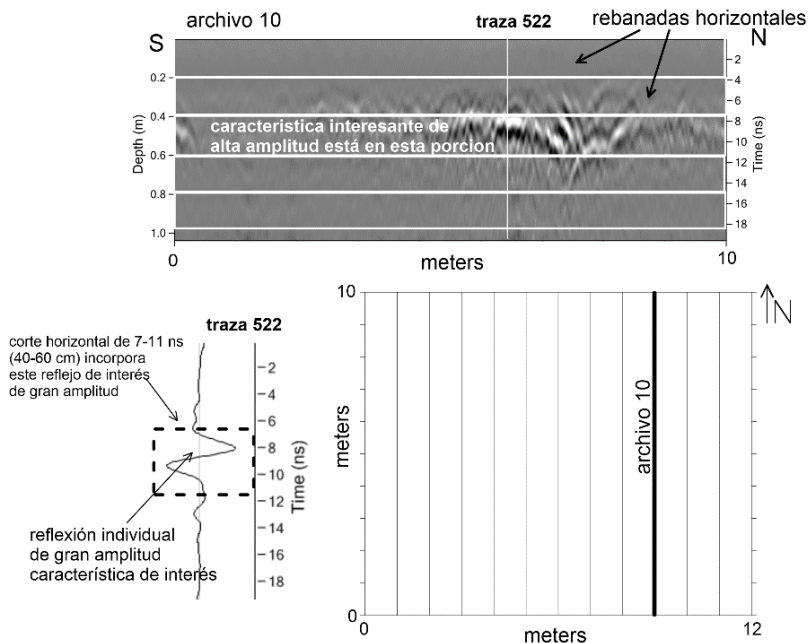
El mapeo de georadar en esta área coloca los artefactos en un contexto geográfico tridimensional y un mapeo de la paleo-topografía del sitio ahora puede permitirnos entender por qué estas personas eligieron este sitio. Se planean trabajos adicionales de georadar hacia el este para seguir estos canales enterrados, que deben conectarse con el río principal en el valle a unos 700 metros de distancia. Cuando se construye un mapa tridimensional más completo de esta área, se pueden explorar muchos más sitios en entornos similares, y quizás se puedan definir otros entornos antiguos. El uso de perfiles de georadar interpretados manualmente y luego mapeados en tres dimensiones, junto con la arqueología más estándar, puede reconstruir entornos antiguos que están totalmente enterrados y no están disponibles para su estudio de ninguna otra manera.

### **ANÁLISIS DE AMPLITUD EN REBANADAS DE MAPA (EN PLANTA)**

El objetivo principal de la mayoría de los estudios de georadar en arqueología es identificar el tamaño, la forma, la profundidad y la ubicación de los restos culturales enterrados. Solo cuando se hace esto se pueden planificar las excavaciones e incorporar la interpretación de imágenes geofísicas puede producir nueva información sobre el pasado (Conyers 2010; Conyers y Leckebusch 2010). La forma más sencilla de lograr el mapeo con georadar es identificando reflejos importantes, correlacionándolos dentro de perfiles de reflexión bidimensionales como se discutió anteriormente, y luego colocando su ubicación en un mapa base. Este método de interpretación manual puede ser muy preciso, pero este proceso puede llevar bastante tiempo y, en ocasiones, ser impreciso, ya que es un proceso muy subjetivo al elegir reflejos para el mapeo, a menos que se conozca de antemano una buena estratigrafía (figura 7.7).

Un tipo más sofisticado de manipulación de datos de georadar es el análisis de mapa de cortes de amplitud que crea mapas de diferencias de amplitud de onda reflejada tanto espacialmente como con profundidad en una cuadrícula (Conyers 2012a: 26; Conyers y Goodman 1997; Drahor et al. 2011; Goodman 1996; Goodman et al. 1998). El resultado del mapeo de amplitud puede ser una serie de mapas y otras imágenes que ilustran en tres dimensiones la ubicación de las anomalías de reflexión, derivadas de un análisis por computadora de muchos perfiles bidimensionales ubicados en una cuadrícula. En este proceso de mapeo de amplitud, lo que se está obteniendo son imágenes de las amplitudes de las ondas reflejadas (y su profundidad registrada en el suelo), las cuales son mediciones indirectas de las diferencias en los materiales en las interfaces enterradas que reflejan la energía del radar. Este método de procesamiento de datos

solo puede realizarse mediante una computadora que utilice datos de reflexión de georadar que se almacenan digitalmente. Es mejor utilizar perfiles que se recopilaron con pequeños espaciamentos en transectos dentro de cuadrículas (Neal 2004; Neubauer et al. 2002; Novo et al. 2012).



**Figura 7.10:** Cómo se construyen los mapas de amplitud. Todos los trazos de reflexión se muestrean en todos los perfiles de reflexión en una cuadrícula para obtener amplitudes para mapear en cortes horizontales. En el archivo 10, la característica de reflexión de interés consiste en muchas reflexiones complicadas entre aproximadamente 7 y 11 nanosegundos (40-60 cm de profundidad). Esas reflexiones (ilustradas en la traza 522 del archivo 10) consisten en reflexiones positivas y negativas, que generalmente se muestrean utilizando un software que toma el cuadrado de esos valores de amplitud para producir valores positivos, que luego se colocan en el espacio. En este ejemplo, se volvieron a muestrear 13 perfiles separados por un metro en cinco cortes de 20 cm de espesor dentro de una cuadrícula de 10 x 12 metros.

Los datos de reflexión sin procesar, recopilados en la mayoría de los estudios de georadar no son más que una colección de muchos cientos de miles de trazos de reflexión individuales a lo largo de transectos bidimensionales dentro de una cuadrícula. Las cuadrículas suelen tener forma rectilínea, pero siempre que se recopilen buenos datos espaciales

para todos los perfiles (con sistemas GPS u otros métodos de topografía, fig XX picture GPR with GPS), los reflejos aún se pueden colocar en el espacio y estudiar espacialmente en imágenes de amplitud (Forte y Pipan 2008; Trinks et al.2010). En este proceso, todas las trazas de todos los datos de reflexión reciben una ubicación en el espacio y también se mide su profundidad en el suelo. Cada trazo de reflexión contiene ondas que varían en amplitud según la intensidad de la reflexión de energía que se produjo en las interfaces enterradas (figura 7.10).

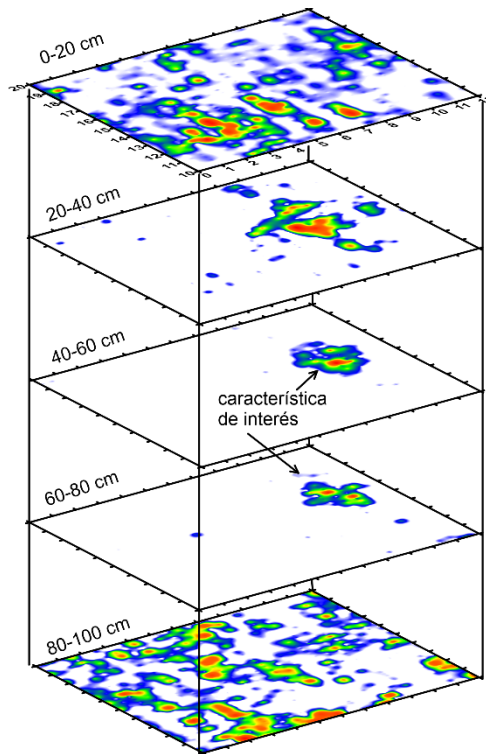
Cuando estas trazas se delinearán secuencialmente en perfiles bidimensionales estándar, las amplitudes específicas dentro de las ondas individuales que contienen información de reflexión importante pueden ser difíciles de visualizar utilizando la interpretación manual, y su mapeo en tres dimensiones puede ser arduo. Además, en el pasado, cuando los perfiles de reflexión de georadar sin procesar no tenían reflejos discernibles o anomalías reconocibles de ningún tipo, el levantamiento generalmente se declaraba fallido y se realizaba poca o ninguna interpretación adicional. Solo con el advenimiento de computadoras más poderosas y programas de software sofisticados a mediados de la década de 1990 que podían manipular grandes conjuntos de datos digitales, se obtuvo información importante del subsuelo en forma de cambios de amplitud a varias profundidades dentro de una cuadrícula extraída de decenas o, a veces, cientos de perfiles individuales.

Hoy en día, con una recopilación muy rápida y con sistemas GPS conectados a sistemas multicanal, puede haber millones de reflejos en un área de estudio, que aún se pueden analizar de esta manera (Gaffney et al. 2012; Trinks et al. 2010). Este método de análisis de amplitud puede producir paquetes tridimensionales de ondas reflejadas re-muestreadas, que se pueden analizar en masa, produciendo rápidamente mapas e imágenes importantes de altas amplitudes (o en ocasiones bajas amplitudes) que se generaron a partir de características arqueológicas, geotécnicas enterradas o geológicas de interés (figura 7.10).

Un análisis de la distribución espacial de las amplitudes de las ondas reflejadas es importante porque es un indicador de los cambios del subsuelo en la litología u otras propiedades físicas de los materiales enterrados. Cuanto mayor es la amplitud de una onda reflejada, mayor es la diferencia en las propiedades físicas y químicas de los materiales en una interfaz enterrada que refleja la energía del radar. Las áreas de reflejos de baja amplitud generalmente indican material de matriz uniforme o suelos, mientras que las de mayor amplitud denotan áreas de alto contraste subsuperficial, como rasgos arqueológicos enterrados, vacíos o cambios estratigráficos importantes. Para que se interpreten correctamente, las diferencias de amplitud generalmente se analizan en cortes horizontales

que examinan solo los cambios dentro de capas específicas en el suelo (figura 7.10).

Cada segmento de amplitud de un cierto espesor es comparable a un nivel de excavación arqueológica arbitraria, excepto que al usar datos de georadar, cada nivel consiste en una representación espacial de amplitudes de onda reflejadas en lugar de sedimentos, suelo o cambios de características y artefactos asociados (figura de cortes inclinados). En la figura 7.11, una capa de conchas en el medio contrasta con la arena fluvial y el limo, produciendo amplitudes más altas, que son fácilmente evidentes en los mapas de cortes de amplitud. En este ejemplo de Tennessee, la característica fue excavada y la superficie mapeada por medio de georadar y correspondía muy bien con la capa de conchas (figura 7.12).

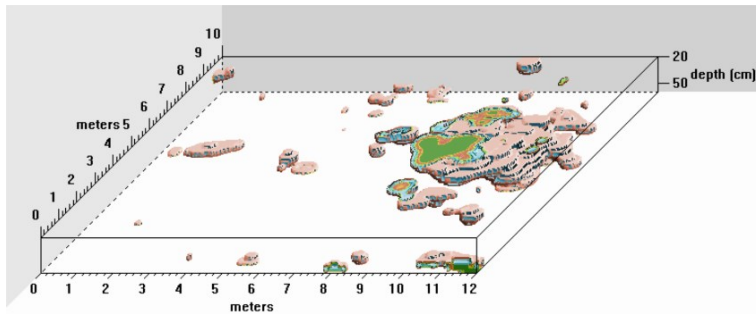


**Figura 7.11:** Las amplitudes de reflexión re-muestreadas de los perfiles en la cuadrícula ilustrada en la Figura 7.10 se trazan luego en mapas de cortes. Estos mapas de datos recopilados a lo largo del río Tennessee muestran la extensa área de la característica de reflexión en los cortes de 40-60 y 60-80 cm.





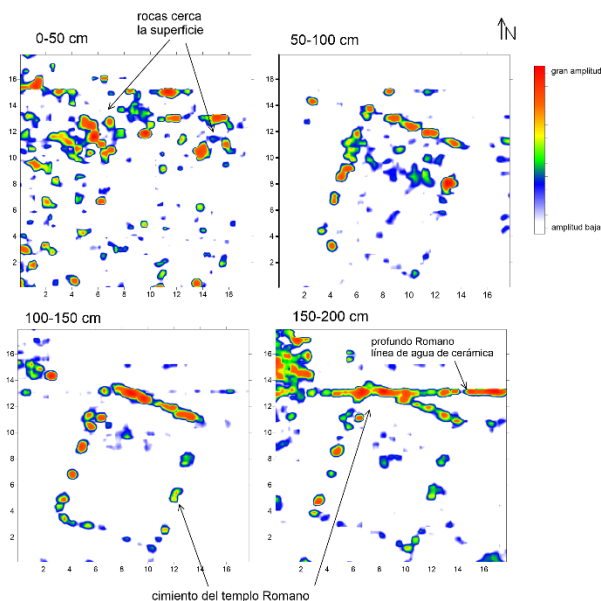
**Figura 7.12:** La parte superior de la característica de reflexión de interés que se muestra en la Figura 7.11 se excavó para mostrar que la característica de interés visible en los mapas de amplitud consiste en un depósito de muchas conchas de gasterópodos de agua dulce en un basurero prehistórico.



**Figura 7.13:** Cuando todas las reflexiones de alta amplitud en todos los perfiles dentro de la cuadrícula que se muestra en la Figura 7.11 se renderizan en una imagen de isosuperficie en el volumen de 20 a 50 cm de profundidad, el depósito de la cáscara se puede representar en tres dimensiones. Las imágenes de este tipo se pueden sombrear y colorear artificialmente para representar mejor los materiales enterrados de interés.

Las amplitudes más altas en esta cuadrícula, después de que se volvieron a muestrear las ondas para producir los mapas de cortes, se importaron a un programa de imágenes tridimensionales para producir isosuperficies (figura 7.13). Estas imágenes se pueden rotar, sombrear y variar para mostrar ciertos valores de amplitud, produciendo imágenes que pueden ser útiles para comprender cómo se ven las características en el suelo (Leucci 2006; Nuzzo et al. 2009).

En sitios donde los contrastes en los materiales en el suelo son más distintos, como con la arquitectura de piedra enterrada y la arena arrastrada por el viento, los contrastes en la velocidad del radar son aún más distintos, lo que puede producir mapas de amplitud aún más distintos (figura 7.14). Esta característica rectangular, de Petra, en Jordania (Conyers et al. 2002) tenía excelentes contrastes de velocidad en las interfaces entre la piedra arquitectónica y la arena circundante, produciendo reflejos de muy alta amplitud en sus interfaces, que se podían interpretar fácilmente.



**Figura 7.14:** Mapas de cortes de amplitud de los cimientos de un templo romano en una cuadrícula dentro del jardín del mercado inferior en Petra, Jordania. Cada rebanada tiene 50 cm de grosor, cuando la velocidad medida se usa para convertir el tiempo de viaje del radar en profundidad. En el corte superior solo son visibles las piedras cercanas a la superficie, pero en los cortes más profundos se ve una base de construcción de piedra distintiva, con una línea de agua de cerámica de la época romana debajo.

Cuando se utilizan mapas de amplitud muy distintos, como los que se muestran en las figuras 7.11 y 7.14, como ejemplo de lo que puede hacer el georadar, siempre existe la esperanza de que el procesamiento de datos y la producción de imágenes similares en sitios menos definitivos produzcan resultados similares. A menudo, este no es el caso. Aunque el corte de amplitud producirá mapas excelentes en algunos casos, o mapas

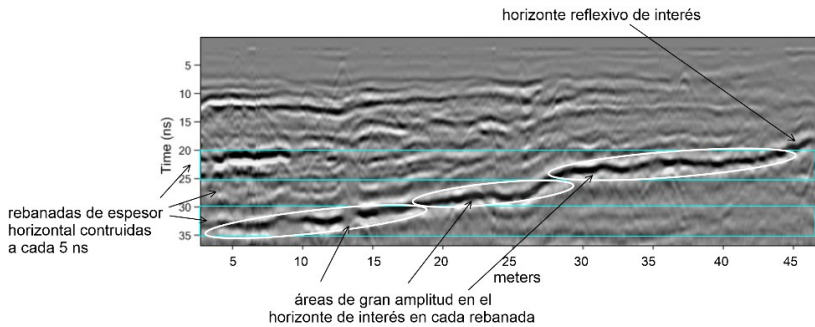
marginalmente utilizables en otros, usar solo esta técnica para la interpretación, generalmente no es suficiente. Siempre es importante que se dedique algo de tiempo a un análisis de los perfiles de reflexión que se utilizaron para producir estas imágenes (Conyers 2012a: 28).

Es un error producir solo mapas de corte genéricos que todos los programas de software pueden ahora producir muy rápidamente, con la esperanza de que lo que uno está buscando aparezca inmediatamente en las imágenes resultantes. Esto es raramente el caso. Los mapas de corte no se pueden hacer automáticamente, como si se hubieran revelado fotografías, sino que deben construirse cuidadosamente y ajustarse para varios parámetros del sitio, como la profundidad de interés, la dimensión y la orientación de las características enterradas y la naturaleza de la matriz circundante. Por lo tanto, su producción requiere un conocimiento previo de las condiciones del sitio y luego un análisis detallado de los perfiles de reflexión individuales que se han utilizado para producir los mapas, todos los cuales, con suerte, se han procesado y filtrado de alguna manera con anticipación para mejorar la calidad de los datos de reflexión. Los datos de reflexión sin procesar tampoco deben entregarse nunca a alguien que no esté familiarizado con su colección para que genere los mapas en rebanadas, ya que tendrá un conocimiento limitado sobre las condiciones del sitio y, por lo tanto, es posible que no pueda determinar los parámetros de corte correctos o interpretar los resultados.

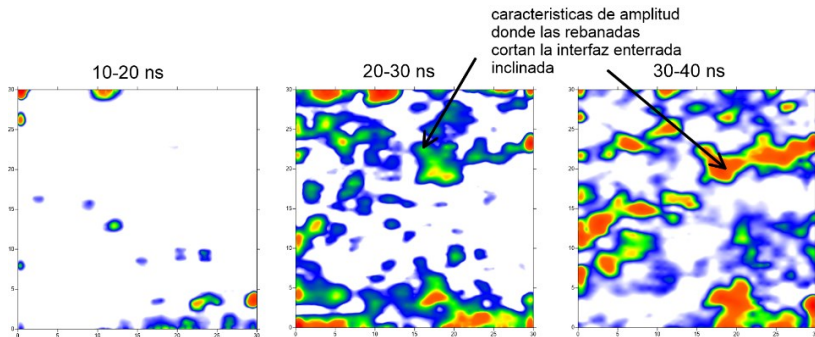
La forma más poderosa de utilizar mapas de cortes de amplitud es ver e interpretar primero los perfiles de reflexión individuales en dos dimensiones para "tener una idea" de los tipos de reflejos presentes y su profundidad en el suelo. En este momento se puede realizar un análisis de velocidad mediante el ajuste de hipérbola, si aún no se conocen las velocidades, de modo que se pueda determinar la profundidad de las reflexiones visibles en el suelo. También podría ser necesario algún procesamiento de los perfiles de reflexión en este punto para eliminar el ruido, ajustar la topografía y usar el filtro de frecuencias (Boniger y Tronicke 2010; Conyers 2012a: 40; Tamba 2012). A continuación, se pueden construir mapas en rebanadas con el número y el grosor necesarios para producir mapas de las reflexiones que se generaron a partir de características enterradas o capas estratigráficas de interés.

Es importante que los cortes programados para muestrear una gran área tridimensional de terreno no crucen las interfaces enterradas (si es posible), ya que los mapas de amplitud resultantes generarán características de amplitud de esta interfaz en diferentes cortes de profundidad a medida que la superficie enterrada atraviesa diferentes rodajas (figura 7.15).

Cuando se encuentra una interfaz de alta amplitud a diferentes profundidades y luego se corta horizontalmente, se pueden producir características de reflexión que casi no tienen sentido, ya que son solo un horizonte que se encuentra en diferentes niveles de profundidad (figura 7.16). De la misma manera, si una característica de interés más pequeña se encuentra en diferentes secciones elegidas para el mapeo, se encontrará en diferentes mapas de diferentes profundidades (figura 7.11).



**Figura 7.15:** Las rebanadas se construyen generalmente paralelas a la superficie del suelo, en este caso cada 25 cm. Cuando esos cortes cruzan una reflexión de alta amplitud generada a partir de un horizonte de interés enterrado inclinado, los reflejos serán muestras en diferentes cortes y pueden complicar la interpretación cuando se muestran en la vista de mapa.



**Figura 7.16:** La reflexión de alta amplitud que se muestra en el perfil en la Figura 7.15, cuando se muestrearon en dos cortes de 10 nanosegundos de espesor de todos los perfiles en la cuadrícula, ilustró una característica de reflexión lineal a través de la cuadrícula que no es una característica de mucho interés ya que es solo una función de dónde esa interfaz se encuentra en cada corte horizontal. Esto muestra el problema potencial de generar cortes horizontales a través de capas que se sumergen en una cuadrícula.

No hay nada de malo en ver las características de esta manera en diferentes cortes de profundidad, ya que es similar a cómo se exponen los materiales en diferentes niveles en las excavaciones estándar. Los mapas de amplitud de georadar solo necesitan anotarse para que se identifique una característica visible en diferentes cortes.

Para fines de interpretación, una vez que se construyen mapas de amplitud, como los de la figura 7.14, para muchos cortes horizontales o subhorizontales en el suelo, los perfiles de reflexión se pueden volver a ver y ambos se pueden reinterpretar para definir con mayor precisión el origen de la amplitud. Las características como imágenes horizontales y verticales se pueden analizar simultáneamente. En este proceso, la orientación, el grosor y las amplitudes relativas de las reflexiones se pueden interpretar fácilmente en tres dimensiones utilizando tanto el mapeo de cortes como la interpretación de perfiles bidimensionales.

Los cortes de amplitud generalmente se hacen en intervalos de tiempo iguales, y cada corte representa un grosor aproximado de material enterrado en el suelo. Siempre se construyen en tiempos de viaje de radar (y por lo tanto son segmentos de tiempo), que luego se pueden convertir a profundidad (segmentos de profundidad) si se ha realizado un análisis de velocidad. Por lo tanto, ver cambios de amplitud en una serie de segmentos de tiempo horizontales en el suelo es análogo a estudiar cambios geológicos y arqueológicos de capas de igual profundidad (Conyers et al.2002; Goodman et al. 1995; Malagodi et al.1996; Milligan y Atkin 1993). Cuando las características de amplitud en cada corte se correlacionan con características arqueológicas conocidas y cambios estratigráficos que podrían estar disponibles para su estudio en excavaciones cercanas, se pueden construir mapas tridimensionales extremadamente precisos de un sitio, desglosados en niveles. En este proceso, los datos arqueológicos estándar se pueden integrar con el mapeo de características tridimensionales, que se puede utilizar para comprender a las personas que produjeron estas características y el entorno en el que vivían (Conyers 2010a; Conyers y Leckebusch 2010).

Una cuadrícula de datos de reflexión de georadar puede cortarse muy finamente y verse como un video, con cortes proyectados secuencialmente en una pantalla de computadora a medida que las capas se “descubren” desde la superficie del suelo hasta cierta profundidad en el suelo (Conyers et al. 2002; Grasmueck et al. al.2004). La ubicación precisa de todos los reflejos en el suelo, si se procesan en muchos cortes secuenciales, también se puede analizar como un "cubo" tridimensional de datos y ciertas amplitudes se pueden representar para producir imágenes realistas del subsuelo como objetos tridimensionales llamados isosuperficies (Conyers et al.2002; Goodman et al.1998; Heinz y Aigner 2003; Leckebusch 2003;

Leckebusch y Peikert 2001), cuya producción se analizará con más detalle más adelante.

Los mapas de anomalías de amplitud no necesitan construirse horizontalmente o incluso en intervalos de tiempo iguales. Pueden variar en grosor y orientación, dependiendo de las preguntas arqueológicas y geológicas que se planteen (Conyers 2010). La topografía de la superficie y la orientación subsuperficial de las características y la estratigrafía de un sitio a veces pueden requerir la construcción de cortes que no son uniformes en espesor ni horizontales. También se puede interpretar que siguen un horizonte distinto (Conyers y Goodman 1997). Esto se puede hacer fácilmente en la computadora cuando los datos de reflexión están en formato digital.

Para calcular cortes de amplitud horizontal, los programas de computadora deben comparar las variaciones de amplitud dentro de las trazas de reflexión que se registraron dentro de una ventana de tiempo definida de todos los perfiles en una cuadrícula (Conyers y Goodman 1997: 153). Por lo general, los programas de computadora que realizan esta tarea pedirán la cantidad de correlación espacial e interpolación deseada para cada cuadrícula, que consta de muchos perfiles de reflexión. Este proceso interpola las amplitudes de las ondas reflejadas a lo largo de los perfiles y entre ellos, produciendo una cuadrícula de datos para cada segmento que luego se puede mapear. Cuando se hace esto, las amplitudes positivas y negativas de las reflexiones se comparan con la media dentro de cada rebanada.

Por lo general, no se hace ninguna diferenciación entre amplitudes positivas o negativas, solo la magnitud de la desviación de amplitud del promedio. Las variaciones de baja amplitud dentro de cualquier corte denotan poca reflexión subsuperficial en ese nivel y ubicación y, por lo tanto, indican la presencia de material bastante homogéneo (figura 7.14). Las amplitudes altas indican la presencia de discontinuidades significativas en el subsuelo, en muchos casos características enterradas, ya que se producen por reflexión en las interfaces entre tipos de materiales altamente contrastantes. A los grados de variación de amplitud en cada corte se les asignan colores arbitrarios o tonos de gris a lo largo de una escala ordinal, que se puede variar para mejorar las áreas de amplitud más alta, media o baja en cada corte del suelo. Por lo general, no hay unidades de amplitud específicas asignadas a estos cambios de color o tono, ya que las amplitudes "naturales" generalmente se preajustan antes de la recopilación o se modifican después de que los datos se recopilan mediante la obtención de rango u otros pasos de procesamiento de datos. Las amplitudes se pueden ajustar, de forma similar al rango de ganancia en los perfiles de reflexión, después de que se elaboran los mapas

alterando el rango de valores de amplitud reflejada a los que se les asignan diferentes colores o tonos de gris en cada mapa de corte. Esto mejorará efectivamente algunos valores de amplitud, mientras que suprime otros, para hacer que algunas características sean más o menos visibles para el ojo humano.

Cuando se recopilan muchas cuadrículas adyacentes entre sí, puede haber problemas con la "coincidencia de bordes" para producir mapas de amplitud a gran escala. Las variaciones en las amplitudes de las ondas reflejadas entre las redes pueden ser causadas por diferentes procedimientos de recolección y cambios en el equipo, quizás debido a cambios en la energía de la batería, lo que produce discontinuidades en los bordes y las bandas (Ernenwein y Kvamme 2008). Hay varios procedimientos estadísticos y de fusión de cuadrículas posibles para superar este problema.

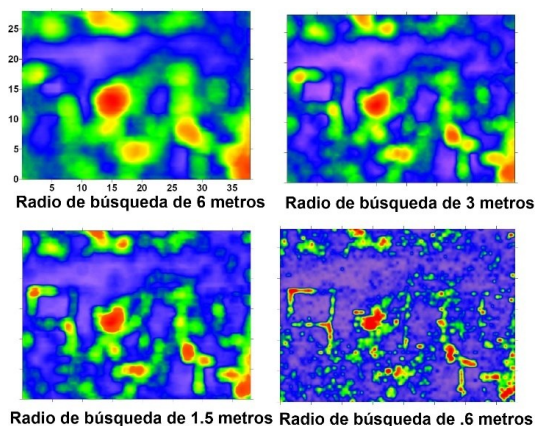
También se ha sugerido un método que sintetizará las amplitudes de las reflexiones en cortes secuenciales y los fusionará en un solo mapa compuesto (Goodman et al. 2006; Goodman y Piro 2013). En este proceso, el software de corte se puede programar para agregar solo las reflexiones de mayor amplitud desde varias profundidades y luego superponer solo las amplitudes programadas a lo largo de una cuadrícula tridimensional. En algunas áreas donde hay muchas reflexiones complejas que producen mapas de amplitud muy "saturados", este proceso puede potencialmente resaltar solo algunas características mientras filtran otras (Goodman 2009).

Debe recordarse que debido a que la mayoría de las capas subsuperficiales no son perfectamente horizontales y la mayoría de las unidades estratigráficas varían en espesor lateralmente, algunos segmentos de tiempo horizontales pueden no estar comparando amplitudes de reflexión dentro del mismo suelo o unidades de sedimento en el suelo (Beres et al. 1999; Conyers 2012a: 51). Por ejemplo, si los cortes de amplitud programados cruzan los límites estratigráficos de las unidades que buzan en el suelo, se registrará una anomalía de amplitud donde el corte cruza esos límites estratigráficos (figura 7.15). El mapa de amplitud resultante derivado de esta geometría de corte estaría ilustrando características del subsuelo que son el producto tanto del método de corte como de los cambios geológicos que ocurren a través de los cortes, y no la presencia de los tipos de características arqueológicas enterradas que son el objetivo (placa 4). Cuando esto ocurre, los mapas de cortes de amplitud pueden ser potencialmente muy engañosos y no ilustran cambios geológicos o arqueológicos significativos. Algunos intérpretes han intentado caracterizar las formas y tamaños de las "anomalías" producidas

por rebanadas que cortan capas geológicas de diferentes tipos, con poco éxito (Beres et al. 1999).

Las complicaciones topográficas y transversales a menudo se pueden ajustar si se conoce la orientación y el grosor de las capas del subsuelo, lo que generalmente se puede determinar interpretando los perfiles de reflexión procesados antes de generar los cortes. El problema de corte ilustrado en las figuras 7.14 y 7.15, donde los cortes de amplitud cruzan los límites estratigráficos, demuestra cómo múltiples técnicas de interpretación, incluido el mapeo de cortes y la interpretación de perfiles, deben emplearse siempre de manera iterativa.

El espaciamiento de los perfiles y la cantidad de interpolación entre los perfiles durante la construcción de los mapas de cortes a menudo determinarán la resolución de las amplitudes de reflexión resultantes cuando se tracen en forma de mapa (Neubauer et al. 2002; Novo et al. 2012). Si se utiliza demasiada interpolación en un área de búsqueda grande, los mapas de amplitud tenderán a volverse borrosos y la definición de características disminuirá (figura 7.17). Por el contrario, un radio de búsqueda muy pequeño y, por lo tanto, poca interpolación espacial, a veces puede crear un mapa de amplitud muy "ruidoso" o "saturado", y las características pueden permanecer ocultas en el desorden, si los reflejos derivados de las características de interés no son lo suficientemente distintos de los generados por la matriz circundante.



**Figura 7.17:** Las diferencias de interpolación en los programas de corte de amplitud pueden marcar la diferencia entre poder visualizar características enterradas o no. Si se utiliza un radio de búsqueda demasiado grande (6 metros), poco es visible en este corte que cruza las paredes verticales que se conservan en la profundidad de 75-100 cm en el sitio de Fort Garland en Colorado, EE. UU. Un radio de búsqueda de 0,6 metros permite que las paredes enterradas sean claramente visibles.



También se debe pensar mucho en el procesamiento de datos de los perfiles de reflexión individuales antes de cortarlos. Para producir un mapa de amplitud muy claro y preciso, las hipérbolas de reflexión deben migrarse y, a veces, los datos de reflexión deben filtrarse antes del paso de corte de amplitud. Luego, se deben elegir los parámetros de corte, incluido el grosor de corte, la orientación, el radio de interpolación y el método de cuadrícula. Algunos parámetros de corte pueden generar mapas muy precisos y utilizables, mientras que otros generan resultados que pueden ser totalmente incomprensibles, según la calidad de los datos, la orientación de las características en el suelo y la complejidad estratigráfica. Con experiencia y experimentación, el número infinito de parámetros potenciales de procesamiento se puede reducir a unos pocos que se ha encontrado que funcionan en ciertas condiciones.

A menudo, se deben intentar y estudiar muchos métodos de corte diferentes antes de obtener un mapa utilizable. Además, cada cuadrícula de datos de georadar recopilados durante diferentes proyectos de campo, cada uno con diferentes equipos y configuraciones de adquisición, siempre necesitará diferentes tipos de análisis de amplitud utilizando diferentes parámetros de corte. Esto tiende a hacer que la recopilación, el procesamiento y la interpretación de datos de georadar sean complicados, pero también emocionantes y gratificantes, ya que cada uno puede producir resultados diferentes según las técnicas de procesamiento. Cuando esto ocurre, es importante determinar si los mapas están ilustrando lo que realmente está presente en el suelo, o si uno está creando anomalías que son una función únicamente de las técnicas de corte utilizadas. Esto solo se puede hacer retrocediendo y viendo los perfiles de reflexión individuales y correlacionando visualmente las reflexiones visibles allí con las trazadas en los mapas de amplitud.

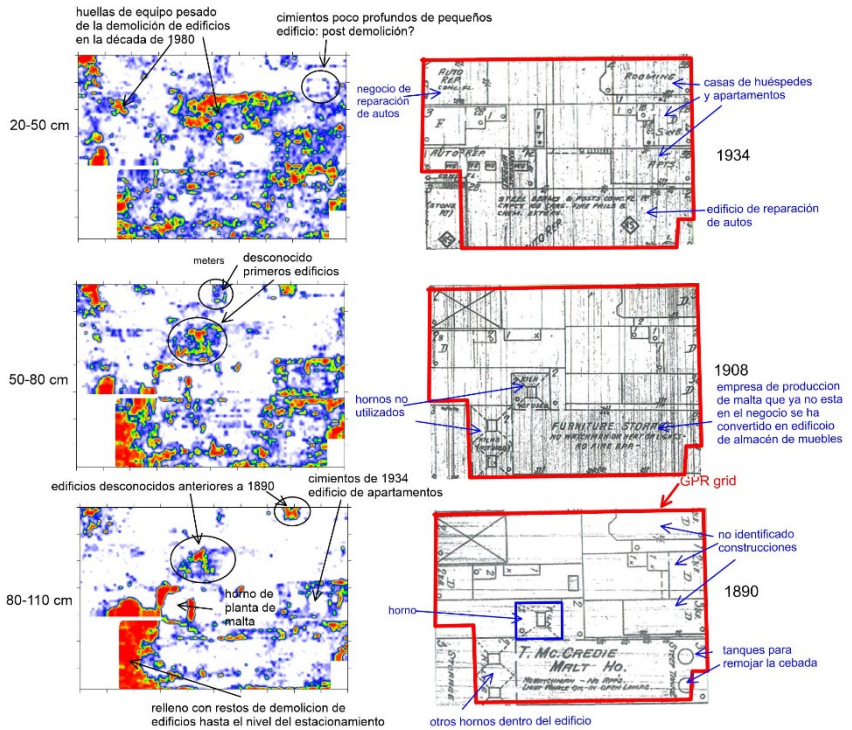
### **Mapas de cortes de amplitud en terreno plano**

Cuando la superficie del suelo y las unidades subyacentes son horizontales, o casi, los segmentos de tiempo de amplitud que se construyen paralelos a la superficie del suelo generalmente seguirán capas estratigráficas y de suelo, por lo tanto, no atravesarán los límites del lecho. Solo cuando los cortes cruzan los planos de estratificación se producen regiones de amplitud anómala, como se ilustra en la figura 7.16. Siempre que las unidades de capas sean paralelas y no existan relaciones transversales entre las unidades, como los canales de corte y relleno o las características antropogénicas intrusivas, cada corte horizontal producirá imágenes de las características que son relativamente más antiguas con profundidad. Los cortes de tiempo de amplitud pueden ser representativos

de la edad relativa, ya que los cortes más profundos mostrarán características que se construyeron antes de las visibles en cortes menos profundos.

En un sitio histórico en Albany, Nueva York, estaban disponibles mapas de la ciudad que mostraban la ubicación de los edificios presentes en los lotes de la ciudad, que se remonta al año 1890. Luego se construyeron mapas de cortes de amplitud en cortes de 30 centímetros de profundidad (después de que se realizó el análisis de velocidad), y las imágenes de las características enterradas visibles en los mapas de georadar se compararon con los mapas de lotes históricos (figura 7.18). El corte de 20 a 50 centímetros de profundidad muestra los cimientos del edificio, cuya ubicación se compara casi exactamente con las estructuras domésticas y un gran horno que estaban presentes en 1934. En cortes progresivamente más profundos, esos edificios de 1934 aún eran visibles, pero también eran visibles los cimientos más profundos de estructuras más antiguas (figura 7.18). Cuando se compararon las ubicaciones de esas características con los mapas históricos más antiguos a 1890, muchos edificios que estaban presentes antes de la construcción de cualquier mapa de la ciudad son visibles. No fueron excavados y hoy se encuentran debajo de un estacionamiento muy alto (Conyers 2012a: 121).

En este ejemplo de la histórica Nueva York, los mapas de cortes horizontales de amplitud pueden ser una forma no solo de mapear las ubicaciones de estructuras a lo largo del tiempo, sino que, cuando se integran con otra información suficiente, como mapas históricos y datos de excavaciones funcionan mejor (Conyers 2012a: 123). La composición cambiante de los vecindarios históricos se puede determinar potencialmente utilizando estos mapas de amplitudes de georadar, cada uno de los cuales denota características de un período de tiempo específico, si los cortes de amplitud secuenciales son aproximadamente comparables a esas fases de construcción. De esta manera, las imágenes de georadar pueden ser mucho más que una simple herramienta para encontrar y mapear características enterradas; pueden constituir una base de datos para estudiar el cambio social y urbano y una gran cantidad de otras cuestiones históricas y antropológicas.

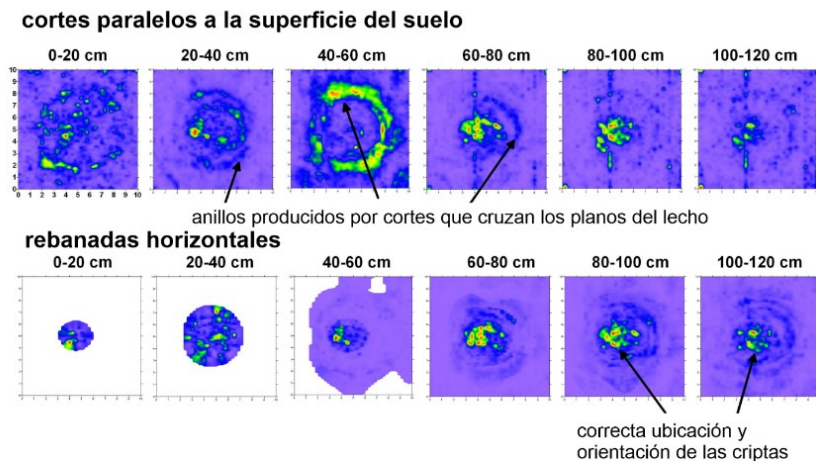


**Figura 7.18:** Tres cortes de amplitud de diferentes capas en el suelo, en un sitio histórico en Albany, Nueva York, EE. UU., que fue pavimentado y utilizado como estacionamiento cuando se recopilaban los datos. Esos mapas de GPR se pueden comparar con mapas históricos (a la derecha de cada segmento), que ilustran lo que se trazó durante tres períodos de tiempo. Algunas de las características de reflexión de GPR son visibles en restos conservados en el suelo y pueden datarse de los mapas históricos. Otros restos enterrados identificados por el GPR deben tener una edad anterior a 1890 cuando se preparó el primer mapa y son de origen desconocido. Una pequeña característica rectangular es un edificio desconocido construido en el área después de que todas las demás estructuras de la superficie habían sido demolidas antes de que se construyera el estacionamiento.

### Rebanadas de amplitud en terreno irregular

Cuando la superficie del suelo cambia mucho sobre una cuadrícula, es importante recolectar elevaciones dentro de esa cuadrícula para que los perfiles y los segmentos de tiempo de amplitud se puedan ajustar a la topografía (figura 7.19). Esto es especialmente importante cuando los límites estratigráficos no son paralelos a la superficie del suelo, pero pueden seguir alguna otra orientación. Por ejemplo, si se construyera un pequeño túmulo de entierro apilando suelo horizontal en capas, las

porciones de tiempo de amplitud que se produjeron paralelas a la superficie actual del suelo cruzarían muchos de esos límites del lecho, creando características de amplitud que no tendrían sentido en los mapas resultantes.



**Figura 7.19:** No es necesario producir cortes de amplitud paralelos a la superficie del suelo, especialmente en áreas topográficamente complejas. Los mapas superiores se generaron a partir de perfiles sin ajuste de elevación paralelos a la superficie del suelo sobre un túmulo funerario. Estos cortes no ajustados muestran características circulares alrededor del montículo donde los cortes atraviesan superficies de reflexión como las que se muestran en la Figura 7.15. Cuando todos los perfiles de reflexión en la cuadrícula se ajustan primero a la topografía y luego se cortan horizontalmente a través del montículo, las ubicaciones correctas de las criptas dentro del montículo son visibles.

Para probar este concepto, se construyeron dos series de segmentos de tiempo de amplitud en un sitio de prueba de geofísica arqueológica en Illinois (Isaacson et al. 1999). En este sitio, se construyeron dos criptas funerarias en 1998 para simular entierros humanos (incluso se colocaron cadáveres de cerdo para simular restos humanos). Luego se construyó un montículo de capas de tierra aproximadamente horizontales sobre la cripta. Los perfiles de reflexión se recolectaron usando antenas de 400 MHz en transectos espaciados de 25 centímetros sobre el montículo (Hildebrand et al. 2002). La forma más fácil de producir mapas de cortes de amplitud de esta característica es construir cada corte paralelo a la superficie del suelo, pero al hacerlo, los cortes cortan muchos de los límites entre las capas horizontales del suelo en el montículo, como se muestra desde un sitio diferente en figura 7.15. Los cortes de amplitud de

25 centímetros de espesor resultantes contruidos de esta manera produjeron una serie de áreas concéntricas de alta amplitud en muchos de los cortes, con cada anillo de alta amplitud en los mapas indicando la ubicación donde esos cortes cruzaron los límites horizontales del lecho (figura 7.19). Los cortes que no se corrigen por topografía, por lo tanto, ilustran amplitudes que no tienen validez para lo que está enterrado debajo de la superficie y son la función de una geometría de corte incorrecta.

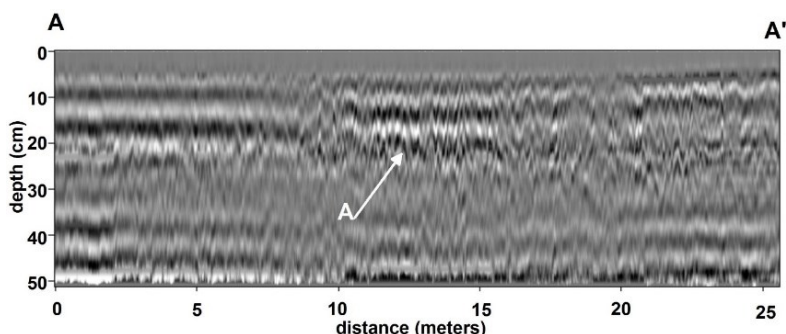
Cuando los datos de la misma cuadrícula se cortan horizontalmente después de las correcciones topográficas, cada sección de tiempo de amplitud es paralela a las superficies del lecho creadas por la acumulación de tierra sobre las criptas. Por lo tanto, los cortes no cruzan unidades de suelo horizontales y no se crean lecturas de amplitud falsas (figura 7.16). Los cortes más profundos atraviesan las propias criptas y se producen anomalías de gran amplitud en la ubicación exacta de los espacios vacíos y los bordes de las criptas dentro del montículo.

Para crear los cortes ajustados topográficamente, el montículo tuvo que ser levantado topográficamente con un tránsito, con cada punto de levantamiento utilizado para ajustar los perfiles de reflexión para los cambios de elevación de la superficie. Este puede ser un proceso laborioso con este método, pero bastante rápido si se usan sistemas GPS en tiempo real. Las mediciones de elevación son necesarias si se van a producir mapas detallados y precisos en áreas topográficamente complejas. Ahora hay disponibles sistemas de georadar modernos que recopilarán automáticamente las elevaciones de la superficie, así como las ubicaciones horizontales en una cuadrícula utilizando tecnología GPS, lo que permitirá correcciones de datos inmediatas de este tipo.

### **Descubrimiento de características sutiles con mapeo de amplitud**

A menudo, los perfiles de reflexión pueden ser difíciles de interpretar, incluso después del filtrado, el procesamiento posterior a la adquisición y la producción de muchas vistas de perfil con diferentes exageraciones verticales y horizontales. Frecuentemente, cuando uno mira perfiles de reflexión como el de la figura 7.20, existe la tentación de darse por vencido y considerar que el levantamiento es un fracaso, ya que no se ven fácilmente cambios de amplitud en él. El perfil de la figura 7.20 se recopiló con antenas de 900 MHz en un área pantanosa en las montañas de Sierra Nevada de California. El objetivo era trazar un mapa de las unidades sedimentarias depositadas recientemente con la esperanza de definir los sedimentos fluviales, pantanosos y de llanuras aluviales que podrían haber estado presentes a mediados del siglo XIX. Los registros históricos indicaron que el desafortunado grupo Donner, una caravana de carretas que estaba emigrando a California e intentando cruzar las

montañas en noviembre de 1846, acampó cerca de un arroyo en el área de estudio y se quedó varado allí durante todo el invierno (Dixon et al. 2010). Muchos relatos de testigos informaron que los sobrevivientes se encontraron en un pantano en la primavera de 1847 cuando la nieve se derritió.



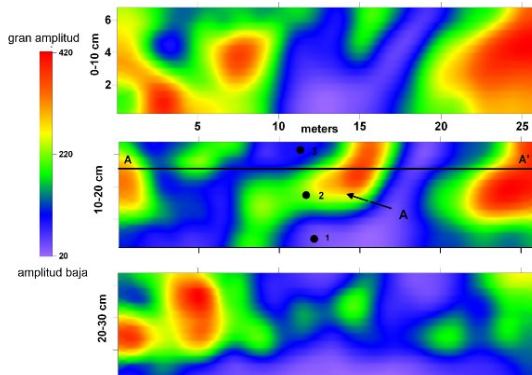
**Figura 7.20:** Perfil de reflexión de una zona de humedales poco profundos cerca de Truckee, California, Estados Unidos. Poco es visible en este perfil, pero algunos cambios en la amplitud y muchas reflexiones de fuentes puntuales muy pequeñas son evidentes en la ubicación A. Este perfil A-A' se encuentra en el mapa de cortes de amplitud en la Figura 7.21.

Encontrar los restos de ese campamento hoy es complicado porque el entorno ha cambiado mucho y ahora se encuentra al borde de un embalse que se inundó en la década de 1960. Se esperaba que un análisis del entorno histórico tal como existía durante la época del campamento Donner pudiera dar pistas sobre dónde estaba ubicado el campamento de invierno, ya que se sabía que había un pequeño arroyo cercano a principios del invierno, y el área se convirtió en un pantano en la primavera. Se consideró el método de georadar porque, aunque casi toda el área prospectiva es hoy húmeda y pantanosa, ambientes similares con abundancia de lechos de turba han demostrado ser áreas excelentes para el mapeo mediante georadar en Escocia (Clarke et al. 1999; Leopold y Volkel 2003; Utsi 2004).

Los reflejos en los perfiles de 900 MHz que atravesaban el pantano actual resultaron ser ruidosos y discontinuos, y se observaron pocos reflejos buenos que pudieran interpretarse fácilmente (figura 7.20). Sin embargo, hay cambios en el comportamiento de reflexión a lo largo de los perfiles, con algunas áreas que contienen pocos reflejos buenos y otras que parecen contener muchos reflejos hiperbólicos muy pequeños, especialmente dentro de los 20 centímetros superiores de los

perfiles de reflexión. Como se pudo hacer poca interpretación utilizando los perfiles individuales, se decidió estudiar los cambios de amplitud espacial dentro de todos los perfiles en la cuadrícula para determinar si había algún patrón en la distribución de estos reflejos, ya sea espacialmente o con profundidad.

Cuando se estudiaron las amplitudes en todos los perfiles de la cuadrícula en mapas de corte, se pudo ver un área sinuosa de reflejos de mayor amplitud en el corte de 10 a 20 centímetros (figura 7.21). Después de un estudio adicional de los perfiles de reflexión en dos dimensiones, se planteó la hipótesis de que el área de amplitud anormalmente alta correspondía a la presencia de muchos pequeños clastos de grava depositados en un arroyo, cada uno de los cuales generaba las pequeñas hipérbolas de reflexión a esa profundidad. Luego se barrenó a ambos lados de la característica de gran amplitud y dentro de ella (figura 7.21). Un estudio de los sedimentos recuperados de ellos mostró que los hoyos 1 y 3 consistían en limo y turba, con abundante carbón vegetal, mientras que el sedimento en el hoyo 2 era principalmente arena y grava y contenía muy poca turba.



**Figura 7.21:** Cuando muchos perfiles (incluido el que se muestra en la Figura 7.20 a lo largo de la sección transversal A-A'), se vuelven a muestrear en busca de amplitudes y se mapean espacialmente, las tendencias en la reflexión a menudo pueden proporcionar información sobre la naturaleza de las unidades enterradas. En esta cuadrícula, un pequeño arroyo poco profundo es visible como una reflexión sinuosa de gran amplitud (A), que se confirmó en el barrenó 2, con los barrenos 1 y 3 recuperando depósitos de marismas contiguas.

Esta información del subsuelo confirma que la anomalía sinuosa en el corte de 10 a 20 centímetros representa un pequeño canal del arroyo lleno de arena y grava. Las áreas adyacentes, que tienen una amplitud de reflexión mucho menor, son áreas donde se depositaron sedimentos de marismas y llanuras aluviales.

Aunque no se encontraron restos del campamento Donner en esta área inmediata, el estudio de georadar logró definir el arroyo poco profundo con depósitos de inundación de las llanuras pantanosas adyacentes, que se pueden utilizar como guía para pruebas subsuperficiales adicionales en la búsqueda de artefactos. Más importante aún, este estudio ilustra cómo incluso los datos de reflexión que son difíciles de interpretar en perfiles bidimensionales pueden producir datos útiles cuando se estudian en cortes de amplitud. Cuando los datos de este tipo se incorporan luego con información arqueológica e histórica estándar, se pueden estudiar grandes áreas de terreno rápidamente y los esfuerzos de excavación se pueden concentrar en las ubicaciones más prometedoras.

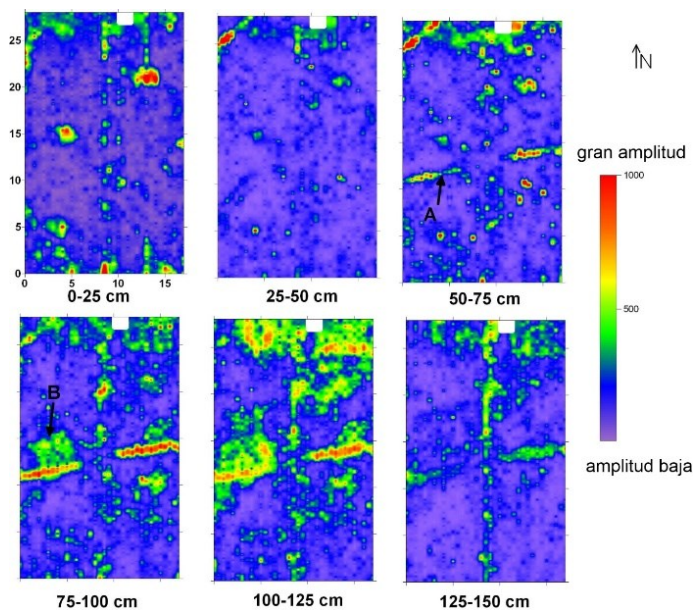
A menudo, los mapas de cortes de amplitud de georadar son capaces de producir imágenes que no solo son casi invisibles en los perfiles de reflexión, como se muestra en el ejemplo anterior, sino que las características enterradas que produjeron las anomalías de reflexión también son casi invisibles para el ojo humano incluso cuando se descubren en excavaciones.

Un estudio de georadar de este tipo se llevó a cabo en un huerto, donde el arado superficial había destruido cualquier indicio de características enterradas que pudieran existir debajo. El área estudiada fue el sitio de una granja a mediados del siglo XIX en Denver, Colorado, que se convirtió en una parada de diligencias de paso y finalmente se convirtió en una granja familiar en el siglo XX. Los documentos históricos indican que varios edificios se habían ubicado en algún lugar del área del huerto, pero se desconocía su ubicación exacta. El área también había sido sometida históricamente a una serie de inundaciones, que enterraron cualquier posible rasgo arquitectónico restante por debajo de más de un metro de sedimento.

Se recopiló una cuadrícula de datos de reflexión de georadar de 400 MHz en el huerto y se construyeron mapas de cortes de amplitud horizontal cada 25 centímetros en el suelo, después de que



los tiempos de viaje del radar se convirtieran a profundidad (figura 7.22). A la profundidad de 75 a 100 centímetros, se descubrió una característica lineal distintiva, y en los cortes más profundos, otra característica lineal que la cruza en ángulo. Los mapas de servicios públicos modernos muestran líneas de agua de plástico que atraviesan el huerto, lo que generó esas anomalías de reflexión lineal. Más interesante, sin embargo, fue una característica de alta amplitud de 4 metros cuadrados en la profundidad de 75 a 100 centímetros, que no se correlacionó con ninguno de los edificios históricos que se habían cartografiado en las cercanías. Se planteó la hipótesis de que esta característica era el piso de un edificio enterrado, no por otra razón más que su geometría perfectamente cuadrada.



**Figura 7.22:** Mapas de cortes de amplitud que muestran una tubería (A) y un contorno claramente cuadrado adyacente de una característica de amplitud moderadamente alta (B) en el corte de 75-100 cm. Se sabía que la característica lineal era una tubería de agua de plástico. Este elemento cuadrado fue excavado y se encontró que era una capa de arena muy delgada que en un momento fue el piso de un edificio histórico. Estos datos se recopilaban en un huerto en Denver, Colorado, EE. UU.

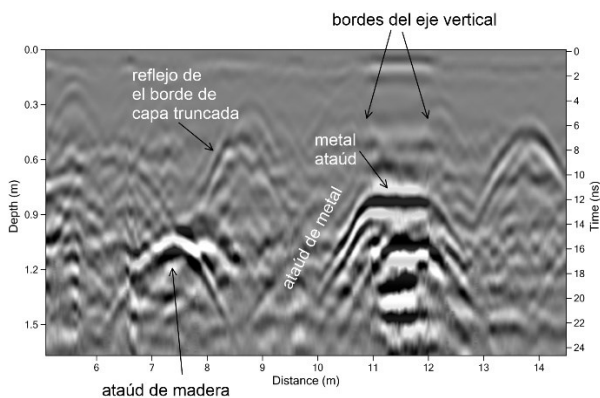
Se realizaron barrenos tanto dentro como fuera de la característica cuadrada, y no se pudo ver ninguna diferencia discernible en las dos muestras de sedimento y suelo desde la profundidad indicada en el mapa de corte de amplitud. Pensando que quizás las velocidades, que se habían estimado a partir del ajuste de hipérbola de hipérbolas de fuente puntual generadas a partir de las tuberías, eran incorrectas, los investigadores colocaron una excavación de prueba directamente sobre una de las tuberías para descubrirla y confirmar la profundidad de un objeto conocido. La tubería se encontró exactamente a la profundidad que se muestra en los mapas de georadar, aumentando el nivel de confianza de los análisis de velocidad y las profundidades del mapa de corte de amplitud resultante. Luego se realizó un análisis más cuidadoso de la estratigrafía del suelo y los sedimentos en las excavaciones adyacentes y justo debajo de la tubería. Se encontró una capa de 2 centímetros de espesor que era un poco más arenosa que las capas de arriba y de abajo dentro de la característica cuadrada de datos de georadar. Cuando las excavaciones se extendieron hacia afuera, se encontró que esta capa arenosa estaba cubierta por pedazos rotos de arenisca plana, que probablemente se usaron como adoquines en el piso de una pequeña casa o cobertizo.

Parece que hubo una vez un pequeño edificio en el huerto, cuyo piso estaba pavimentado con arena cubierta con piedras planas. Cuando se abandonó el edificio, las piezas de piedra utilizables probablemente se recuperaron para su uso en otro lugar, y el subsuelo arenoso restante se cubrió con sedimentos durante las inundaciones y por la acumulación de tierra. Todo lo que queda de la casa hoy es la capa de arena muy sutil. La característica es tan sutil que los métodos de excavación normales probablemente la habrían pasado por alto, ya que se habría interpretado como una capa arenosa más en el sedimento y el paquete de suelo del huerto. Incluso una vez que se había descubierto la característica en excavaciones, todavía no se podía ver en los perfiles de reflexión de georadar sin usar mucha imaginación. Solo los cambios sutiles en las amplitudes de reflexión del radar, procesados como mapas de cortes de amplitud, fueron capaces de encontrar y mapear esta característica, que solo se distinguía por su forma cuadrada distintiva.

### **Mapas de amplitud para buscar entidades verticales y tumbas**

En la mayoría de los casos, el mapeo por georadar en arqueología se usa para producir imágenes de características planas como pisos de casas enterradas, interfaces estratigráficas importantes que son subhorizontales u orientaciones geométricas distintas de reflejos de fuentes puntuales, como cimas de muros enterrados o círculos de piedra. Las interfaces

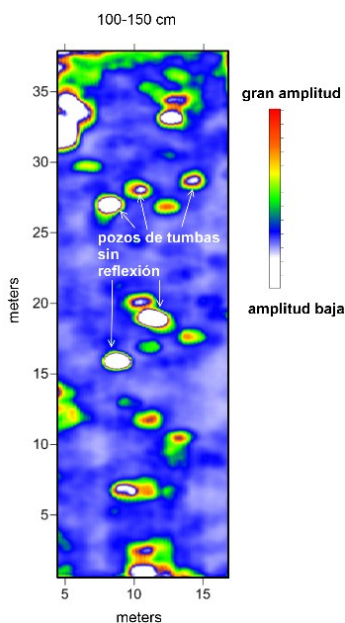
verticales que se pueden encontrar en los pozos de las tumbas u otras características similares a menudo son más difíciles de mapear, ya que la mayor parte de la energía del radar que se propaga al suelo desde las antenas de superficie viaja paralelamente a los límites de interés y, por lo tanto, se produce poca reflexión. Los pozos verticales que conducen a las tumbas, sin embargo, son visibles cuando las amplitudes se mapean en cortes, ya que la reflexión cambia notablemente entre el material que llena los pozos y el que lo rodea. En Japón, los pozos que conducían a las tumbas funerarias eran visibles como reflejos de gran amplitud en numerosos cortes apilados uno encima del otro (Conyers y Goodman 1997: 184). Las tumbas históricas y prehistóricas también suelen ser visibles de la misma manera (Bevan 1991; Conyers 2006a; Damiata et al.2012; Davenport 2001a, 2001b; Davis et al.2000; Nobes 1999; Schultz y Martin 2011; Solla et al.2012; Strongman 1992).



**Figura 7.23:** Perfil de reflexión de un cementerio histórico en Pala, California, donde los bordes de un eje vertical son visibles en la tumba derecha que contiene un ataúd de metal. La tumba de la izquierda que contiene un ataúd de madera más antiguo muestra reflejos generados desde el borde de lechos superficiales truncados, producidos durante la excavación de la tumba.

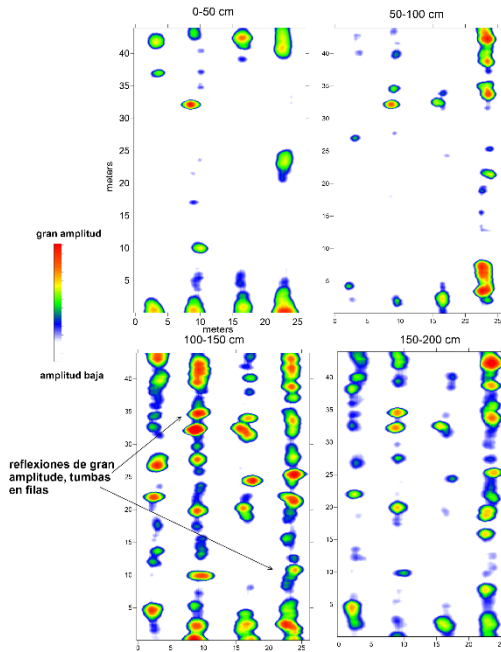
En un cementerio histórico de California, muchas tumbas podrían ubicarse en perfiles de reflexión analizando los pozos de entierro y, a veces, restos de entierro (figura 7.23). En esta zona se encontraron algunas de las tumbas analizando las amplitudes más bajas, ya que los pozos de las tumbas se rellenaron con material de relleno homogeneizado. Esto ocurrió porque durante su excavación, la estratigrafía natural en el suelo fue destruida, produciendo menos reflejos de gran amplitud en los pozos rellenos que las unidades intactas circundantes. Cuando se mapean

muchos perfiles en cortes de amplitud, muchos de los pozos de tumbas difíciles de identificar eran visibles como áreas sin reflexión (figura 7.24).



**Figura 7.24:** Mapas de corte de amplitud del corte de 100-150 cm en un cementerio histórico en Pala California donde las amplitudes bajas indican los ejes verticales de las tumbas donde no se produjo ningún reflejo. En este antiguo cementerio se pueden ubicar algunas tumbas mapeando los ejes de las tumbas no reflectantes.

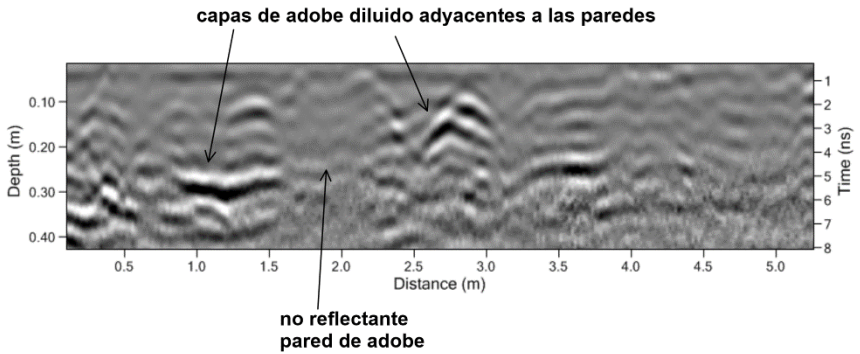
Si las tumbas se excavan en sedimentos estratificados, las capas exteriores al pozo de la tumba conservarán su estratigrafía natural, mientras que el material que se coloque de nuevo en la tumba se homogeneizará, lo que producirá una alteración distintiva en la estratificación (figura 7.24). A veces, estas características de truncamiento son visibles en mapas de cortes de amplitud, pero a menudo los perfiles deben procesarse y analizarse individualmente, y la ubicación de estas características se traza a mano en mapas a medida que se identifican en cada perfil de reflexión. Los restos humanos conservados en su interior probablemente no serán visibles, ya que es posible que no contrasten lo suficiente con el material circundante.



**Figura 7.25:** En los cementerios donde las tumbas aún están intactas, los reflejos de gran amplitud de los ataúdes y otros elementos enterrados se encuentran en filas bien ordenadas. Este cementerio se encuentra en Denver, Colorado.

Cuando las tumbas contienen ataúdes que no se han derrumbado y retienen algún espacio vacío, son fácilmente visibles de perfil como hipérbolas de reflexión distintivas (figura 7.23). Los reflejos hiperbólicos son a menudo de gran amplitud, y si los ejes de la hipérbola se migran de regreso a sus fuentes, se pueden hacer imágenes muy distintas de cementerios, con varios tamaños de ataúdes y profundidades de entierros diferenciados.

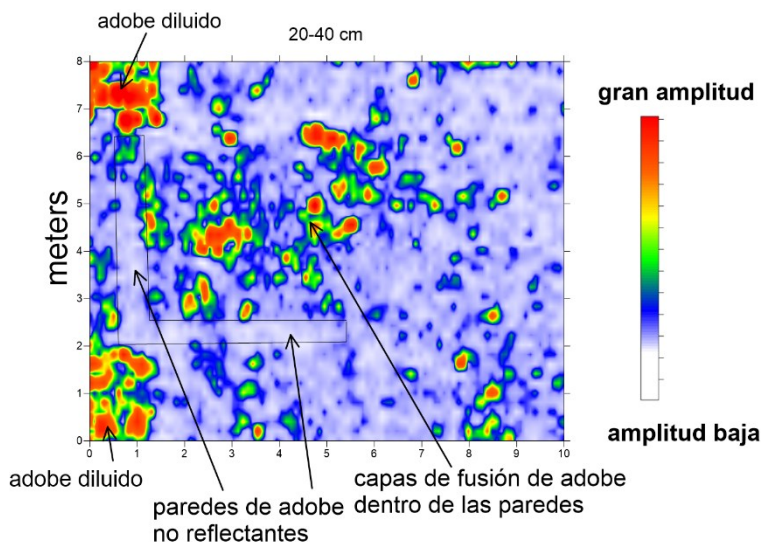
A menudo, los perfiles de reflexión y los mapas de cortes de amplitud en estos cementerios son lo suficientemente distintos como para determinar la diferencia entre los entierros de adultos y niños por el tamaño de los ataúdes y la profundidad del entierro. Si los ataúdes estaban revestidos con metal también se puede determinar si tienen los reflejos múltiples, distintivo común, al metal enterrado. Los mapas de amplitud de los entierros intactos y bien ordenados se pueden interpretar fácilmente, ya que estos entierros producen reflejos de gran amplitud (figura 7.25).



**Figura 7.26:** Las características de interés a menudo se delinear localizando áreas sin reflexión, ya que están compuestas por materiales homogéneos que no generan reflejos de radar. En este perfil, un muro de adobe compuesto de arena y barro bien mezclados no es reflectante, pero las capas adyacentes de capas de adobe diluido y re-depositado y arena arrastrada por el viento son altamente reflectantes.

Existe una tendencia en la mayoría de los intérpretes de georadar para concentrarse en las amplitudes altas, que generalmente se generan a partir de interfaces de interés. Pero a veces los materiales enterrados que realmente interesan son aquellos que tienen poca o ninguna reflectividad de las ondas de radar (Conyers 2011). En el sur de Arizona, los gruesos muros de adobe son el objetivo del mapeo de GPR, y como se hicieron mezclando arcilla, arena y materiales aglutinantes orgánicos y luego se convirtieron en muros, no tienen interfaces dentro de ellos para reflejar la energía (figura 7.26).

Son los lechos adyacentes compuestos de adobe erosionado (diluido) con capas de arena arrastrada por el viento los que crean los reflejos de alta amplitud. Cuando se trata de rejillas de muchos perfiles, que contienen este tipo de materiales, las áreas en los mapas de amplitud que tienen amplitudes bajas o nulas son la ubicación de las paredes (figura 7.27). Son las grandes amplitudes en los mapas de amplitud las que son más visibles para el ojo humano, que son las capas de paredes erosionadas que reflejan las ondas de radar.



**Figura 7.27:** Cuando se mapean amplitudes en áreas donde las áreas no reflectantes son las características de interés (en este caso muros de adobe), las áreas de alta amplitud deben descartarse. A menudo es difícil concentrarse en las áreas de no reflexión, pero en este caso del sur de Arizona son las áreas de no reflexión las que son importantes.

### Producción de imágenes renderizadas

La capacidad única de los sistemas GPR para recopilar datos de reflexión en un paquete tridimensional se presta a la producción de una serie de otras imágenes tridimensionales que no son posibles con otros métodos (Conyers et al. 2002; Goodman et al. 1998, 2004; Heinz y Aigner 2003; Leckebusch 2000, 2003). Si los datos de reflexión se recopilan en una cuadrícula de transectos poco espaciados, y si hay muchas trazas de reflexión recopiladas a lo largo de cada transecto, las amplitudes de reflexión se pueden colocar con precisión en tres dimensiones y luego renderizar utilizando varios programas de visualización. De esta manera, los datos GPR de sitios arqueológicos se vuelven análogos a muchas otras técnicas de imagen utilizadas en otras disciplinas, que dependen de fuentes de energía como las ondas sónicas y la resonancia magnética. En las complejas imágenes médicas, las técnicas tridimensionales pueden producir imágenes de ciertas amplitudes derivadas de estas fuentes de energía para mostrar partes internas del cuerpo, o incluso impulsos eléctricos en el cerebro en función de diferentes estímulos. En arqueología y geotecnia, los reflejos de radar se pueden utilizar de la misma manera,

pero en su lugar producen imágenes de características culturales enterradas.

Usando datos de georadar, las características o interfaces enterradas se pueden convertir en isosuperficies, lo que significa que las interfaces que producen los reflejos se colocan en tres dimensiones y se asigna un patrón o color a amplitudes específicas para que sean visibles (Heinz y Aigner 2003; Leckebusch 2003). En los programas que producen este tipo de imágenes, ciertas amplitudes (generalmente las más altas) pueden ser estampadas o coloreadas mientras que otras se hacen transparentes. Las fuentes de luz generadas por computadora, para simular los rayos del sol, se pueden usar para sombrear las características renderizadas con el fin de mejorarlas, y las características se pueden rotar y sombrear hasta que se produzca el producto deseado.

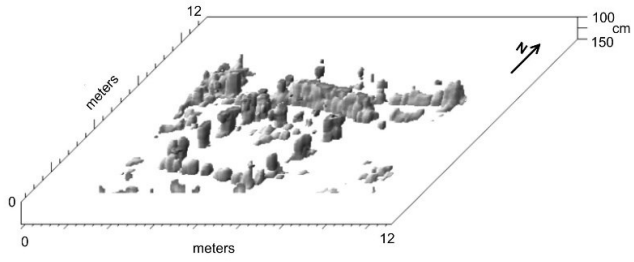
Algunos han denigrado este tipo de imágenes como "demasiado llamativas", "sin ningún valor práctico" o más como videojuegos de alta tecnología que como geofísica arqueológica geotécnica. Sin embargo, los seres humanos son animales visuales y, a menudo, podemos comprender imágenes tridimensionales mucho más fácilmente que los reflejos en perfiles o mapas de cortes de amplitud estándar. Uno de los objetivos de la geofísica arqueológica geotécnica debería ser "ver dentro del suelo", y ¿qué mejor manera que hacer una imagen del suelo que sea representativa de cómo se vería un sitio si estuviera totalmente excavado? Las representaciones tridimensionales a menudo pueden ser las más fácilmente comprensibles de todas las imágenes de georadar para este propósito, especialmente para los no iniciados geofísicamente.

Para producir imágenes renderizadas con perfiles de georadar, primero deben procesarse y filtrarse todos los perfiles de reflexión en una cuadrícula para producir el producto final "más limpio" posible. Se deben eliminar el ruido de fondo y las frecuencias de interferencia y se deben obtener amplitudes importantes de las características que se van a reproducir para mejorar su visibilidad. Los reflejos hiperbólicos también deben migrarse a sus orígenes. A continuación, se deben producir muchos mapas de corte en intervalos de tiempo muy delgados, para producir capas de datos digitales en planos paralelos estrechamente espaciados. Si estos cortes se construyen demasiado delgados, las formas de onda de reflexión a veces se pueden diseccionar en muchos paquetes pequeños sin sentido, y los valores de amplitud resultantes pueden contener solo una parte de cada onda reflejada, y no la onda en su totalidad. Por ejemplo, si hay una ventana de 20 nanosegundos sobre la que se recopilaron datos de reflexión, y cada onda reflejada en el suelo tiene una longitud de onda de aproximadamente 2 nanosegundos (aproximadamente el promedio para una antena de 400 MHz), entonces la mayor cantidad de cortes que



deberían ser generados (y no diseccionar las ondas en muchos pedazos para obtener amplitudes) sería 10. Por esta razón, un promedio móvil puede ser preferible para crear una gran base de datos tridimensional para renderizar, donde se disecciona una ventana de reflejos de 20 nanosegundos en 40 cortes horizontales, cada uno de 3 nanosegundos de grosor, pero superpuestos a los cortes adyacentes en uno o dos nanosegundos. Habría un promedio de los datos de amplitud en este método, pero una mayor probabilidad de que las formas de onda completas se promedien en cada corte y luego se hagan visibles mediante el renderizado. Grasmueck y col. (2004), sin embargo, han demostrado que, en algunos contextos, cortes muy delgados sin superposición pueden producir buenas imágenes. También se pueden mapear otros aspectos de las ondas reflejadas además de la amplitud. Hay otros aspectos de las ondas que son atributos de los datos, como su coherencia y similitud en una cuadrícula (Boniger y Tronicke 2010). Estos aspectos de las ondas son algo subjetivos y generalmente se aplican a un paquete tridimensional de datos digitales remuestreados utilizando programas de procesamiento sísmico.

Cuando la estructura enterrada de Petra en la figura 7.14 se cortó muy finamente y solo las amplitudes más altas se convirtieron en una isosuperficie, se construyó una imagen muy distinta de un edificio enterrado (figura 7.28). En esta representación, no se incluyeron los cortes menos profundos, ya que contenían muchos reflejos de pequeñas fuentes puntuales de escombros de rocas poco profundas. Tampoco se incluyeron los cortes más profundos, ya que los datos de esa profundidad tendían a ser ruidosos y daban como resultado rayas de gran amplitud en las imágenes renderizadas (Conyers et al. 2002). Estos datos de reflexión fueron ideales para renderizar porque la mayoría de los reflejos recolectados en la cuadrícula se generaron a partir de una arquitectura enterrada, y la matriz de arena circundante arrastrada por el viento no generó casi ningún reflejo de amplitud. Una vez que se construyó el renderizado en la computadora, también se podría rotar o inclinar en varias orientaciones diferentes en una pantalla de video (Conyers et al. 2002).



**Figura 7.28:** Una representación tridimensional del edificio enterrado en Petra, que se muestra en la vista de mapa de cortes horizontales en la Figura 7.14. Los reflejos de mayor amplitud se representan en su ubicación tridimensional y se proyecta luz artificial para hacer que las características sean más visibles.

## CAPITULO 8

### Conclusión

El radar de penetración terrestre puede ser una de las técnicas geofísicas cercanas a la superficie más complicadas, pero también una de las más gratificantes, ya que tiene la capacidad de mapear lo que está enterrado en el suelo en tres dimensiones. Si bien las condiciones deben ser propicias para la propagación de la energía del radar en el suelo, los objetivos deben ser lo suficientemente distintos como para diferenciarse del sedimento o suelo que los contienen, y a una profundidad que pueda resolverse con el equipo disponible. Para que se cumplan todas estas variables, es necesario conocer físicamente las características geológicas y arqueológicas de cada sitio para que se pueda interpretar correctamente el origen de los reflejos en el suelo. Además, es crucial la comprensión de cómo se crean los reflejos y cómo los pasos de adquisición y procesamiento pueden mejorar, o algunas veces oscurecer estos reflejos.

En los últimos años se han realizado enormes avances en el hardware y software de adquisición y procesamiento de datos de Georadar, que pueden transformar lo que solía considerarse inutilizable o, en el mejor de los casos, datos de reflexión marginal en mapas e imágenes importantes del subsuelo. Uno de los avances más importantes es el análisis de amplitud, que puede procesar decenas o incluso cientos de perfiles de reflexión a la vez, creando bases de datos utilizables a partir de cantidades masivas de reflexiones en horas, o incluso minutos, después de completar un levantamiento. Esto ahora es común en todos los programas de software. Sin este tipo de análisis de datos, los datos de Georadar deben interpretarse mediante análisis visual y mapeo manual de reflejos en muchos perfiles, lo que puede resultar abrumador para todos, excepto para el investigador más motivado con una gran cantidad de tiempo libre. Sigue siendo una habilidad importante para todos los intérpretes de Georadar, ya que los perfiles contienen mucha información importante que puede ayudar a la interpretación de las imágenes de amplitud. Pero aunque las técnicas de procesamiento por computadora son más rápidas y eficientes, la base de datos primaria (cada trazo de reflexión en cada perfil) debe haberse recopilado y procesado correctamente antes de someterse a este poderoso paso de transformación de datos. La diversión y la recompensa siempre vienen en el procesamiento de datos y el análisis de las imágenes resultantes, pero a menos que se recopilen originalmente datos de reflexión de buena calidad y se tenga mucho cuidado en el procesamiento de datos posterior a la adquisición, nunca se puede asegurar una alta calidad de resultados (o al menos utilizables).

En la recopilación de datos de Georadar, se debe dedicar una gran cantidad de tiempo a elegir las antenas correctas para una óptima resolución a profundidad, configurar cuadrículas para asegurarse de que las áreas objetivo estén completamente cubiertas y elegir los parámetros de configuración correctos para optimizar la calidad de los datos registrados. Debe aplicarse cuidadosamente una calibración adecuada del equipo para el número infinito de variables que pueden ocurrir dentro de los materiales arqueológicos y geológicos enterrados. Cada sitio presentará su propio conjunto de problemas que los equipos deberán superar, así como ajustarse a las variaciones de suelo y sedimentos, si se quiere que los resultados finales del mapeo de Georadar sean útiles. Lo que es más importante, es necesario comprender "por qué" los datos se recopilaban de cierta manera, si los perfiles y mapas se van a interpretar correctamente. No es en absoluto útil poder decir que se utilizó un conjunto de procedimientos de adquisición y parámetros de configuración porque los datos "se veían bien", ya que esta observación no se presta a poder decir "por qué" los productos finales aparecen de determinada forma. Para que los resultados sean explicables para la audiencia más general, es fundamental comprender en cada sitio cómo se genera, transmite, refleja, atenúa y finalmente registra la energía de Georadar. Luego, cada paso de adquisición y procesamiento, y los procedimientos finales de mapeo e imágenes, también deben ser explicables de una manera comprensible, o los resultados de esta poderosa, pero a veces complicada técnica geofísica siempre estará en duda.

La mayoría de los practicantes de Georadar generalmente "presumen" solo sus mapas de cortes de amplitud y perfiles de reflexión más bonitos en la literatura publicada o cuando dan charlas, ignorando los mapas y perfiles más difíciles de interpretar. Esto puede llevar a los no iniciados a creer que el Georadar es un gran método que funciona en todas las condiciones. A menudo, esas personas son las primeras en desilusionarse cuando un levantamiento no cumple con las expectativas preconcebidas. Por esta razón, se debe informar a todas las partes involucradas en los proyectos de Georadar sobre cómo funciona el método y cuáles son los productos finales.

Todos los datos adquiridos deben considerarse una base de datos primaria como todos los datos arqueológicos (Kvamme 2003) y/o o geotécnicos, y deben entenderse correctamente para que los productos finales se interpreten correctamente. Siempre es necesaria una combinación de interpretación de perfiles, procesamiento y reprocesamiento selectivo de datos, mapeo de cortes de amplitud y reinterpretación de perfiles de reflexión comparándolos con los mapas de cortes. A menudo, los mapas de cortes de amplitud se producen primero

para que inmediatamente se puedan ver distribuciones interesantes de reflexiones de ciertas amplitudes en el suelo. Pero el origen de esas amplitudes debe entenderse estudiando cada uno de los perfiles de reflexión y relacionando el origen de las reflexiones con lo que las generó en el suelo, o probablemente se producirán errores de interpretación. Por lo tanto, aunque los datos de Georadar de hoy se pueden procesar en mapas de corte de muchos órdenes de magnitud más rápido que hace unos años, los métodos "anticuados" de análisis de reflexión de perfiles deben ser parte del proceso de la interpretación final.

Cuando se adquieren datos de reflexión deficientes, es crucial tratar de comprender lo que sucedió y luego aprender de esos fracasos. Con el Georadar, el número de variables, algunas de las cuales se pueden controlar y otras que no, son infinitas. Si los geofísicos queremos superar el estigma de ser "operadores de cajas negras" que producen movimientos extraños, que solo nosotros y otros en el "club de geofísica" pueden entender, entonces todos debemos tratar de comprender nuestros datos, sin importar su calidad y poder explicar a los demás tanto nuestros éxitos como nuestros fracasos.

Hace muchos años, un colega que trabajaba en un sitio paleoindio profundamente enterrado en Texas contrató a algunos geofísicos para realizar un estudio de Georadar para definir importantes capas estratigráficas enterradas. Los geofísicos consultores pasaron todo el día trabajando con sus equipos de manera intensa pero silenciosa, recopilando datos de reflexión y presumiblemente interpretando los resultados en la parte trasera de su camioneta. Al final del día, proclamaron a los arqueólogos, que esperaban expectantes los resultados: "El Georadar no funciona aquí". Rápidamente cargaron su equipo y se alejaron en una nube de polvo, para no ser vistos nunca más. Los arqueólogos se quedaron mudos, ya que sabían poco sobre el método de Georadar, y se quedaron sin resultados y solo con una factura bastante grande por los servicios prestados. Hasta el día de hoy, siguen sin estar informados sobre lo que se logró ese día, si es que se logró algo, y, no hace falta decirlo, nunca más han usado la técnica de Georadar. Son experiencias negativas como esta las que debemos hacer todo lo posible para evitar que sucedan. La única forma de que esto suceda es primero entendiendo todos los métodos de adquisición, procesamiento e interpretación, y luego explicando correcta y pacientemente sus resultados a los demás.

También es importante enfatizar que los arqueólogos no pueden emplear arbitrariamente las técnicas de Georadar presentadas en el libro sin tener que romper el suelo con una pala y agacharse con una cuchara y un recogedor. El análisis de radar de penetración terrestre nunca podrá reemplazar los métodos arqueológicos y geotécnicos estándar y, para

tener más éxito, el método debe integrarse con ellos. Los reflejos del radar del subsuelo nunca podrán determinar la edad de un elemento arqueológico, qué tipo de cerámica puede tener, o el color del pigmento con el que está decorado. Solo las excavaciones pueden proporcionar este tipo de información. La mayor fortaleza del método radica en su capacidad para descubrir y crear imágenes precisas de características ocultas en tres dimensiones y producir mapas y perfiles de estratigrafía importantes entre las excavaciones arqueológicas estándar y circundantes.

Muchos en la comunidad arqueológica pueden continuar empleando el Georadar solo como un dispositivo de “búsqueda de anomalías” para localizar posibles objetivos que luego puedan ser excavados. Aunque a veces esto puede ser un uso importante, en el futuro, la máxima eficacia del Georadar será cuando se pueda integrar con información arqueológica y geológica detallada recopilada de excavaciones y estudios estratigráficos. Cuando se hace esto, se pueden hacer descripciones más explícitas de los reflejos generados en el suelo y las “anomalías” pueden convertirse en objetivos reales en el suelo que tienen significados importantes. De esta manera, el método de Georadar se convierte en una herramienta valiosa para mapear con precisión el entorno antropogénico y natural de un sitio e integrar esos mapas con otros datos arqueológicos más estándar. Sin una integración experta de productos de Georadar con información de arqueólogos y estratígrafos que trabajan en cualquier sitio, el Georadar seguirá siendo solo un método de “caja negra” que crea imágenes interesantes (y posiblemente importantes) de dos y tres dimensiones de características subterráneas.

El método de Georadar también solo es efectivo como herramienta de mapeo en ciertos ambientes bajo regímenes específicos de suelo y humedad. Su éxito o fracaso se basa en la aplicación informada del equipo correcto, los parámetros de adquisición apropiados y la capacidad interpretativa del arqueólogo, geólogo o geofísico. Una cuestión es reconocer las “anomalías” de Georadar (que pueden o no tener importancia) y otra muy distinta es interpretar correctamente las reflexiones más importantes para obtener un significado arqueológico o ambiental.

Recientemente se han recopilado datos de Georadar utilizables en algunas áreas o condiciones en las que el “dogma de Georadar” ha declarado en el pasado que no se podrían obtener resultados utilizables, lo que demuestra que el método tiene una aplicabilidad mucho más amplia de lo que se pensaba anteriormente. Algunos de esos resultados se ilustran en este libro

Un error común es que la resolución de los elementos arqueológicos enterrados o de las capas estratigráficas importantes es mejor cerca de la

superficie y disminuye con la profundidad. Generalmente esto es cierto, pero en algunos casos, si las características de interés están ubicadas dentro de la zona de campo cercano de la antena, pueden permanecer ocultas. A veces, los pasos de procesamiento se pueden aplicar a esos reflejos poco profundos oscuros pero importantes, y posiblemente se pueden sacar de la base de datos. Sin embargo, estas mismas características, si se entierran más profundamente en el suelo, podrían ser visibles con el mismo espaciado de transecto debido a la extensión cónica del haz del radar que ilumina un área de superficie cada vez mayor con la profundidad. Por lo general, cuanto más cercano sea el espaciado de los transectos dentro de una cuadrícula, mejor será la definición de los materiales enterrados, independientemente de la frecuencia de la antena.

Muchos creen que los estudios de Georadar solo se pueden realizar en terreno nivelado o casi nivelado. Si bien siempre es más fácil trabajar en una superficie plana y despejada, el uso de Georadar no debe impedirse en terrenos irregulares o ásperos. Algunos levantamientos exitosos, realizados en áreas con variaciones topográficas severas, a menudo arrojan resultados útiles sorprendentes. Si se obtienen mediciones detalladas de la elevación de la superficie sobre la cuadrícula, a los perfiles se les puede aplicar una corrección topografía y los objetivos arqueológicos que de otro modo serían difíciles de discernir en los perfiles estándar pueden hacerse evidentes. En terrenos accidentados, si las trazas de reflexión registradas se apilan para promediar las perturbaciones menores de la superficie y se aplican filtros de eliminación de fondo a los datos después de la recopilación, aún se pueden obtener buenos datos de reflexión. Las antenas de baja frecuencia (menos de 300 MHz) están mucho menos influenciadas por pequeños cambios en su balanceo y cabeceo cuando se arrastran sobre superficies rugosas, que no es el caso cuando se utilizan antenas de alta frecuencia que son más pequeñas. Incluso las pequeñas irregularidades de la superficie que no se tienen en cuenta mediante las correcciones topográficas pueden alterar gravemente los reflejos del subsuelo obtenidos mediante el uso de antenas de alta frecuencia. Independientemente del tamaño o la frecuencia de la antena, es imperativo mantener las antenas en la misma orientación general con el suelo, o los cambios de acoplamiento de energía provocarán cambios en la naturaleza de las ondas reflejadas que pueden confundirse con cambios "reales" en el suelo.

Es extremadamente importante que se asigne tiempo de campo para la calibración del equipo y las pruebas de velocidad antes de realizar un levantamiento. Al llegar a un sitio, siempre es tentador comenzar inmediatamente a adquirir datos de reflexión antes de que se comprendan completamente las condiciones del campo. Esto es especialmente cierto si

el equipo de Georadar se alquila por días o por horas. La prisa de este tipo muchas veces puede producir resultados desafortunados, especialmente si se descubre, después de regresar del campo, que se realizaron incorrectamente ajustes importantes en el equipo, como el apilamiento de trazas o los ajustes de la ventana de tiempo. Lo mismo ocurre con las conversiones de tiempo-profundidad que solo se pueden realizar con precisión si las mediciones de velocidad se obtienen como parte de un programa de adquisición de datos de campo al mismo tiempo que se recopilan los perfiles de reflexión.

Cada levantamiento de Georadar producirá resultados únicos, dependiendo de las condiciones del campo en el momento en que se realizó. A menudo, hay variaciones en la calidad de los datos en la misma área de un día a otro. La humedad del suelo, los sedimentos y otros factores ambientales pueden variar con los cambios de humedad, las condiciones de la superficie por lo tanto las velocidades de las ondas de radar y la resolución del subsuelo variarán en consecuencia. Si las pruebas de velocidad no se realizan mientras se realiza el levantamiento en el campo, nunca se pueden replicar con precisión y, después del hecho, las correcciones de tiempo y profundidad a veces pueden ser solo conjeturas.

La comprensión de la estratigrafía del subsuelo en lo que respecta a la generación de reflejos también es crucial en el proceso de interpretación. Esto solo se puede lograr si la estratigrafía en las excavaciones de prueba o afloramientos es visible y estudiada. Si es posible, se deben adquirir algunos perfiles GPR en una cuadrícula que se puedan "atar" a la estratigrafía visible para que los reflejos obtenidos en los perfiles se puedan correlacionar directamente con los horizontes de interés enterrados. Si no se hace esto, el origen de los reflejos individuales siempre estará en duda y algunas características posiblemente importantes pueden pasar desapercibidas. En algunas situaciones, puede ser difícil obtener permiso para excavar con el fin de observar y medir la estratigrafía, especialmente si el propósito del estudio es mapear un sitio de manera no invasiva. Si no se permite la excavación en un área sensible, aún puede ser posible extender los transectos de la prospección a cortes de caminos cercanos o excavaciones que estén ubicadas lejos del sitio pero en un entorno geológico similar. Como último recurso, puede estar permitido obtener información estratigráfica de sondeos de barrenación o núcleos de diámetro pequeño que pueden estar correlacionados con reflejos en perfiles de Georadar.

Los usuarios de Georadar siempre deben tener en cuenta la información sobre las condiciones del suelo y los sedimentos de los informes publicados o consultar con geólogos o geocientíficos que estén familiarizados con el área de estudio. Si los suelos son muy ricos en



arcilla, especialmente cuando están húmedos, o las características de interés están ubicadas a mucha profundidad en el suelo, otras técnicas geofísicas pueden ser más útiles que el Georadar. Sin embargo, trabajos recientes han demostrado que incluso la arcilla húmeda, si no es conductora de electricidad, permitirá el paso y la reflexión de la energía del radar a profundidades sorprendentes (Conyers 2004; Conyers 2012a: 34). Aunque muchos otros métodos de mapeo geofísico aún pueden producir datos significativos donde el Georadar falla, el Georadar es uno de los únicos métodos cercanos a la superficie que se puede calibrar con precisión para brindar información confiable de profundidad y producir mapas tridimensionales.

Durante la adquisición de datos, es importante, pero muchas veces difícil, abstenerse de emitir juicios sobre el éxito o el fracaso del levantamiento. Siempre es tentador exponer a los espectadores algunas palabras sobre el origen de las anomalías de reflexión que pueden ser visibles como perfiles sin procesar en la pantalla de la computadora en "tiempo real". El cuidadoso procesamiento e interpretación de los datos después de regresar del campo suelen ser necesarios para cualquier evaluación precisa y exitosa de un levantamiento. Las conclusiones preliminares basadas en una lectura de los perfiles de reflexión en bruto en el campo a menudo son inexactas y cualquier evaluación del éxito del levantamiento basada en ellas puede ser apresurada y potencialmente embarazosa. Después de aplicar filtros de eliminación de ruido de fondo, análisis de cortes de amplitud y otras técnicas interpretativas a los datos de reflexión, las características invisibles suelen aparecer en los lugares más inverosímiles. Casi siempre es necesario un análisis detallado de los datos, los enfoques casuales para el procesamiento y la interpretación de los datos probablemente darán como resultado levantamientos defectuosos o fallidos.

Para sitios estratigráfica o arqueológicamente complicados, casi siempre es necesario un proceso iterativo de manipulación y mapeo por computadora combinado con la interpretación manual de perfiles. A menudo, se deben improvisar técnicas individualizadas y, a veces, sofisticadas para hacer frente a las complejidades de algunos sitios. Estos procesos pueden requerir un análisis cooperativo por parte de un equipo de arqueólogos, geólogos y geofísicos. Este tipo de enfoque es a menudo difícil debido a limitaciones económicas y de tiempo, lo que requiere que el arqueólogo a cargo del levantamiento esté bien versado en muchas de las técnicas discutidas en este libro.

## REFERENCIAS

Aitkin, M. J. 1958 Magnetic prospecting: 1—The Water Newton survey. *Archaeometry* 1 (1): 24–29.

1974 *Physics and Archaeology*. 2nd ed. Clarendon, Oxford.

Al-Qadi, I. L. and S. Lahouar. 2005 Measuring layer thicknesses with GPR—Theory to practice. *Construction and building materials* 19 (10): 763-772.

Annan, Peter A. 2005 GPR methods for hydrogeological studies. *Hydrogeophysics* (2005): 185-213.

Annan, A. P. and L. T. Chua 1992 Ground penetrating radar performance predictions. In *Ground Penetrating Radar*, J. A. Pilon (editor). Geological Survey of Canada, Paper 90-4: 5–13.

Annan, A. P. and S. W. Cosway 1992 Simplified GPR beam model for survey design. Extended abstract of 62<sup>nd</sup> Annual International Meeting of the Society of Exploration Geophysicists, New Orleans, October 25–29, 1992.

1994 GPR frequency selection. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*: 747–760. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.

Annan, A. P. and J. L. Davis 1977 Impulse radar applied to ice thickness measurements and freshwater bathymetry. Geological Survey of Canada, Report of Activities paper 77-1B: 117–124.

1992 Design and development of a digital ground penetrating radar system. In *Ground Penetrating Radar*, J. A. Pilon (editor). Geological Survey of Canada, Paper 90-4: 49–55.

Annan, A. P., Waller, W. M., Strangway, D.W., Rossiter, J. R., Redman, J. D. and R. D. Watts 1975 The electromagnetic response of a low-loss, 2-layer, dielectric earth for horizontal electric dipole excitation. *Geophysics* 40 (2): 285–298.

Arcone, Steven A. 1995 Numerical studies of the radiation patterns of resistivity loaded dipoles. *Journal of Applied Geophysics* 33: 39–52.

1996 High resolution of glacial ice stratigraphy; a ground-penetrating radar study of Pegasus Runway, McMurdo Station, Antarctica. *Geophysics* 61 (6): 1653-1663.

Arcone, Steven A., and Karl Kreutz 2009 GPR reflection profiles of Clark and Commonwealth Glaciers, Dry Valleys, Antarctica. *Annals of Glaciology* 50 (51): 121-129.

Aspinall, Arnold, Gaffney, Chris and Armin Schmidt 2009 *Magnetometry for archaeologists*. AltaMira Press, Latham, Maryland.

ASTM International 2003 Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation. D6432-99. <http://www.astm.org>.

Baker, P. L. 1991 Response of ground-penetrating radar to bounding surfaces and lithofacies variations in sand barrier sequences. *Exploration Geophysics* 22: 19–22.

Balanis, Constantine A. 1989 *Advanced Engineering Electromagnetics*. Wiley, New York.

Barone, P.M., Bellomo, T., Mattei, E. Lauro, S.E. and E. Pettinelli 2011 Ground-penetrating radar in the Regio III (Pompeii, Italy). *Archaeological Prospection* 18: 187–194

Basson, U., Enzel, Y., Amit, R. and Z. Ben-Avraham 1994 Detecting and mapping recent faults with a ground-penetrating radar in the alluvial fans of the Arava Valley, Israel. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar: 777–788*, Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.

Batey, Richard A. 1987 Subsurface interface radar at Sephphoris, Israel. *Journal of Field Archaeology* 14 (1): 1–8.

Belina, F.A., Dafflon, B., Tronicke, J. and K. Holliger 2009 Enhancing the vertical resolution of surface georadar data. *Journal of Applied Geophysics* 68 (2009) 26–35

Benech, Christophe 2007 New approach to the study of city planning and domestic dwellings in the ancient Near East. *Archaeological Prospection* 14: 87-103.

Berard, Brooke A. and Jean-Michel Maillol 2007 Multi-offset ground penetrating radar data for improved imaging in areas of lateral complexity—Application at a Native American site. *Journal of Applied Geophysics* 62 (2):167-177.

2008 Common- and multi-offset ground-penetrating radar study of a Roman villa, Tourega, Portugal. *Archaeological Prospection* 15: 32–46.

Beres, L. and H. Haeni 1991 Application of ground-penetrating radar methods in hydrogeologic studies. *Groundwater* 29 (3): 375–386.

Beres, Milan, Huggenberger, Peter, Green, Alan G. and Heinrich Horstmeyer 1999 Using two and three-dimensional georadar methods to characterize glaciofluvial architecture. *Sedimentary Geology* 129: 1–24.

Bernabini, M., Brizzolari, E., Orlando, L. and G. Santellani 1994 Application of ground penetrating radar on coliseum pillars. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar: 547–558*. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.

Bevan, B. W. 1977 Ground-penetrating radar at Valley Forge. *Geophysical Survey Systems*, North Salem, New Hampshire.

1991 The search for graves. *Geophysics* 56 (9): 1310–1319.

1998 Geophysical Exploration for Archaeology: An Introduction to Geophysical Exploration. Midwest Archaeological Center Special Report No. 1. National Park Service, Lincoln, Nebraska.

2000 An early geophysical survey at Williamsburg, USA. *Archaeological Prospection* 7: 51–58.

Bevan, Bruce and Jeffrey Kenyon 1975 Ground-penetrating radar for historical archaeology. *MASCA Newsletter* 11 (2): 2–7.

Birkeland, Peter 1999 *Soils and Geomorphology*, 3rd Edition. Oxford University Press, New York.

Bjelm, L. 1980 Geologic interpretation of SIR data from a peat deposit in northern Sweden. Unpublished manuscript, Lund Institute of Technology, Department of Engineering Geology, Lund, Sweden.

Bogorodsky, V. V., Bentley, C. R. and P. E. Gudmandsen 1985 *Radioglaciology*. Reidel, Dordrecht.

Bongiovanni, María, Matías de la Vega, Victoria and Néstor Bonomo. 2011 Contribution of the resistivity method to characterize mud walls in a very dry region and comparison with GPR. *Journal of Archaeological Science* 38 (9): 2243–2250.

Boniger, U. and J. Tronicke 2010 Improving the interpretability of 3D GPR data using target-specific attributes: application to tomb detection. *Journal of Archaeological Science* 37: 672–679.

Booth, Adam D., Clark, Roger A., Hamilton, Ken and Tavi Murray 2010 Multi-offset ground penetrating radar methods to image buried foundations of a Medieval town wall, Great Yarmouth, UK. *Archaeological Prospection* 17: 103–116.

Booth, Adam D., Linford, Neil T., Clark, Roger A. and Tavi Murray 2008 Three-dimensional, multi-offset ground-penetrating radar imaging of archaeological targets. *Archaeological Prospection* 15 (2): 93–112.

Bridge, J. S., Alexander, J. Collier, R. E. L., Gawthorpe, R. L. and J. Jarvis 1995 Ground-penetrating radar and coring used to study the large-scale structure of point-bar deposits in three-dimensions. *Sedimentology* 42: 839–852.

Bristow, C. S. and H. M. Jol 2003 *Ground Penetrating Radar in Sediments*. Geological Society Special Publication No. 211, The Geological Society, London.

Bristow, C., J. Pugh and T. Goodall 1996 Internal structure of aeolian dunes in Abu Dhabi determined using ground-penetrating radar. *Sedimentology* 43: 995–1003.

Brown, Joel, Nichole, Josh, Steinbronn, Leah and John Bradford 2009 Improved GPR interpretation through resolution of lateral velocity heterogeneity: Example from an archaeological site investigation. *Journal of Applied Geophysics* 68(1): 3–8.

Bruno, David and Julian Thomas 2008 *Landscape Archaeology: Introduction*. In David Bruno and Julian Thomas *Handbook of Landscape Archaeology*, Left Coast Press, Walnut Creek, California: 27-43.

Bruschini, Claudio, Gros, Bertrand, Buere, Frederic, Piece, Pierre-Yves and Oliver Carmona 1998 Ground-penetrating radar and imaging metal detector for anti-personnel mine detection. *Journal of Applied Geophysics* 40: 59–71.

Bucker, Frank, Gurtner, Manuela, Hortsmeyer, Heinrich Hortsmeyer, Green, Alan G. and Peter Huggenberger 1996 Three-dimensional mapping of glaciofluvial and deltaic sediments in central Switzerland using ground penetrating radar. In *Proceedings of the 6th International Conference on Ground Penetrating Radar*: 45–50. Department of Geoscience and Technology, Tohoku University, Sendai, Japan.

Buderi, R. 1996 *The Invention That Changed the World*. Simon & Schuster, New York.

Butler, D. K., Simms, J. E. and D. S. Cook 1994 Archaeological geophysics investigation of the Wright Brothers 1910 hanger site. *Geoarchaeology: An International Journal* 9 (6): 437–466.

Cai, Jun and George A. McMechan 1994 Ray-based synthesis of bistatic ground penetrating radar profiles. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*, 19–29. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.

Calia, Angela, Giovanni, Masini, Nicola, Matera, Loredana, Persico, Raffaele and Maria Sileo 2012 Integrated prospecting in the crypt of the Basilica of Saint Nicholas in Bari, Italy. *Journal of Geophysical Engineering* 9: 271–281.

Campana, Stefano and Salvatore Piro. 2008 *Seeing the Unseen*. Geophysics and Landscape Archaeology. Taylor & Francis, London.

Carcione, José M. 1996 Radiation patterns for 2-D GPR forward modeling. *Geophysics* 63 (2): 424–430.

Carrozzo, M. T., Leucci, G., Negri, S. and L. Nuzzo. 2003 GPR Survey to understand the stratigraphy of the Roman Ships Archaeological Site (Pisa, Italy). *Archaeological Prospection* 10: 57–72.

Cassidy, N. J., Russell, A. J., Pringle, J. K. and J. L. Carrivick 2004 GPR-derived architecture of large-scale Icelandic Jokulhlaup deposits, north-east Iceland. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar*: June 21–24, Delft, The Netherlands, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 581–584.

Chignell, Richard J. 2004 The radio licensing of GPR systems in Europe. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar*: June 21–24, Delft, The Netherlands, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 3–6.

Clark, Anthony 1990 *Seeing Beneath the Soil*. Batsford, London.

Clarke, M., Utsi, Erica and Vincent Utsi 1999 Ground-penetrating radar investigations at North Ballachulish Moss, Scotland. *Archaeological Prospection* 6: 107–121.

Collins, Mary E. 1992 Soil taxonomy: A useful guide for the application of ground penetrating radar. In *Fourth International Conference on Ground-Penetrating Radar: June 8–13, Rovaniemi, Finland*, Pauli Hanninen and Sini Autio (editors). Geological Survey of Finland Special Paper 16: 125–132.

Conyers, Lawrence B. 1995 The use of ground-penetrating radar to map the buried structures and landscape of the Ceren site, El Salvador. *Geoarchaeology: An International Journal* 10 (4): 275–299.

2004 Moisture and soil differences as related to the spatial accuracy of GPR amplitude maps at two archaeological test sites. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar: June 21–24, Delft, The Netherlands*, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 435–438.

2006a Ground-penetrating radar techniques to discover and map historic graves, *Historical Archaeology* 40 (3): 64-73.

2006b Ground-penetrating radar. In *Remote Sensing in Archaeology: A Explicitly North American Perspective*. Edited by Jay K. Johnson, The University of Alabama Press, Tuscaloosa, Alabama, pp. 131-160.

2009 Ground-penetrating radar for landscape archaeology. In *Seeing the Unseen-Geophysics and Landscape Archaeology*. Edited by Stefano Campana and Salvatore Piro. CRC Press/Balkema: Taylor and Francis Group, London., pp 245-256.

2010 Ground-penetrating radar for anthropological research. *Antiquity* 84 (323): 175-184.

2011: Ground-penetrating radar mapping of non-reflective archaeological features. In *Proceedings of the 9th International Conference on Archaeological Prospection*, Sept. 19-24, Izmir, Turkey. Edited by Mahmut Drahor and Meric Berge. *Archaeology and Art Publications*, Istanbul, Turkey, pp. 177-179.

2012a *Interpreting Ground-penetrating Radar for Archaeology*. Left Coast Press, Walnut Creek, California.

2012b Advances in ground-penetrating radar exploration in southern Arizona. *Journal of Arizona Archaeology* 22: 80-91.

2013: An Upper Paleolithic landscape analysis of coastal Portugal using ground-penetrating radar. *Archaeological Prospection* 20 (1): 16-26.

Conyers, Lawrence B. and Catherine M. Cameron 1998 Finding buried archaeological features in the American Southwest: New ground-penetrating radar techniques and three-dimensional computer mapping. *Journal of Field Archaeology* 25 (4): 417–430.

Conyers, Lawrence B. and Samuel Connell 2007 The applicability of using ground-penetrating radar to discover and map buried archaeological sites in Hawaii. *Hawaiian Archaeology* 11: 62-77.

Conyers, Lawrence B., Ernenwein, Eileen G. and Leigh-Ann Bedal 2002 Ground-penetrating radar discovery at Petra, Jordan. *Antiquity* 76: 339-340.

Conyers, Lawrence B., Ernenwein, Eileen, Lowe, Kelsey and Michael Grealy 2008 Electromagnetic conductivity mapping for site prediction in meandering river floodplains. *Archaeological Prospection* 14 (5): 24-35.

Conyers, Lawrence B., and Dean Goodman 1997 *Ground-penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists*. AltaMira, Walnut Creek, California.

Conyers, Lawrence B. and Juerg Leckebusch 2010 Geophysical archaeology research agendas for the future: Some ground-penetrating radar examples. *Archaeological Prospection* 17(2): 117-123.

Conyers, Lawrence B. and Jeffrey E. Lucius 1996 Velocity analysis in archaeological ground-penetrating radar studies. *Archaeological Prospection* 3: 312–333.

Conyers, Lawrence B. and Hartmut Spetzler 2002 *Geophysical Exploration at Ceren. In Before the Volcano Erupted*, Payson Sheets (editor). University of Texas Press, Austin: 24–32.

Cook, J. C. 1973 Radar exploration through rock in advance of mining. *Transactions of the Society of Mineral Engineering AIME* 254: 140–146.

1975 Radar transparencies of mines and tunnel rocks. *Geophysics* 40: 865–885.

Dalan, Rinita A. 2007 A review of the role of magnetic susceptibility in archaeogeophysical studies in the USA: recent developments and prospects. *Archaeological prospection* 15.1: 1-31.

Damiata, B. N., Steinberg, J. M., Bolender, D. J. and G. Zoëga 2012 Imaging skeletal remains with ground-penetrating radar: Comparative results over two graves from Viking age and Medieval churchyards on the Stóra-Seyla Farm, northern Iceland. *Journal of Archaeological Science* 40: 268-278.

Daniels, David J. 2004 GPR for landmine detection, an invited review paper. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar: June 21–24, Delft, The Netherlands*, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 7–10.

2005 *Ground Penetrating Radar*. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Davenport, G. Clark 2001a Where Is It? Searching for Buried Bodies and Hidden Evidence. SportWork Press, Church Hill, Maryland.

2001b Remote sensing applications in forensic investigations. *Historical Archaeology* 35 (1): 87–100.

Davis, J. L., and A. P. Annan 1989 Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysics* 37: 531–551.

1992 Applications of ground penetrating radar to mining, groundwater, and geotechnical projects: selected case histories. In Pilon, J. S., Editor, *Ground Penetrating Radar*. Geological Survey of Canada, Paper 90-4: 49–56.

Davis, J. Les, Heginbottom, J. Alan, Annan, Peter A., Daniels, Rod S., Berdal, Tom, Duncan, Kirsty E., Lewin Peter K., Oxford, John S., Roberts, Noel, Skehel, John J. and Charles R. Smith 2000 Ground-penetrating radar surveys to locate 1918 Spanish flu victims in permafrost. *Journal of Forensic Science* 45(1): 68–76.

Delaney, Allan J., Acone, Steve A., O'Bannon, Allen and John Wright 2004 Crevasse detection with GPR across the Ross Ice Shelf, Antarctica. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar: June 21–24, Delft, The Netherlands*, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 777–780.

Deng, Shikun, Zhengrong, Zuo and Huilian Wang 1994 The application of ground penetrating radar to detection of shallow faults and caves. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar: 1115–1133*. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.

Dixon, K. J., Novak, S. A., Robbins, G., Schablitsky, J. M., Scott, G. R. and G.L. Tasa 2010 Men, women, and children starving: Archaeology of the Donner family camp. *American Antiquity* 75(3): 627–656.

Dobrin, M. B. 1976 *Introduction to Geophysical Prospecting*. McGraw-Hill, New York.

Dolphin, L. T., Bollen, R. L. and G. N. Oetzel 1974 An underground electromagnetic sounder experiment. *Geophysics* 39: 49–55.

Doolittle, J. A. 1982 Characterizing soil map units with the ground-penetrating radar. *Soil Survey Horizons* 23: 3–10.

Doolittle, James A. and Loris E. Asmussen 1992 Ten years of applications of ground penetrating radar by the United States Department of Agriculture. In *Fourth International Conference on Ground-Penetrating Radar: June 8–13, Rovaniemi, Finland*, Pauli Hanninen and Sini Autio (editors). Geological Survey of Finland Special Paper 16: 139–147.

Doolittle, J. A. and M. E. Collins 1995 Use of soil information to determine application of ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics* 33: 101–108.



Doolittle, James A. and W. Frank Miller 1991 Use of ground-penetrating radar techniques in archaeological investigations. In *Applications of Space-Age Technology in Anthropology*. Conference Proceedings Nov. 28, 1990, 2nd ed. NASA Science and Technology Laboratory, Stennis Space Center, Mississippi.

Doolittle, James A., Minzenmayer, F.E., Waltman, S.W., Benham, E.C., Tuttle, J.W. Tuttle and S.D. Peasleeet 2007 Ground-penetrating radar soil suitability map of the conterminous United States. *Geoderma* 141.3:416-421.

Drahor, Mahmut G., Berge, Meric A. and Caner Öztürk 2011 Integrated geophysical surveys for the subsurface mapping of buried structures under and surrounding of the Agios Voukolos Church in Izmir, Turkey *Journal of Archaeological Science* 38: 2231-2242.

Engheta, N., Papas, C. H. Papas, and C. Elachi 1982 Radiation patterns of interfacial dipole antennas. *Radio Science* 17 (6): 1557–1566.

Ernenwein, Eileen G. 2006 Imaging in the ground-penetrating radar near-field zone: a case study from New Mexico, USA. *Archaeological Prospection* 13 (2):154-156.

Ernenwein, Eileen G. and Kenneth L. Kvamme 2008 Data processing issues in large-area GPR surveys: correcting trace misalignments, edge discontinuities and striping. *Archaeological Prospection* 15 (2): 133-149.

Fenner, Thomas J. 1992 Recent advances in subsurface interface radar technology. In *Fourth International Conference on Ground-Penetrating Radar: June 8–13, Rovaniemi, Finland*, Pauli Hanninen and Sini Autio (editors). Geological Survey of Finland Special Paper 16: 13–19.

Fischer, Peter M., Follin, S. G. W. and P. Ulriksen 1980 Subsurface interface radar survey at Hala Sultan Tekke, Cyprus. In *Applications of Technical Devices in Archaeology*, Peter M. Fischer (editor). *Studies in Mediterranean Archaeology* 63: 48–51.

Fisher, E., McMechan, G. A. and A. P. Annan 1992 Acquisition and processing of wide-aperture ground-penetrating radar data. *Geophysics* 57: 495–504.

Fisher, S. C., Stewart, R. R. and H. M. Jol 1994 Processing ground penetrating radar data. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*: 661–675. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.

Forte, E. and M. Pipan 2008 Integrated seismic tomography and ground-penetrating radar (GPR) for the high-resolution study of burial mounds (tumuli). *Journal of Archaeological Science* 35 (9): 2614-2623.

Freeland, Robert S., Yoder, Ronald E. and John T. Ammons 1998 Mapping shallow underground features that influence site-specific agricultural production. *Journal of Applied Geophysics* 40: 19–27.

Fuchs, Michael, Beres, Milan and Flavio S. Anselmetti 2004 Sedimentological studies of western Swiss lakes with high-resolution reflection seismic and amphibious GPR profiling. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating*

Radar: June 21–24, Delft, The Netherlands, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 577–580.

Fullagar, P. K. and D. Livleybrooks 1994 Trial of tunnel radar for cavity and ore detection in the Sudbury Mining Camp, Ontario. In Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar: 883–894. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.

Gaffney, C. 2008 Detecting trends in the prediction of the buried past: A review of geophysical techniques in archaeology *Archaeometry* 50 (2): 313-336.

Gaffney, Chris, Gaffney, Vince, Neubauer, Wolfgang, Baldwin, Eamonn, Chapman, Henry, Garwood, Paul, Moulden, Helen, Sparrow, Tom, Bates, Richard, Locker, Klaus, Hinterleitner, Alois, Trinks, Immo, Nau, Erich, Zitz, Thomas, Floery, Sebastian, Verhoeven, Geert and Michael Doneus 2012 The Stonehenge hidden landscapes project. *Archaeological Prospection* 19: 147–155.

Gaffney, Chris and John Gater 2003 *Revealing the Buried Past: Geophysics for Archaeologists*. Tempus Publishing, Stroud, Gloucestershire, England.

Geophysical Survey Systems 1987 Operations Manual for Subsurface Interface Radar System-3. Manual #MN83-728. Geophysical Survey Systems, North Salem, New Hampshire.

2000 Radan for Windows: User's Manual MN43-162. Geophysical Survey Systems, North Salem, New Hampshire.

Gerber, Rolf, Felix-Henningsen, Peter, Salat, Christina and Andreas Junge 2004 Investigation of the GPR reflection pattern for shallow depths on a test site. In Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar: June 21–24, Delft, The Netherlands, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 275–278.

Goodman, Dean 1994 Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology. *Geophysics* 59: 224–232.

1996 Comparison of GPR time slices and archaeological excavations. In Proceedings of the Sixth International Conference on Ground Penetrating Radar: 77–82. Department of Geoscience and Technology, Tohoku University, Sendai, Japan.

2009 The application of GPR overlay analysis in archaeological prospection: Discovery at the Japanese Imperial Family tombs in Miyazaki Prefecture. *ArchéoSciences* 1:295-297.

Goodman, Dean and Salvatore Piro 2013 *GPR Remote Sensing in Archaeology, Geotechnologies and the Environment*, Volume 9, Springer Science, New York.

Goodman, D. and Y. Nishimura 1993 A ground-radar view of Japanese burial mounds. *Antiquity* 67: 349–354.

Goodman, D., Nishimura, Y. and J. D. Rogers 1995 GPR time-slices in archaeological prospection. *Archaeological Prospection* 2: 85–89.

Goodman, Dean, Nishimura, Yashushi, Hongo, Hiromichi and Okita Maasaki 1998 GPR Amplitude rendering in archaeology. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Ground-penetrating Radar*, May 27–30, 1998. University of Kansas, Lawrence, Kansas, USA. Radar Systems and Remote Sensing Laboratory, University of Kansas: 91–92.

Goodman, Dean, Piro, Salvatore, Nishimura, Yasushi, Patterson, Helen and Vince Gaffney 2004 Discovery of a 1st century A.D. Roman amphitheater and other structures at the Forum Novum by GPR. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 9: 35–41.

Goodman, Dean, Steinberg, John, Damiata, Brian, Nishimura, Yasushi, Schneider, Kent, Hiromichi, Hongo and Noriaki Higashi 2006 GPR Overlay analysis for archaeological prospection. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating Radar*, Columbus, Ohio, June 19-22,

Grandjean, G., Gourry, J. C. and A. Bitri 2000 Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications: study on a test site *Journal of Applied Geophysics* 45 (3): 141-156.

Grasmueck, Mark 1994 Application of seismic processing techniques to discontinuity mapping with ground-penetrating radar in crystalline rock of the Gotthard Massif, Switzerland. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*: 1135–1139. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.

1996 3D ground-penetrating radar applied to fracture imaging in gneiss. *Geophysics* 61: 1050–1064.

Grasmueck, Mark, Weger, Ralf and Heinrich Horstmeyer 2004 Full resolution 3D GPR imaging for geoscience and archaeology. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar*: June 21–24, Delft, The Netherlands, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 329–332.

Grealy, Michael 2006 Resolution of ground-penetrating radar reflections at differing frequencies, *Archaeological Prospection* 13 (2): 142-146.

Haeni, F. P., Buursink, Marc L., Costa, John E., Melcher, Nick B., Cheng, Ralph T. and William J. Plant 2000 Ground-penetrating radar methods used in surface-water discharge measurements. In *Eighth International Conference on Ground-penetrating radar proceedings*. SPIE—The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington: 494–500.

Hatton, L., Worthington, M. H. and J. Makin 1986 *Seismic Data Processing Theory and Practice*. Blackwell Scientific Publications, Boston, Massachusetts.

Heinz, J. and T. Aigner 2003 Three-dimensional GPR analysis of various Quaternary gravel-bed braided river deposits (southwestern Germany). In *Ground Penetrating Radar in Sediments*, C. S. Bristow and H. M. Jol (editors). Geological Society Special Publication No. 211, The Geological Society, London 99–110.

Hildebrand, J. A., Wiggins, S. M., Heinkart, P. C. and L. B. Conyers 2002 Comparison of seismic reflection and ground-penetrating radar imaging at The Controlled Archaeological Test Site, Champaign, Illinois. *Archaeological Prospection* 9: 9–21.

Hugenschmidt, J. 2002 Concrete bridge inspection with a mobile GPR system. *Construction and Building Materials* 16(3): 147–154.

Hugenschmidt, J., Partl, M. N. and H. de Witte 1998 GPR inspection of a mountain motorway in Switzerland. *Journal of Applied Geophysics* 40: 95–104.

Huggenberger, Peter, Meier, Edi and Milan Beres 1994 Three-dimensional geometry of fluvial gravel deposits from GPR reflection patterns; a comparison of results of three different antenna frequencies. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*: 805–815. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.

Imai, Tsuneo, Sasaki, Toshihiko and Takashi Kanemori 1987 Use of ground-probing radar and resistivity surveys for archaeological investigations. *Geophysics* 52: 137–150.

Irving, James, and Rosemary Knight 2006 Numerical modeling of ground-penetrating radar in 2-D using MATLAB. *Computers & Geosciences* 32 (9): 1247–1258.

Isaacson, John R. Hollinger, Eric, Gundrum, Darrell and Joyce Baird 1999 A controlled archaeological test site facility in Illinois: Training and research in archaeogeophysics. *Journal of Field Archaeology* 26 (2): 227–236.

Ivashov, Sergey I., Vyacheslav, Sablin N., Sheyko, Anton P. and Igor A. Vasilev 1998 GPR for detection and measurement of filled up excavations for forensic applications. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Ground-penetrating Radar*, May 27–30, 1998. University of Kansas, Lawrence, Kansas, USA. Radar Systems and Remote Sensing Laboratory, University of Kansas:87–89.

Jackson, J. D. 1977 *Classical Electrodynamics*. Wiley, New York.

Jeng, Yih, Li, Yi-Wei, Chen, Chih-Sung and Hsin-Yi Chien 2009 Adaptive filtering of random noise in near-surface seismic and ground-penetrating radar data *Journal of Applied Geophysics* 68: 36–46.

Johnson, Jay K. 2006 *Remote Sensing in Archaeology: An Explicitly North American Perspective*. University Alabama Press, Tuscaloosa, Alabama.

Johnson, R.W., Glaccum, R. and R. Wotasinski 1980 Application of ground penetrating radar to soil survey. *Soil Crop Science Society Proceedings* 39: 68–72.

Jol, Harry M. 2009 *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*. Elsevier Science Limited Kidlington, UK.

Jol, Harry M. and Arlen Albrecht 2004 Searching for submerged lumber with ground penetrating radar: Rib Lake, Wisconsin, USA. In Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar: June 21–24, Delft, The Netherlands, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 601–604.

Jol, Harry M. and Charlie S. Bristow 2003 GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. In Ground Penetrating Radar in Sediments, C. S. Bristow and H. M. Jol (editors). Geological Society Special Publication No. 211, The Geological Society, London 9–27.

Jol, H. M. and D. G. Smith 1992 Ground penetrating radar of northern lacustrine deltas. *Canadian Journal of Earth Science* 28: 1939–1947.

Jol, H. M., Smith, D. G. and R. A. Meyers 1996 Digital ground penetrating radar (GPR): A new geophysical tool for coastal barrier research (examples from the Atlantic, Gulf and Pacific Coasts U.S.A.). *Journal of Coastal Research* 12: 959–968.

Keller, George V. 1988 Rock and mineral properties. In *Applications in Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, edited by M. N. Nabighian: 13–24. Volume 1. Society of Exploration Geophysics. Tulsa, Oklahoma.

Kemerait, Robert C. 1994 Ground penetrating radar considerations for optimizing the data collection scenario. In Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar: 761–775. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.

Kenyon, Jeff L. 1977 Ground-penetrating radar and its application to a historical archaeological site. *Historical Archaeology* 11: 48–55.

Kinlaw, Alton E., Zajac, Will and Lawrence B. Conyers 2007 Use of ground-penetrating radar to image burrows of the Gopher Tortoise. *Herpetological Review* 38 (1): 50-56.

Kraus, J. D. 1950 *Antennas*. McGraw-Hill, New York.

Kvamme, Kenneth L. 2003 Geophysical surveys as landscape archaeology. *American Antiquity* 63 (3) 435–457.

2005 Integrating multidimensional geophysical data. *Archaeological Prospection* 13 (1): 57-72.

2006 Magnetometry: Nature's gift to archaeology. In *Remote Sensing in Archaeology: An Explicitly North American Perspective*. Edited by Jay K. Johnson, The University of Alabama Press, Tuscaloosa: 205-233.

LaFleche, P. T., Todoschuck, J. P., Jensen, O.G. and A. S. Judge 1991 Analysis of ground-penetrating radar data: Predictive deconvolution. *Canadian Geotechnical Journal* 28 (1): 134–139.

Lanz, Eva, Jemi, Laura, Miller, Roger, Green, Alan, Pugin, Andre and Peter Huggenberger 1994 Integrated studies of Swiss waste disposal sites: Results from georadar and other geophysical surveys. In Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar: 1261–1274. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.

Leckebusch, Jürg 2000 Two and three-dimensional ground-penetrating radar surveys across a medieval choir: A case study in archaeology. *Archaeological Prospection* 7:189–200.

2003 Ground-penetrating radar: A modern three-dimensional prospection method. *Archaeological Prospection* 10: 213–240.

2011 Problems and solutions with GPR data interpretation: Depolarization and data continuity. *Archaeological Prospection* 18 (4): 303–308.

Leckebusch, Jürg and Ronald Peikert 2001 Investigating the true resolution and three-dimensional capabilities of ground-penetrating radar data in archaeological surveys: Measurements in a sand box. *Archaeological Prospection* 8: 29–40.

Lehmann, Frank, and Alan G. Green 1999 Semiautomated georadar data acquisition in three-dimensions. *Geophysics* 64 (3): 719–731.

2000 Topographic migration of georadar data: Implications for acquisition and processing. *Geophysics* 65 (3): 836–848.

Lehmann, Frank, Hortsmeier, Heinrich, Green, Alan and John Sexton 1996 Georadar data from the northern Sahara Desert: Problems and processing strategies. In Proceedings of the Sixth International Conference on Ground Penetrating Radar: 51–56. Department of Geoscience and Technology, Tohoku University, Sendai, Japan.

Lehmann, Frank, Boerner, David E., Holliger, Klaus and Alan G. Green 2000 Multicomponent georadar data: Some important implications for data acquisition and processing. *Geophysics* 65 (5): 1542–1552.

Leopold, Matthias and Jorg Volkel 2003 GPR images of periglacial slope deposits beneath peatbogs in the Central European Highlands, Germany. In *Ground Penetrating Radar in Sediments*, C. S. Bristow and H. M. Jol (editors). Geological Society Special Publication No. 211, The Geological Society, London 181–189

Leucci, Giovanni and Sergio Negri 2006 Use of ground-penetrating radar to map subsurface archaeological features in an urban area. *Journal of Archaeological Science* 33 (4): 502–512.

Leucci, Giovanni, Masini, Nicola and Raffaele Persico 2012 Time–frequency analysis of GPR data to investigate the damage of monumental buildings. *Journal of Geophysical Engineering* 9: S81–S91.

Linford, N.T. and P.K. Linford 2004 Ground penetrating radar survey over a Roman Building at Groundwell Ridge, Blunsdon St. Andrew, Swindon, UK. *Archaeological Prospection* 11: 49–55.

Loker, W. M. 1983 Recent geophysical explorations at Ceren. In *Archaeology and Volcanism in Central America*, Payson D. Sheets (editor): 254–274. University of Texas Press, Austin.

Lucius, Jeffrey H. and Michael H. Powers 2002 GPR data processing computer software for the PC. USGS Open File Report 02-166, Washington D.C.

Maijala, P. 1992 Application of some seismic data processing methods to ground penetrating radar data. In *Fourth International Conference on Ground-Penetrating Radar: June 8–13, Rovaniemi, Finland*. Pauli Hanninen and Sini Autio (editors). Geological Survey of Finland Special Paper 16: 103–110.

Malagodi, S., Orlando, L. and S. Piro 1996 Approaches to increase resolution of radar signal. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Ground Penetrating Radar: 283–288*. Department of Geoscience and Technology, Tohoku University, Sendai, Japan.

Malagodi, S., Orlando, L. and F. Rosso 1996 Location of archaeological structures using GPR method: Three-dimensional data acquisition and radar signal processing. *Archaeological Prospection* 3: 13–23.

Martinaud, Michel, Frappa, Michel and Remy Chapoulie 2004 GPR signals for the understanding of the shape and filling of man-made underground masonry. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar: June 21–24, Delft, The Netherlands*, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 439–442.

Marukawa, Yuzo and Hiroyuki Kamei 1999 Estimation of the systematic error of three-component geomagnetic data using the ABIC method. *Archaeological Prospection* 6: 135–145.

McGeary, Susan, Daly, Julia F. and David E. Krantz 1998 High resolution imaging of Quaternary coastal stratigraphy using ground penetrating radar. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Ground-penetrating Radar, May 27–30, 1989*. University of Kansas, Lawrence Kansas, USA. Radar Systems and Remote Sensing Laboratory, University of Kansas: 273–277.

Meats, C. 1996 An appraisal of the problems involved in three-dimensional ground-penetrating radar imaging of archaeological features. *Archaeometry* 38 (2): 359–379.

Milligan, Robert and Malcolm Atkin 1993 The use of ground-probing radar within a digital environment on archaeological sites. In *Computing the Past: Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, Jens Andresen, Torsten Madsen, and Irwin Scollar (editors): 21–33. Aarhus University Press.

Milsom, John, and Asger Eriksen 2011 *Ground penetrating radar. Field Geophysics, Fourth Edition*. Published on-line John Wiley and Sons: 185-209.

Moffat, D. L. and R. J. Puskar 1976 A subsurface electromagnetic pulse radar. *Geophysics* 41: 506–518.

Moran, Mark, Arcone, Steve A., Delaney, Allen J. and Roy Greenfield 1998 3-D migration/array processing using GPR data. In Proceedings of the Seventh International Conference on Ground-penetrating Radar, May 27–30, 1998. University of Kansas, Lawrence, Kansas, USA. Radar Systems and Remote Sensing Laboratory, University of Kansas: 225–228.

Neal, Adrian 2004 Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-science Reviews* 66 (3): 261-330.

Neubauer, W., Seren, A., Eder-Hinterleitner, S. and P. Melichar 2002 Georadar in the Roman civil town Carnuntum, Austria: An approach for archaeological interpretation of GPR data. *Archaeological Prospection* 9: 135–156.

Neves, Fernando A., Miller, John A. and Mark S. Roulston 1996 Source signature deconvolution of ground penetrating radar data. In Proceedings of the Sixth International Conference on Ground Penetrating Radar: 573–578. Department of Geoscience and Technology, Tohoku University, Sendai, Japan.

Nobes, David C. 1999 Geophysical surveys of burial sites: A case study of the Oaro Urupa. *Geophysics* 64 (2): 357–367.

Noon, David A., Longstaff, Dennis and Richard J. Yelf 1994 Advances in the development of step frequency ground penetrating radar. In Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar: 117–131. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.

Novo, Alexandre, Lorenzo, Henrique, Rial, Fernando I. and Mercedes Solla 2010 Three-dimensional ground-penetrating radar strategies over an indoor archaeological site: Convent of Santo Domingo (Lugo, Spain). *Archaeological Prospection* 17 (4): 213-222.

Nuzzo, Luigia 2005 Identification and removal of above-ground spurious signals in GPR archaeological prospecting. *Archaeological Prospection* 12 (2): 93-103.

Olhoeft, G. R. 1981 Electrical properties of rocks. In *Physical Properties of Rocks and Minerals*, Y. S. Touloukian, W. R. Judd, and R. F. Roy (editors): 257–330. McGraw-Hill, New York.

1986 Electrical properties from 10-3 to 109 Hz-Physics and chemistry. In Proceedings of the 2nd International Symposium of Physics and Chemistry of Porous Media, J. R. Bananvar, J. Koplik, and K. W. Winkler (editors): 281–298. Schlumberger-Doll, Ridgefield, Conn.

1994a Modeling out-of-plane scattering effects. In Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar, June 12–16, Kitchener, Ontario, Canada: 133–144. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Ontario, Canada.

1994b Geophysical observations of geological, hydrological and geochemical heterogeneity. In Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Boston, MA, March 27–31, 1994: 129–141.



1998 Electrical, magnetic and geometric properties that determine ground penetrating radar performance. In Proceedings of the 7th International Conference on Ground-Penetrating Radar: 177–182. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.

Olhoeft, G. R. and D. E. Capron 1993 Laboratory measurements of the radio frequency electrical and magnetic properties of soils from near Yuma, Arizona. U.S. Geological Survey Open File Report 93-701. Washington, D.C.

Olson, C. G. and J. A. Doolittle 1985 Geophysical techniques for reconnaissance investigation of soils and surficial deposits in mountainous terrain. Soil Science Society of America Journal 49: 1490–1498.

Orlando, Luciana 2007 Georadar data collection, anomaly shape and archaeological interpretation: A case study from central Italy. Archaeological Prospection 14: 213–225.

Orlando, Luciana, and Evert Slob 2009 Using multicomponent GPR to monitor cracks in a historical building. Journal of Applied Geophysics 67 (4): 327–334.

Ovenden, S. M. 1994 Application of seismic refraction to archaeological prospecting. Archaeological Prospection 1 (1): 53–64.

Paniagua, Jesus, del Rio, Mariano and Montana Rufo 2004 Test site for the analysis of subsoil GPR signal propagation. In Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar: June 21–24, Delft, The Netherlands, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 751–754.

Pedley, H. M. and I. Hill 2003 The recognition of barrage and paludal tufa systems by GPR: case studies in the geometry and correlation of hidden Quaternary freshwater carbonate facies. In Ground Penetrating Radar in Sediments, C. S. Bristow and H. M. Jol (editors). Geological Society Special Publication No. 211, The Geological Society, London 207–223.

Perroud, Hervé and Martin Tygel 2005 Velocity estimation by the common-reflection-surface (CRS) method: Using ground-penetrating radar data. Geophysics 70 (6): B43–B52.

Pipan, M., Finetti, I. and L. Ferigo 1996 Multi-fold GPR techniques with applications to high-resolution studies: Two case histories. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics 1: 83–103.

Pipan, M., Baradello, L, Forte, E., Prizzon, A and I. Finetti 1999 2-D and 3-D processing and interpretation of multi-fold ground penetrating radar data: a case history from an archaeological site. Journal of Applied Geophysics 41: 271–292.

2001 Ground penetrating radar study of Iron Age tombs in southeastern Kazakhstan. Archaeological Prospection, 8(3): 141–155.

Piro, S., Goodman, D. and Y. Nishimura. 2003 The study and characterization of Emperor Traiano's villa (Atopiani di Arcinazzo, Roma) using high-resolution integrated geophysical surveys. *Archaeological Prospection* 10: 1–25.

Piro, S., Maureillo, P. and F. Cammarano. 2000 Quantitative integration of geophysical methods for archaeological prospection. *Archaeological Prospection* 7: 203–213.

Powers, M. H. and G. R. Olhoeft. 1994 GPRMODV2: One dimensional full waveform forward modeling of dispersive ground penetrating radar data. U.S. Geological Survey Open File Report 95-58. Washington, D.C.

1995 Waveform forward modeling of dispersive ground-penetrating radar. U.S. Geological Survey Open File Report 95-58, Washington, D.C.

Ranalli, Danilo, Scozzafava, Marco and Marco Tallini. 2004 Ground penetrating radar investigations for the restoration of historic buildings: The case study of the Collemaggio Basilica (L'Aquila, Italy). *Journal of Cultural Heritage* 5 (1): 91-99.

Rees, Huw V. and Jonathan M. Glover. 1992 Digital enhancement of ground probing radar data. In Pilon, J., Editor. *Ground Penetrating Radar*. Geological Survey of Canada Paper 90-4: 187–192.

Reynolds, John M. 2011 *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Wiley, New York.

Rhoades, J. D., Raats, P.A.C and R. S. Prather. 1976 Effects of liquid-phase electrical conductivity: Water content and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal* 40: 651–665.

Rojansky, Vladimir. 1979 *Electromagnetic Fields and Waves*. Dover, Mineola, New York.

Saaraenketo, Timo. 1998 Electrical properties of water in clay and silty soils. *Journal of Applied Geophysics* 40: 73–88.

Sala, Jacopo and Neil Linford. 2012 Processing stepped frequency continuous wave GPR systems to obtain maximum value from archaeological data sets. *Near Surface Geophysics* 10: 3-10.

Sandweiss, Daniel H., Kelly, Alice R., Belknap, Daniel F., Kelly, Joseph T., Rademaker, Kurt and David A. Reid. 2010 GPR identification of an early monument at Los Morteros in the Peruvian coastal desert. *Quaternary Research* 73 (3): 439-448.

Savvaïdis, A., Tsokas, G. M., Liritzis, Y. and M. Apostolou. 1999 The location and mapping of ancient ruins on the Castle of Lefkas (Greece) by resistivity and GPR methods. *Archaeological Prospection* 6: 63–73.

Schmidt, Armin. 2009 Electrical and magnetic methods in archaeological prospection. In S. Campana and S. Piro (eds) *Seeing the Unseen. Geophysics and Landscape Archaeology*: 67-81. London: Taylor & Francis Group.

2013 *Earth Resistance for Archaeologists*. AltaMira Press, Lanham, Maryland.

Schultz, John J. and Michael M. Martin 2011 Controlled GPR grave research: Comparison of reflection profiles between 500 and 250 MHz antennae. *Forensic Science International* 209: 64–69.

Schultz, John J., Collins, Mary E. and Anthony B. Falsetti. 2006 Sequential monitoring of burials containing large pig cadavers using ground-penetrating radar. *Journal of forensic sciences* 51 (3): 607–616.

Sellman, P. V., Arcone, S. A. and A. J. Delaney 1983 Radar profiling of buried reflectors and the ground water table. *Cold Regions Research and Engineering Laboratory Report* 83-11: 1–10.

Sensors and Software 1999 *Practical Processing of GPR Data*. Sensors and Software, Mississauga, Ontario.

Sheets, P. D., Loker, W. M., Spetzler, H. A. W and R. W. Ware 1985 Geophysical exploration for ancient Maya housing at Ceren, El Salvador. *National Geographic Research Reports* 20: 645–656.

Sheriff, R. E. 1984 *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*, 2<sup>nd</sup> Edition. Society of Exploration Geophysics, Tulsa, Oklahoma.

Sheriff, R. E. and L. P. Geldart 1985 *Exploration Seismology*. Cambridge University Press, New York.

Shih, S. F. and J. A. Doolittle 1984 Using radar to investigate organic soil thickness in the Florida Everglades. *Soil Science Society of America Journal* 48: 651–656.

Shrage, Jeff, Irving, James and Brad Artman 2004 Shot-profile migration of GPR data. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar: June 21–24, Delft, The Netherlands*, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 337–339.

Simmons, G., Strangway, D.W., Bannister, L., Baker R., Cubley, D., Torrance, G. L. and R. Watts 1972 The surface electrical properties experiment. In *Lunar Geophysics: Proceedings of a Conference at the Lunar Science Institute, Houston, Texas, 18–21 October 1971*, Z. Kopal and D. W. Strangway (editors). Reidel, Dordrecht: 258–271.

Smith, Derald G. and Harry M. Jol 1995 Ground penetrating radar: Antenna frequencies and maximum probable depths of penetration in Quaternary sediments. *Journal of Applied Geophysics* 33: 93–100.

Solla, Mercedes, Lorenzo, A., Novo A. and I. Rial 2010 Ground-penetrating radar assessment of the Medieval arch bridge of San Anton Galicia, Spain. *Archaeological Prospection* 17: 223–232.

Solla, Mercedes, Riveiro, Belen, Alvarez, Marcos X. and Pedro Arias 2012 Experimental forensic scenes for the characterization of ground-penetrating radar wave response. *Forensic Science International* 220: 50–58.

Stern, W. 1929 Versuch einer elektrodynamischen Dickenmessung von Gletschereis. *Beitrage zur Geophysik* 23: 292–333.

Stern, Nicola 2008 Stratigraphy, depositional environments, and paleolandscape reconstruction in landscape archaeology. In David Bruno and Julian Thomas, *Handbook of Landscape Archaeology*, Left Coast Press, Walnut Creek, California: 365-378.

Sternberg, Ben K. and James W. McGill 1995 Archaeology studies in southern Arizona using ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics* 33: 209–225.

Strongman, K. B. 1992 Forensic applications of ground-penetrating radar. In *Ground-Penetrating Radar*, J. Pilon (editor), Geological Survey of Canada Paper 90-4: 203–211.

Sun, J., and R. A. Young 1995 Scattering in ground-penetrating radar data. *Geophysics* 6 (5): 1378–1385.

Tamba, Robert 2012 Testing the use of geostatistics to improve data visualization: Case study on GPR survey of Tarragona's Cathedral Archaeological Prospection 19: 167–178.

Tillard, Sylvie and Jean-Claude Dubois 1995 Analysis of GPR data: wave propagation velocity determination. *Journal of Applied Geophysics* 33: 77–91.

Todoeschuck, J. P., LaFleche, P. T., Jensen, O. G., Judge, A. S. and J. S. Pilon 1992 Deconvolution of ground probing radar data. In *Ground-Penetrating Radar*, J. Pilon (editor). Geological Survey of Canada Paper 90-4: 227–230.

Tomizawa, Y., Arai, I., Hirose, M., Suzuki, T. and T. Ohhashi 2000 Archaeological survey using pulse compression subsurface radar. *Archaeological Prospection* 7 (4): 241–247.

Trinks, Immo, Johansson, Bernth, Gustafsson, Emilsson, Jesper, Friborg, Johan, Gustafsson, Christer, Nissen, Johan and Aloise Hinterleitner 2010 Efficient large-scale archaeological prospection using a true three-dimensional ground-penetrating radar array system. *Archaeological Prospection* 17: 175–186.

Turesson, Anita 2006 Water content and porosity estimated from ground-penetrating radar and resistivity. *Journal of Applied Geophysics* 58 (2): 99-111.

Turner, G. 1992 Propagation deconvolution. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Ground-Penetrating Radar* June 8–13, Rovaniemi, Finland. Geological Survey of Finland Special Paper 16.

Tyson, Peter 1994 Noninvasive excavation. *Technology Review* February/March 1994: 20–21.

Udphuay, Suwimon, Vivian, Paul L., Everett, Mark E. and Robert B. Warden 2010 Ground-penetrating radar imaging of twelfth century Romanesque foundations beneath the thirteenth century Gothic Abbey Church of Valmagne, France. *Archaeological Prospection* 17:199–212.

Urliksen, C. P. F. 1992 Multistatic radar system-MRS. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Ground-Penetrating Radar: June 8–13, Rovaniemi, Finland,*

Pauli Hanninen and Sini Autio (editors). Geological Survey of Finland Special Paper 16: 57–63.

Utsi, Erica 2004 Ground-penetrating radar time-slices from North Ballachulish Moss. *Archaeological Prospection* 11 (2): 65-75.

Valdes, Juan Antonio and Jonathan Kaplan 2000 Ground-penetrating radar at the Maya site of Kaminaljuyu, Guatemala. *Journal of Field Archaeology* 27 (3): 329–342.

Valle, S., Zanzi, L., Lenz, H. and H. M. Braun 2000 Very high resolution radar imaging with a stepped frequency system. In *Proceedings of the Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar*. Gold Coast Australia, May 23–26, 2000: 464–470.

Van Dam, R. I. and W. Schlager 2000 Identifying causes of ground-penetrating radar reflections using time-domain reflectometry and sedimentological analysis. *Sedimentology* 47: 435–449.

Van Dam, Remke L., Van Den Berg, Elmer H, Van Heterren, Sytze, Jeroen, Kasse, C., Kenter, A.M. and Koos Groen 2002 Influence of organic matter in soils on radar-wave reflection: sedimentological implications. *Journal of Sedimentary Research* 72: 341–352.

van Heteren, S., Fitzgerald, D.M. and P. S. McKinlay 1994 Application of ground-penetrating radar in coastal stratigraphic studies. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*: 869–881. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.

van Leusen, Martijn 1998 Dowsing and archaeology. *Archaeological Prospection* 5: 123–138.

van Overmeeren, R. A. 1994 High speed georadar data acquisition for groundwater exploration in the Netherlands. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*: 1057–1073. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.

1998 Radar facies of unconsolidated sediments in The Netherlands: A radar stratigraphy interpretation method for hydrogeology. *Journal of Applied Geophysics* 40: 1–18.

Vaughan, C. J. 1986 Ground-penetrating radar surveys used in archaeological investigations. *Geophysics* 51 (3): 595–604.

Vickers, Roger S., and Lambert T. Dolphin 1975 A communication on an archaeological radar experiment at Chaco Canyon, New Mexico. *MASCA Newsletter* 11 (1).

Vickers, Roger, Lambert Dolphin, and David Johnson 1976 Archaeological investigations at Chaco Canyon using subsurface radar. In Lyons, Thomas R. (editor), *Remote Sensing Experiments in Cultural Resource Studies*. Chaco Center, USDI-NPS and the University of New Mexico: 81–101.

von Hippel, Arthur R. 1954 *Dielectrics and Waves*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

Walden, A. T., and J. W. J. Hosken 1985 An investigation of the spectral properties of primary reflection coefficients. *Geophysical Prospecting* 33: 400–435.

Walker, J. W., Hulse, W. H. and D. W. Eckart 1973 Observations of the electrical conductivity of the tropical soils of western Puerto Rico. *Geological Society of America Bulletin* 84: 1743–1752.

Wensink, W. A. 1993 Dielectric properties of wet soils in the frequency range 1–3000 MHz. *Geophysical Prospecting* 41: 671–696.

Woodward, John, Ashworth, Philip J, Best, James L., Sambrook, Gregory H., Smith, Christopher and J. Simpson 2003 The use and application of GPR in sandy fluvial environments: methodological considerations. In *Ground Penetrating Radar in Sediments*, C. S. Bristow and H. M. Jol (editors). Geological Society Special Publication No. 211, The Geological Society, London 127–142.

Worsfold, R. D., Parashar, S. K. and T. Perrott 1986 Depth profiling of peat deposits with impulse radar. *Canadian Geotechnical Journal* 23: 142–154.

Wright, D. C., Olhoeft, G. R. and R. D. Watts 1984 GPR studies on Cape Cod. In *Proceedings of the National Water Well Association Conference on Surface and Borehole Geophysical Methods*: 666–680. San Antonio, Texas.

Wright, D. L. and J. W. Lane, Jr. 1998 Mapping hydraulically permeable fractures using directional borehole radar and hole-to-hole tomography with a saline tracer. In *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, March 22–26, 1998, Chicago, Illinois, *Proceedings*: 379–388. Wheat Ridge, Colo., Environmental and Engineering Geophysical Society.

Xia, J., Franseen, E. K., Miller, R. D. and T.V. Weis 2004. Application of deterministic deconvolution of ground-penetrating radar data in a study of carbonate strata. *Journal of Applied Geophysics* 56(3): 213–229.

Yalçiner, C.Ç., Bano, M., Kadioglu, M., Karabacak, V., Meghraoui, M. and E. Altunel 2009 New temple discovery at the archaeological site of Nysa (western Turkey) using GPR method. *Journal of Archaeological Science* 36: 1680–1689.

Yelf, Richard 2004 Where is true time zero? In *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar*: June 21–24, Delft, The Netherlands, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebergen (editors). Delft University of Technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey: 279–282.

Yilmaz, Oz 2001 Seismic data analysis: Processing, inversion and interpretation of seismic data. *Investigations in Geophysics* Number 10, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Okla.

Young, Roger A., and Sun Jingsheng 1994 Recognition and removal of subsurface scattering in GPR data. In *Proceedings of the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar*: 735–746. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada.

Yu, Haizhong, Ying, Xiaojian and Shi Yuansheng 1996 The use of Fk techniques in GPR processing. In Proceedings of the Sixth International Conference on Ground Penetrating Radar: 595–600. Department of Geoscience and Technology, Tohoku University, Sendai, Japan.

Zeng, X., McMechan, G.A., Cai, J. and H. W. Chen 1995 Comparison of ray and Fourier methods for modeling monostatic ground-penetrating radar profiles. *Geophysics* 60: 1727–1734.

## **Glosario de términos comunes de Georadar utilizados en este libro**

**Acoplamiento de la Energía del Radar con el Suelo (coupling, of radar energy with the ground):** una medida relativa de qué tan bien se mueven las ondas de radar transmitidas a través de la interfaz tierra-aire para propagarse al suelo. Las variaciones en el acoplamiento pueden deberse a los componentes de los materiales de la superficie, la ubicación de la antena en el suelo, la cantidad de inclinación de las antenas, la distancia de la antena al suelo y otros factores. Un buen acoplamiento significa que las ondas de radar se han movido hacia el suelo y se están transmitiendo a profundidad. Las variaciones de acoplamiento a lo largo de un transecto de antena crean reflejos anómalos en los perfiles de reflexión GPR y pueden distorsionar las imágenes GPR.

**Amplitud (amplitude):** una medida de la "fuerza" de las ondas de radar registradas por los sistemas GPR. Estos valores se registran como rango dinámico de valores digitales que definen cada onda sinusoidal registrada. Las variaciones en las amplitudes de las ondas son una función de las diferencias en la velocidad de las ondas que viajan a medida que atraviesan superficies limítrofes que reflejan energía; cuanto mayor es el contraste de velocidad, mayor es la amplitud reflejada.

**Análisis de Velocidad (velocity analysis):** cualquier método que estima la velocidad de viaje de las ondas de radar en un medio. Importante para que los tiempos de viaje se puedan convertir a profundidad o distancia en los estudios de GPR.

**Antenas (antennas):** en los sistemas GPR estos dispositivos electrónicos transmiten ondas de radio. Pueden tener varias formas y tamaños para generar ondas de frecuencia diferentes, con antenas más grandes que generalmente producen ondas de frecuencia más baja (longitud de onda más larga). Los pulsos eléctricos se aplican a un material eléctricamente conductor, que, según su forma, tamaño y otros componentes electrónicos, generan ondas electromagnéticas que se propagan hacia el exterior. A menudo se usan en pares, con una antena transmitiendo y otra, recibiendo y registrando ondas producidas por reflejos en interfaces en el suelo u otras superficies.

**Apilamiento (stacking):** palabra que se puede usar para describir cómo múltiples reflejos generados a partir de interfaces enterradas en capas se colocan verticalmente para generar un rastro de reflexión. También se usa comúnmente de una manera algo diferente para describir un método usado para promediar trazas durante la recolección, o en el procesamiento posterior a la adquisición para generar un perfil de reflexión menos ruidoso o distorsionado. El apilamiento durante el promedio de trazas generalmente toma una o más trazas delante y detrás de una para promediar, almacenando la traza promediada en lugar de la traza en el medio. Por ejemplo, una "pila" de 7 trazas promediaría las amplitudes



de 3 trazas al frente y 3 detrás de una traza a registrar. Los valores de apilamiento deben ser números impares de trazas y luego el proceso continúa para todas las trazas en un perfil, en una media móvil.

**Atenuación (attenuation):** debilitamiento y reducción general de la fuerza de las ondas de radar a medida que se mueven a través de un medio. En el suelo, esto ocurre cuando las ondas se propagan a través de materiales eléctricamente conductores o magnéticamente permeables. El debilitamiento también ocurre cuando las ondas que se propagan, que se mueven en un patrón de transmisión cónico, se extienden sobre una mayor cantidad de terreno creando un debilitamiento adicional.

**Banda Ancha (wide-band):** término para describir la mayoría de las antenas GPR que transmiten y reciben desde más de una frecuencia. Para la mayoría de las antenas GPR, esto suele ser una octava alrededor de la "frecuencia central".

**Calibración, de los Sistemas GPR (calibration, of GPR systems):** configuraciones de previas a la recolección de datos aplicadas a los controles digitales que determinan el número de trazas registradas dentro de ciertas ventanas de tiempo y con una resolución de onda programada. Una variedad de configuraciones es necesaria para la recolección de datos óptima que dependen de la profundidad y resolución deseadas, la cantidad de terreno a cubrir, la frecuencia de las antenas utilizadas y la composición física y química del terreno.

**Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) (cation exchange capacity (CEC)):** una medida del número de iones positivos intercambiables que son atraídos y retenidos por materiales en el suelo. La tierra que es conductora de electricidad tiene una CIC alta, que atenúa la propagación de las ondas de radar.

**Corbata de Moño (bow tie):** término de la jerga para una característica de reflexión que se ve en los perfiles de reflexión como una corbata vertical, anudada en el medio. Por lo general, son producto de reflejos generados por zanjas, canales o canales empinados donde las transmisiones de radar de forma cónica producen ondas que se reflejan en las características delante y detrás de las antenas en movimiento.

**Coefficiente de Reflexión (coefficient of reflection):** parámetro que describe cuánta energía de una onda de radar que se propaga se refleja en una interfaz. Cuanto mayor sea el cambio de velocidad, mayor será el coeficiente de reflexión y mayores las amplitudes de onda.

**Conductividad Eléctrica (conductivity, electrical):** propiedad intrínseca de un material que cuantifica cómo permite el flujo de una corriente eléctrica. La inversa es la resistividad. Los materiales de alta conductividad eléctrica en el suelo tienen una alta capacidad de intercambio catiónico y absorben la energía del radar, creando atenuación.

**Deflexiones, de Ondas Positivas y Negativas (deflections, of waves positive and negative):** las amplitudes de las ondas sinusoidales registradas recogidas en trazas con Georadar. Todas las ondas registradas tienen deflexiones positivas y negativas, ya que cuando se emparejan producen una onda completa, son el producto de una reflexión de una interfaz.

**Eliminación de Ruido de Fondo (background removal):** un método de procesamiento que puede eliminar una forma de onda promedio de todos los rastros de reflexión registrados en el suelo. El método genera una onda promedio al muestrear todas las ondas dentro de un número dado de trazos secuenciales en un perfil, que ocurren en los mismos momentos registrados. Esa onda promedio puede ser el "ruido de fondo", que se registró a partir de transmisiones de radio externas o ruido del sistema. Este rastro compuesto luego se resta digitalmente de cada rastro en un perfil, con suerte dejando solo aquellas ondas que se registraron desde el interior del suelo. Se puede programar el número de ondas secuenciales que se utilizan para calcular la traza media de fondo, o se pueden utilizar todas las trazas en un perfil por defecto.

**Energía Electromagnética (electromagnetic energy):** energía que se propaga a través del espacio o un material y son las ondas compuestas de ondas eléctricas y magnéticas. Las ondas de Georadar son electromagnéticas, clasificadas como ondas de radio (definidas solo por su frecuencia). Otros tipos de energía electromagnética, no aplicables a este libro, son la radiación infrarroja, la luz visible, la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma.

**Escudos, utilizados en Antenas (shields, used in antennas):** cualquier material que impida o destruya la propagación de las ondas de radar. Estos pueden ser tan simples como una placa de cobre con resistencias adjuntas, que tiene una alta conductividad eléctrica y absorbe todas las ondas de radar, que luego se destruyen antes de que puedan propagarse. También se pueden usar otros materiales (como compuestos "sigilosos") para detener las ondas que se propagan y se mueven en ciertas direcciones. En las antenas GPR generalmente se colocan para detener la propagación de energía hacia arriba y hacia los lados, de modo que la energía se mueva solo hacia abajo. Tienen menos eficacia en antenas de baja frecuencia y no se utilizan en absoluto en antenas muy bajas (50 MHz o menos) debido a su tamaño.

**Filtrado (filtering):** cualquier proceso digital que modifica las ondas de radar recopiladas, eliminando algunas partes de los datos y mejorando otras de alguna manera.

**Filtros de Pasa Bandas (band-pass filters):** la eliminación de frecuencias programadas de las ondas de radar registradas. Los filtros de pasa-bajas eliminan todas las frecuencias por debajo de un cierto valor en MHz. El pasa-altas permite que permanezcan los valores por encima de una frecuencia programada, eliminando los valores más bajos.

**Frecuencias, de Antenas (frequencies, of antennas):** la velocidad a la que vibra una onda, medida por segundo en valores de hercios. Cuanto mayor sea la frecuencia, más corta será la longitud de onda generada. La mayoría de las antenas de Georadar producen un campo electromagnético que crea ondas de propagación que vibran en el rango de 10-1200 megahercios (MHz). Una unidad de megahercios es 1,000,000 de oscilaciones por segundo.

**Frecuencia Central (center frequency):** la frecuencia nominal de las antenas comunes en Georadar. La mayoría de las antenas de Georadar están definidas por estas frecuencias centrales, pero en realidad son transmisores y receptores de una "banda ancha" de frecuencias, a menudo dentro de una "octava" del centro (de la mitad a dos veces). Por ejemplo, una antena de frecuencia central de 400 MHz realmente está transmitiendo ondas de una octava en cualquier tamaño de 400, que es aproximadamente 200-800 MHz.

**Fuente Puntual (point-source):** un objeto discreto en el suelo que produce un reflejo de forma hiperbólica. A menudo se trata de rocas, tuberías, objetos o cualquier superficie de reflexión limitada desde el aire.

**Ganancias, Aplicadas a las Ondas de Radar (gains, applied to radar waves):** parámetro o serie de parámetros que cambian la intensidad o amplitud de las ondas registradas por una antena. Estos son valores numéricos que a menudo se aplican a las amplitudes de onda durante la recopilación o durante el procesamiento posterior a la adquisición para mejorar la amplitud de las ondas generadas desde las profundidades del suelo, que han sufrido atenuación y, por lo tanto, son más débiles que las ondas generadas a menor profundidad.

**Hipérbola, Ajuste de (hyperbola fitting):** método en el que una hipérbola generada por computadora se "ajusta" a una visible en un perfil para estimar la velocidad. La forma de los ejes de las hipérbolas es una función de la velocidad a la que las ondas se mueven hacia y desde las superficies de reflexión de "fuente puntual" enterradas.

**Hipérbola, como en la descripción de un reflejo (hyperbola, as in describing a reflection):** forma de los reflejos generados a partir de "fuentes puntuales" en el suelo, causadas por la propagación de la energía del radar de transmisión a medida que avanza más profundamente en el suelo desde una antena de superficie.

**Interferencia de Radio (radio interference):** cualquier ruido de fondo dentro de la frecuencia de las antenas de Georadar.

**Isosuperficies (isosurfaces):** una superficie tridimensional renderizada por computadora que en estudios de Georadar se puede utilizar para visualizar en la computadora una superficie de reflexión de una característica enterrada en el suelo.

**Mapas de Amplitud (amplitude maps):** mapas comunes producidos por el muestreo de los valores digitales de amplitudes registrados de interfaces en el suelo. A menudo se les conoce como mapas de "segmentos de tiempo" o mapas de "segmentos de profundidad", ya que se producen a partir de segmentos de terreno definidos por los tiempos de registro de las ondas o la profundidad. La mayoría de las veces se generan sobre un "espesor" de material en el suelo, como 5-10 nanosegundos o 20-40 centímetros. También pueden construirse a partir de un solo plano. Estos mapas también se pueden producir para seguir horizontes específicos que varían en profundidad en el suelo.

**Marcadores de Distancia (distance markers):** se ingresan manualmente marcas digitales en perfiles de reflexión grabados que marcan la distancia a lo largo de los transectos o que marcan alguna otra ubicación. Se pueden colocar en la cadena de datos o como archivos separados, según el sistema de radar utilizado.

**Marcas Fiduciales (fiducial marks):** se ingresan manualmente marcas digitales en perfiles de reflexión registrados que indican la distancia a lo largo de los transectos o alguna otra ubicación. Se pueden colocar en la cadena de datos o como archivos separados, según el sistema de radar utilizado.

**MHz (Megahercios) (megahertz):** unidad de medida de frecuencia común en las antenas de Georadar, que son unidades de oscilación de ondas. Igual a un millón de hercios. Un hercio es una oscilación por segundo.

**Migración (migration):** un método de procesamiento posterior a la adquisición de datos que ajusta los reflejos registrados en el suelo para detectar distorsiones de velocidad y la dispersión esférica de la energía transmitida. Por lo general, en Georadar se utiliza para "migrar" los ejes de las hipérbolas de reflexión de fuente puntual a su fuente, que es el vértice de las hipérbolas. También se puede utilizar, con menos frecuencia, para ajustar la geometría de reflexiones planas de inmersión pronunciada.

**Modelado (modeling):** un método utilizado en GPR para crear una visualización de los perfiles de reflexión que generarían los materiales y objetos enterrados. Se produce ingresando parámetros eléctricos y magnéticos conocidos o inferidos y la forma de materiales enterrados en la computadora y luego generando trayectorias de ondas simuladas para producir perfiles de reflexión bidimensionales artificiales.

**Nanosegundos (ns) (nanoseconds (ns)):** es el tiempo utilizado para registrar los tiempos de viaje bidireccional de las ondas de radar. Son unidades de mil millonésimas de segundo.

**Onda de aire (air waves):** ondas de radar registradas visibles en perfiles de reflexión, que se mueven en el aire desde la antena transmisora a una superficie de reflexión y luego de regreso a la antena receptora. Estas ondas son a menudo

rectas, pero pueden tener varias formas dependiendo de cómo se muevan las antenas durante el registro en relación con la superficie reflectante. Las superficies de reflexión pueden ser paredes, árboles, piedras, vehículos, líneas de servicios públicos sobre el suelo y cualquier otro objeto que pueda reflejar las ondas de radar. Son más comunes con antenas de baja frecuencia donde la energía del radar se propaga desde la antena transmisora.

**Permitividad Dieléctrica Relativa (relative dielectric permittivity (RDP)):** una ecuación compleja, que produce un valor cuantificable para diferentes materiales a través de los cuales se mueven las ondas de radar, denominada "Constante Dieléctrica" por algunos practicantes de Georadar. Calcula variaciones en la propagación de un campo electromagnético, dependiendo de cambios en las propiedades de los materiales en el subsuelo. Se utiliza aquí como una medida indirecta de la velocidad de las ondas de radar que se mueven en el suelo. La RDP se define como aquella energía del radar que se mueve en el vacío, con valores mayores de RDP para velocidades más lentas. El RDP más alto para GPR es 80 para ondas de radar que se mueven en agua dulce.

**Procesamiento de Datos, (Post-Adquisición data processing, post-acquisition):** métodos de software digital que modifican los datos de reflexión de Georadar después de que han sido adquiridos para ajustar los reflejos de alguna manera antes de su visualización e interpretación. Estos métodos pueden ser ajustes de ejes verticales y horizontales, filtrado de frecuencias, ganancia de amplitudes de reflexión y muchos otros métodos utilizados para superar el ruido, la distorsión y otras variaciones comunes de GPR.

**Propagación de Ondas de Radar (spreading of radar waves):** movimiento de ondas desde una antena de superficie en forma generalmente cónica, con el vértice del cono en la antena de superficie. El patrón de radiación cónico producido por la mayoría de las antenas de Georadar se alarga en la dirección del movimiento de las antenas si las antenas de transmisión y grabación emparejadas se colocan perpendiculares al transecto (la forma habitual en que se mueven las antenas para la mayoría de las aplicaciones).

**Radar (radar):** un acrónimo, que ahora se ha convertido en una palabra por derecho propio, que comenzó a usarse en 1942 para las ondas de radio reflejadas utilizadas para detectar objetos en el aire. Significa "detección y alcance de radio". Este acrónimo reemplazó al acrónimo británico RDF que originalmente significaba "radiogoniometría".

**Reflejos (reflections):** además de la definición obvia de una onda reflejada desde una superficie, también se usa comúnmente como jerga en Georadar e interpretación de ondas sísmicas para una superficie plana visualmente continua visible en un perfil de reflexión.

**Resistividad Eléctrica (resistivity, electrical):** una propiedad intrínseca de un material que cuantifica qué tan bien se permite el flujo de una corriente eléctrica. La inversa es la conductividad. Los materiales terrestres de alta resistencia eléctrica tienen una baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) y permiten fácilmente el paso propagando ondas de radar.

**Ruido (noise):** cualquier onda no deseada registrada durante la recolección de datos de Georadar. Por lo general, son transmisiones de radio de fondo, pero podrían ser ondas internas generadas por el sistema u ondas de aire, por nombrar algunas.

**Sistemas de arreglos múltiples (multiple array systems):** uso de antenas de transmisión y grabación (recepción) múltiples colocadas juntas para registrar una variedad de ondas reflejadas en el suelo desde una unidad terrestre tridimensional. Por lo general, cada antena transmite y luego registra sus propios reflejos desde abajo. Otras matrices registran las ondas reflejadas y refractadas de una antena que transmite a múltiples antenas receptoras. Las matrices más complejas transmiten y registran desde todas las antenas unidas. Todas las reflexiones registradas en sistemas de matriz necesitan un software especializado para colocar las trazas de reflexión en un paquete tridimensional de suelo para su procesamiento y visualización.

**Teléfono Celular, Frecuencia (cell phone, frequency):** importante ya que son generadores de ruido de fondo para el Georadar. Por lo general, oscilan entre 800 y 1800 MHz, con algunas frecuencias más bajas en Europa. Las frecuencias 3G, 4G y 5G más nuevas se encuentran en el rango de frecuencia más alto. Cuando se utilizan antenas de Georadar en el rango de 500-1200 MHz, la interferencia de estos dispositivos puede ser un problema. Ese ruido de teléfono celular debe eliminarse de los datos utilizando programas de filtrado posteriores a la adquisición comunes en la mayoría de los programas de software. Todos los teléfonos móviles y dispositivos de comunicación personal producirán interferencias electromagnéticas extrañas al transmitir, pero generalmente no cuando solo se encuentran en modo de recepción.

**Tiempo de Viaje (travel time):** por lo general, el tiempo "bidireccional" que se mide desde que una onda de radar sale de la antena transmisora, se mueve a través de un medio y luego se recibe y registra en una antena receptora emparejada. A veces puede ser "unidireccional" si las antenas están separadas y se están realizando ciertos tipos de pruebas de velocidad, o si se están estudiando paquetes de tierra separando antenas en algún otro método de estudio.

**Transectos de Levantamiento (survey transects):** cualquier línea a lo largo de la superficie del suelo en donde se mueve una antena. A menudo, son lineales si se recopilan dentro de una cuadrícula, utilizando un sistema de coordenadas cartesianas para definir su ubicación. Pero se pueden colocar en cualquier orientación o geometría si las antenas se mueven alrededor de obstáculos, o se

colocan de manera que se optimice la forma en que se registran los reflejos de las interfaces enterradas.

**Trayectorias de Rayos (ray paths):** trayectorias inferidas que las ondas de radar individuales se mueven en el suelo o en el aire.

**Traza (trace):** registro digital de ondas en un punto del suelo. Por lo general, se componen de múltiples reflexiones registradas dentro de una "ventana de tiempo", donde todas las ondas se "apilan" en una forma de onda compuesta. Las trazas se pueden analizar individualmente para ayudar a definir la reflexión en una ubicación, pero lo más común es que se "apilen" juntas secuencialmente a lo largo de un transecto de levantamiento, para generar un perfil de reflexión.

**Ventana de Tiempo (time window):** un período de tiempo, medido en nanosegundos, en el que un sistema de Georadar está programado para registrar las ondas que se cruzan con la antena receptora.

### **Sobre los autores:**

Lawrence Conyers es profesor de antropología en la Universidad de Denver, Colorado, EE. UU. Se especializa en el uso de radares de penetración terrestre para aplicaciones Arqueológicas y Geológicas.

Adolfo Martínez es un experto en Georadar con base en Monterrey, México que trabaja en toda América Latina en varios proyectos enfocados en aplicaciones Geotécnicas, Geológicas y Arqueológicas.

Su colaboración hizo posible este libro permita que los conceptos importantes de Georadar estén fácilmente disponibles para el mundo de habla hispana y aquellos que se toman en serio la necesidad de elevar su comprensión de Georadar / GPR a un nivel superior.