

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción.

El radar de subsuelo es un método de prospección basado en la emisión y propagación de ondas electromagnéticas en un medio, con la posterior recepción de las reflexiones que se producen en sus discontinuidades. Estas discontinuidades son cambios bruscos de los parámetros electromagnéticos del subsuelo, es decir, de la conductividad, la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética. Los registros que se obtienen son similares a los obtenidos cuando se realizan estudios de sismica de reflexión, con la diferencia de que, en el caso del radar de subsuelo, se trabaja con frecuencias mucho más altas y la emisión de pulsos se puede realizar muy rápidamente. Por este motivo, aunque se trata de registros puntuales (trazas), los radargramas pueden llegar a considerarse casi registros continuos. La información que estos radargramas aportan es variada, pero principalmente se trabaja con tiempos de llegada. El tipo de estudio de subsuelo más básico consiste en determinar velocidades de propagación promedio y, junto con los tiempos de propagación registrados para cada evento, localizar la discontinuidad en la que se ha producido la reflexión, determinando tanto su situación horizontal como la profundidad a la se encuentra. La profundidad que se puede alcanzar depende

tanto de las condiciones de medio analizado como del equipo utilizado. En los casos que se presentan en este trabajo no se superan los 10 m. de profundidad, tratándose en todos los casos de estudios superficiales del medio.

Los radargramas también pueden aportar información si analizamos las amplitudes de los distintos eventos. Este parámetro y la velocidad dependen del medio y permiten caracterizarlo. En esta tesis se muestran algunos ensayos que relacionan la amplitud con la saturación y con la compactación del medio.

Se trata, simplificando mucho, de una técnica no destructiva que utiliza ondas electromagnéticas para determinar superficies reflectoras en el interior de los medios. El equipo consiste en un sistema de control (computadora) conectado a unas antenas que se desplazan sobre la superficie del medio que se desea analizar. Estas antenas son las encargadas de emitir energía hacia el interior del medio y de registrar las ondas que provienen de las reflexiones producidas en las discontinuidades interiores.

El desarrollo que han experimentado las técnicas de prospección con radar de subsuelo ha ampliado los campos de aplicación abriendo las puertas a nuevos estudios y posibilidades. Debido al gran interés en los estudios superficiales altamente resolutivos del subsuelo este desarrollo se está realizando muy rápidamente. Las cada vez más numerosas aportaciones que se realizan en este campo contribuyen a este espectacular avance. Son muchos los ejemplos de estas aportaciones que van desde estudios de casos concretos hasta simulaciones por ordenador, pasando por ensayos experimentales y desarrollo de programas informáticos y de equipos. En esta tesis se presentan distintas aplicaciones siempre dentro del campo de los estudios de patrimonio histórico-artístico, una serie de ensayos en los que se analizan algunos de los problemas que se presentan más a menudo y una recopilación teórica que se intenta aplicar tanto a los ensayos como a los casos prácticos para simplificar la interpretación de los registros y para intentar resolver algunas cuestiones dudosas. También se presenta una propuesta de recopilación de datos en un formato de fichas que permita acceder fácilmente a toda la información sobre un registro determinado.

Se ha estructurado la presente memoria en tres partes separadas. La primera contiene los conceptos de la teoría de propagación de ondas electromagnéticas,

necesarios para entender el funcionamiento de este método de prospección, y la información acerca de las relaciones entre las condiciones de los medios y los datos que proporciona el radar de subsuelo. En esta parte también se incluye una descripción del equipo de radar y de los distintos métodos que se utilizan en la actualidad para realizar la adquisición de datos. La segunda parte de la memoria es experimental. En esta parte también se incluye una descripción del equipo de radar de subsuelo y de los distintos métodos que se utilizan actualmente para realizar la adquisición de datos. Como un último capítulo se comenta el proceso de interpretación de los registros y las técnicas de procesado de datos, que se ilustran con ejemplos reales tomados de estudios de campo. Los demás capítulos contienen la descripción y los resultados de algunos ensayos de laboratorio. En la tercera parte se presentan ejemplos de aplicaciones en estudios de patrimonio histórico-artístico. Así, se muestran ejemplos de trabajos de apoyo en estudios arqueológicos, análisis del deterioro producido en edificios históricos (presencia de humedad y fisuras) y en estudios de monumentos que pueden haberse visto afectados por construcciones modernas o por una posterior actuación arquitectónica sobre los mismos. Para finalizar esta parte práctica se han incluido dos capítulos para analizar los límites de estas técnicas y de los estudios llevados a cabo. Se trata, por un lado, de un cálculo de errores y, por otro lado, del análisis de algunos problemas que se pueden presentar al analizar los registros. En este último caso se incluyen también ensayos de laboratorio para intentar reproducir lo que se ha registrado en estudios de campo. Las fichas que se han comentado con anterioridad se presentan en uno de los anexos de esta memoria.

1.2. Objetivos.

Los trabajos que se presentan en esta memoria se iniciaron como aplicaciones reales a problemas de patrimonio. La realización de los trabajos de campo y la posterior interpretación de los registros implicaron una revisión de los objetivos planteados inicialmente. Los problemas en el tratamiento e interpretación de datos indicaban claramente que era necesario un nuevo enfoque de la tesis que incluyera experiencias de laboratorio que pudieran repetirse para aclarar lo que se observaba en los radargramas o, al menos, para poder dar una explicación a algunos

fenómenos detectados. En el nuevo planteamiento, además de la aplicación a casos reales, se incluía una revisión de los tipos de tratamiento de señales, una serie de ensayos de laboratorio, el planteamiento de problemas habituales observados en las aplicaciones reales, las posibles explicaciones de estos problemas y la aplicación de modelos y ecuaciones teóricas que permitieran predecir los registros observados. Durante la realización de los ensayos y la aplicación de ecuaciones y modelos para la predicción del comportamiento de las ondas en el medio se vio la necesidad de realizar también un cálculo de errores, para determinar la fiabilidad y la resolución de los resultados. Este cálculo de errores se ha realizado en dos vertientes:

- Por un lado se ha efectuado un cálculo de errores determinista, no estadístico, de los valores de los parámetros que se obtienen experimentalmente.
- Por otro lado, se ha realizado un cálculo del error que se comete cuando se realizan simplificaciones usuales (como en el caso de la aproximación de pequeñas pérdidas).

El trabajo se complementa con una propuesta de fichas para crear una base de datos que contenga los registros y la información relevante sobre los mismos, presentada de forma sintética. Con las fichas de esta base de datos se dispondrá de una fuente de consulta rápida, donde poder encontrar registros de todo tipo. Esto permitirá comparar radargramas de campo con los almacenados en las fichas, disponiendo de este modo de una fuente de información que ayude en la interpretación de casos similares. Dentro de la misma línea, para simplificar los estudios con radar de subsuelo, también se han elaborado una serie de gráficas que pueden ser útiles durante las tareas previas a la adquisición de datos en campo. Por ejemplo, se pretende que, antes de efectuar una recopilación de datos, sea posible estimar la atenuación que puede producirse o la penetración máxima a alcanzar. También se han recopilado métodos (expresados de forma simplificada en gráficas) para poder estimar de forma rápida la validez de algunas de las aproximaciones más usuales que se realizan en la interpretación de datos. Esto permite obtener una estimación del error que se comete al utilizar las simplificaciones.

Resumiendo, los objetivos concretos de los trabajos incluidos en la presente memoria son:

- Realizar una recopilación de datos y trabajos teóricos que permitan relacionar los tipos de suelo y sus características (saturación, compactación y composición) con los parámetros que podemos medir utilizando un radar de subsuelo.
- Representar gráficamente relaciones con las que poder simplificar y realizar de forma rápida y sencilla el diseño de la campaña de prospección y la interpretación de los radargramas.
- Identificación de algunos problemas más usuales (como puede ser la identificación de señales externas al medio o la determinación de la resolución posible en cada caso).
- Realizar series de ensayos de laboratorio para obtener registros similares a los registros reales en los que se puedan identificar los eventos que se observan en estos últimos. Intentar explicar algunos de estos efectos a partir de los ensayos y de la teoría recopilada. Con estos ensayos se pretende desarrollar un protocolo de trabajo experimental que permita una continuación, ampliando las bases de datos con las que elaborar unas conclusiones coherentes.
- Análisis de la información y las características fundamentales de los registros a partir de ensayos de laboratorio. Los parámetros que determinan estas características son: velocidades, atenuaciones, cero de los radargramas (situación sobre el registro de lo que sería la entrada de la señal en el medio a analizar), longitud de la onda inicial y resolución en diferentes medios.
- Determinación de coeficientes de atenuación.
- Relacionar la atenuación que se produce en la amplitud de las señales durante su propagación con las propiedades del medio: saturación, compactación y composición.

- Obtención de permitividades efectivas y velocidades de propagación en los distintos medios utilizados en los ensayos: agua, suelos y muros.
- Relacionar la velocidad y la frecuencia de los registros experimentales con algunas propiedades físicas de los medios: saturación, compactación y composición.
- Efectuar un análisis de errores que pueda aplicarse con facilidad a los datos obtenidos y que permita determinar la resolución y la fiabilidad de los resultados.
- Presentar aplicaciones para determinar la validez de este método de análisis aplicado a patrimonio y arqueología. Concretamente se han analizado las aplicaciones en estudios de lesiones en edificios (en el caso de humedad y en el de fisuración), en el análisis de la influencia de construcciones modernas cercanas o sobre elementos de mayor antigüedad (como sería el caso de reconstrucciones de monumentos) y, en último lugar, en el apoyo a estudios arqueológicos y como fuente de información complementaria para situar elementos o zonas de interés en aquellos lugares donde no puede realizarse una excavación o bien donde es difícil y costoso hacerlo.
- Proponer un modelo de fichas para almacenar los registros, en las que se incluya toda la información que puede precisarse para repetir estos registros y para interpretarlos. Se pretende con ello iniciar una base de datos de radargramas de interés con los que poder trabajar para mejorar la comprensión de los fenómenos que se registran.

Enumerando brevemente los casos reales analizados (referidos a patrimonio y a arqueología) se pueden mencionar cinco estudios diferentes: teatro romano de Sagunto, puentes góticos sobre el río Turia, catedral de Valencia, iglesia de San Jorge de Paiporta y emplazamiento de la antigua fortaleza de Alcántara.

En cada uno de los casos reales analizados se han planteado además una serie de objetivos específicos:

- En el estudio del teatro romano de Sagunto se pretende determinar mediante la prospección de radar, los contactos entre las distintas actuaciones realizadas y los restos romanos. Se intentan identificar reflexiones que puedan estar producidas en el contacto entre estos últimos materiales y elementos metálicos introducidos como elementos de unión entre construcciones distintas. Para ello se ha de realizar:
 - a. Un cálculo de velocidades de propagación en los distintos materiales en los que se trabajará.
 - b. Un análisis de los registros a partir de los parámetros velocidad y permitividad efectiva obtenidos.
 - c. Localización de zonas conflictivas: zonas en las que se observa un mayor desgaste de los materiales romanos (mayor tiempo de propagación por la zona reconstruida) y sectores donde el tipo de reflexión puede estar asociado con elementos metálicos (refuerzos y barras).
 - d. Analizar la eficiencia del radar de subsuelo para este tipo de estudios.

- En el estudio de los puentes góticos del río Turia se pretende determinar la posición aproximada de las zapatas, indicando de este modo el área que no debe quedar afectada por las obras de un canal, determinando una zona de seguridad que evite posibles daños en los puentes. Para ello se han de seguir los siguientes pasos:
 - a. Identificación de materiales y de las velocidades características de propagación.
 - b. Estimación de la profundidad aproximada que podemos alcanzar en estos materiales.

- c. Análisis de elementos reflectores externos, porque estaremos trabajando bajo el puente en ocasiones, pudiendo éste quedar registrado en los radargramas.
 - d. Determinación en los radargramas de eventos que pueden asociarse con cambios de materiales en profundidad. Determinación de eventos que puedan asociarse con la situación de los basamentos de los apoyos del puente.
- En el estudio de la Catedral de Valencia se pretenden localizar distintos elementos del subsuelo: criptas, de las que existe documentación abundante, estando algunas de ellas en uso en la actualidad; los fundamentos de un antiguo muro que fue demolido al ampliar el recinto (de este hecho existe información abundante, aunque la situación exacta del mismo se desconoce); algunos pudrideros de la catedral, así como algunas tumbas. En algunos casos las lápidas sepulcrales de estas tumbas pueden verse en el suelo de la catedral, pero en otros casos los sepulcros han quedado ocultos bajo el pavimento actual. También se pretende utilizar el radar de subsuelo para determinar diferencias entre registros realizados en zonas afectadas por la humedad y registros efectuados en zonas no afectadas. Las tareas a realizar par alcanzar estos objetivos son:
 - a. Obtención y análisis de registros en zonas donde se conocen los elementos que pueden producir las reflexiones (criptas conocidas o tumbas identificadas).
 - b. Localización de zonas dañadas por la humedad. Obtención de registros en estas zonas y obtención de registros en zonas que parecen sanas.
 - c. Determinación de permitividades efectivas y velocidades de propagación de los materiales del subsuelo.
 - d. Realización de una campaña general con la que podamos cubrir toda la superficie que se desea analizar.

- e. Localización de los posibles elementos que se intentará buscar identificando los eventos de los radargramas.
 - f. Detección de diferencias entre los registros obtenidos en zonas sanas y los obtenidos en zonas afectadas por la humedad.
- En el estudio de la iglesia de San Jorge de Paiporta se pretenden observar las diferencias que existen entre zonas de los muros afectadas por problemas de fisuración y zonas que aparentemente están sanas. También se pretenden localizar secciones de los muros que presentan problemas de humedad, intentando utilizar el radar de subsuelo para identificar la amplitud de las zonas afectadas. Por último se pretende realizar un estudio del subsuelo para determinar si pueden haber zonas de interés por dos motivos: posibilidad de que existan restos de una construcción más antigua y localizar elementos que puedan estar relacionados con las lesiones que se observan en los muros del edificio. Para ello se procederá de la siguiente forma:
 - a. Obtención de registros en los muros donde se observan problemas de fisuras y de humedad y en zonas aparentemente sanas.
 - b. Comparación de los registros de las zonas dañadas y de las zonas sanas.
 - c. Localización de otros sectores afectados. Análisis de la amplitud de los daños, tanto en profundidad como en extensión.
 - d. Estudio del subsuelo para localizar posibles restos de construcciones anteriores y para determinar la situación de un antiguo canal actualmente bajo los materiales de relleno de la zona, ya que puede ser una de las causas de la humedad que se observa en un muro de la iglesia.
 - En los estudios realizados en la antigua fortaleza de Alcántara y en los terrenos del antiguo convento de las Monjas Comendadoras de Alcántara se pretende utilizar el radar de subsuelo para localizar las zonas que

pueden presentar un mayor interés, limitando de este modo la extensión de las excavaciones arqueológicas que se han de realizar. También se pretende situar el emplazamiento de unos aljibes cuya existencia es conocida por datos históricos. Por último se pretende analizar el subsuelo de la iglesia para localizar restos de una iglesia más antigua. Para alcanzar estos objetivos se seguirá el siguiente procedimiento:

- a. Obtención de registros cubriendo toda el área de interés.
- b. Estimación de las velocidades de propagación.
- c. Localización de eventos que puedan corresponder con elementos de interés.
- d. Determinación de las zonas de máximo interés.

1.3. Síntesis del contenido de la memoria.

Para finalizar esta introducción, presento una breve síntesis de los temas que se han tratado en cada capítulo y de los trabajos realizados para alcanzar los objetivos expuestos.

En el **capítulo 1** se ha introducido el trabajo a desarrollar y se han explicado brevemente los objetivos de la tesis. En el **capítulo 2** se realiza una breve introducción a la historia del radar de subsuelo aplicado tanto a estudios de arqueología como a análisis de patrimonio histórico-artístico y se comenta el estado actual y el desarrollo de este tipo de prospección geofísica durante los últimos 10 años. Esto permite una visión global de la situación actual y de las posibles vías de desarrollo existentes.

Las bases teóricas se plantean en el **capítulo 3**, centrado en un repaso de los principios del electromagnetismo relacionados con el funcionamiento del radar de subsuelo. En el **capítulo 4** se analizan algunos de los fenómenos que se producen

cuando se propagan las señales electromagnéticas por medios materiales: las pérdidas de energía, la penetración de la señal, las ecuaciones del radar y de transmisión y la resolución del método. Se analiza también la dependencia de estos efectos con la frecuencia y con los parámetros electromagnéticos del medio. Se obtienen gráficas que se pueden utilizar para planificar la prospección de forma adecuada, ya que permiten estimar de forma rápida parámetros como la profundidad máxima y mínima esperadas en cada caso y la separación entre eventos debidos a elementos cercanos, ya sea en distancia horizontal como en tiempo de propagación (distancia vertical). Las gráficas obtenidas también son útiles para analizar la validez de las aproximaciones de pequeñas pérdidas, que permiten calcular la velocidad de una forma más sencilla.

En el **capítulo 5** se describen los equipos de radar. Se inicia con una breve introducción que sitúa el estado actual del desarrollo de los radares en general y se comentan los conceptos sobre la emisión de energía electromagnética por una antena. Estos conceptos sirven para explicar la ecuación de transmisión, la ecuación del radar y los diagramas de radiación que se obtienen para distintas antenas. A continuación se presenta más concretamente el radar de subsuelo; sus componentes, accesorios y su forma de utilización. Dentro de las componentes de un radar de subsuelo se hace especial hincapié en las antenas: qué son, cómo funcionan, qué tipos se pueden encontrar, qué parámetros definen a cada uno de estos sistemas y qué métodos de adquisición de datos se pueden utilizar con cada antena. Se realiza una recopilación de los distintos métodos empleados en la actualidad comentando ventajas, inconvenientes y en qué estudios se pueden utilizar. Como final de este capítulo se trata el radar de subsuelo utilizado para los estudios de campo y para los ensayos realizados. También se introducen las antenas utilizadas, sus características y especificaciones, incluyendo los diagramas de radiación obtenidos por distintos autores.

En el **capítulo 6** se consideran las propiedades de los medios y su respuesta frente a los campos electromagnéticos. Se analizan los factores que influyen en la propagación de las ondas y la dependencia de los parámetros electromagnéticos con las propiedades de los medios: composición, porosidad, saturación y dependencia con la temperatura y la frecuencia. Se comentan algunos modelos teóricos que permiten estimar el valor de la permitividad relativa del medio a partir de los factores mencionados anteriormente. También se comentan algunos

ensayos relevantes que han sido llevados a cabo por distintos autores en esta última década.

El **capítulo 7** está a caballo entre los temas teóricos y los capítulos más aplicados, ya que trata del proceso de interpretación de datos. Se explica de qué partes consta un registro de radar y cómo lo presenta el equipo utilizado en esta tesis, así como toda la información que puede proporcionar cada traza, cada radargrama y las cabeceras de los registros. Seguidamente se comentan los parámetros que se necesitan para interpretar los radargramas. Estos parámetros pueden obtenerse a partir de los datos básicos (distancias, amplitudes y tiempos dobles de propagación) de diferentes maneras. Se comentan también los métodos que permiten obtener los parámetros de interpretación. Se analiza también el tratamiento de las señales para mejorar la relación entre la señal y el ruido. Se comentan los filtrados frecuenciales, que se pueden separar en filtros verticales y filtros horizontales, según se apliquen a una única traza (dirección temporal o vertical) o a varias trazas consecutivas de un mismo radargrama (dirección horizontal). También se analizan otros tipos de tratamiento de señales, como es el caso de la deconvolución predictiva, la migración de señales, la transformada de Fourier, la transformada de Hilbert, la superposición de trazas y las correcciones estáticas. Otro tema analizado es el de la aplicación de amplificaciones o ganancias: qué efectos tiene, como se realiza y por qué es necesario aplicarla, razonado a partir de un balance energético sencillo. Para finalizar se comenta, a modo de resumen, todo el proceso de interpretación de un registro. Cada uno de los procesos está ilustrado con ejemplos sobre registros obtenidos en los trabajos de campo.

A continuación se tratan los ensayos realizados en laboratorio.

Se empieza por los ensayos para calibrar el equipo, donde el medio por el que se propaga la onda es el aire (**capítulo 8**). En estos ensayos se determina la forma de un pulso simple (cuando no se ha producido ninguna reflexión). La señal en este caso es debida enteramente a efectos internos de la antena: onda directa entre el emisor y el receptor, reverberaciones internas y ruido electrónico. A partir de este pulso se intenta determinar la distancia respecto a la superficie del medio a la que hay que situar la antena para que no se produzcan interferencias entre la señal directa y la primera reflexión en la superficie del medio. También se analizan las

trazas obtenidas cuando se ha producido una reflexión en una superficie para poder calibrar el equipo y determinar lo que sería el cero de los registros. El último efecto analizado en el caso del aire es la atenuación de la señal durante su propagación.

En los siguientes ensayos el medio utilizado es agua. La descripción, la discusión y los resultados de estos ensayos se muestran en el **capítulo 9**. Se ha obtenido el valor de la permitividad efectiva del agua utilizada. Los espectros de amplitud de las trazas obtenidos se han comparado con los de una señal cuya propagación se produce por el aire. Se ha observado de esta forma el filtrado que produce el agua sobre la señal emitida. Se analiza también cómo puede afectar este fenómeno a la velocidad de propagación de las ondas. También se estiman valores para el coeficiente de atenuación, para el factor de pérdidas y para la penetración pelicular.

En el **capítulo 10** se comenta un método para caracterizar medios a partir de sus propiedades electromagnéticas y se ilustra paso a paso con el análisis de un suelo agrícola de la Huerta de Valencia sometido a diferentes condiciones de saturación y compactación. Se caracteriza en primer lugar el suelo a partir de su composición mineral y de sus propiedades físicas (porosidad, pesos específicos, saturación y humedad). A continuación se realizan los ensayos necesarios para caracterizarlo a partir de su comportamiento frente a un campo electromagnético y se analizan los resultados, comparando los últimos con las condiciones físicas del medio. Se comprueba cómo cambia la permitividad efectiva al variar la humedad y la compactación del medio. También se analiza la atenuación y las frecuencias de la señal así como su dependencia con la humedad y la porosidad.

En el **capítulo 11** se recogen los distintos métodos que se han utilizado para obtener velocidades de propagación (y por lo tanto permitividades efectivas), utilizando ejemplos reales o ensayos específicos diseñados para calcular velocidades. Para finalizar se realiza una comparación de los distintos métodos comentados.

En los capítulos 12, 13, 14 y 15 se presentan ejemplos de aplicaciones en patrimonio histórico-artístico. En el **capítulo 12** se utiliza el radar de subsuelo para analizar los efectos de obras posteriores sobre restos más antiguos. En

concreto se analiza la última intervención efectuada en el teatro romano de Sagunto y el subsuelo bajo unos puentes góticos para determinar por donde tiene que construirse un colector si que puede afectar a dichos puentes. En el **capítulo 13** se analizan los efectos que produce la humedad en construcciones históricas, concretamente en los muros de la iglesia neoclásica de San Jorge, en Paiporta, y en el suelo de la catedral de Valencia. En los dos casos analizados se observan diferencias entre los registros obtenidos en zonas lesionadas y los obtenidos en zonas sanas, debido a la distinta saturación del medio. Esto permite detectar problemas de humedad en construcciones. En el **capítulo 14** las lesiones estudiadas en la iglesia de San Jorge (Paiporta) son fisuras en las estructuras constructivas y despegues en los materiales de recubrimiento. En el **capítulo 15** se analiza el uso del radar de subsuelo en arqueología. Se realiza el estudio del subsuelo en el interior de la catedral de Valencia y de la iglesia de San Jorge de Paiporta. También se comenta el estudio realizado al aire libre para determinar con mayor precisión las zonas de posible interés arqueológico de la antigua fortaleza romana de Alcántara, permitiendo delimitar la zona de las excavaciones.

En el **capítulo 16** se estudian los errores cometidos cuando se adquieren datos o cuando se interpretan registros, obteniendo las distintas variables tanto de forma directa como indirecta a partir de observaciones experimentales. También se analizan los errores cometidos cuando se emplean fórmulas simplificadas. Se pretende con este capítulo acotar la fiabilidad de los resultados en cada caso.

En el **capítulo 17** se muestran algunos efectos interesantes que pueden provocar errores en la interpretación de los registros. Se utilizan radargramas reales para analizarlos y registros obtenidos en ensayos diseñados para estudiar el problema concreto. Algunos de estos efectos son las reflexiones externas, los efectos de contorno y los efectos de resolución horizontal.

Finalmente, en el **capítulo 18** se resumen los resultados, se presentan las conclusiones y se indican futuras líneas de trabajo y de investigación.