

Capítulo 17

Análisis de problemas producidos durante la adquisición e interpretación de datos.

Resumen.

Durante la adquisición de datos con radar de subsuelo pueden obtenerse registros en los que se superpone el ruido sobre la señal, dificultando la posterior interpretación, lo que también sucede si no se tiene en cuenta la resolución que se puede alcanzar o los cambios de velocidad laterales del medio.

En este capítulo se analizan algunos de los problemas más habituales que se presentan al realizar un trabajo de campo y cómo dichos efectos influyen en la calidad de los radargramas. Se estudian seis efectos diferentes:

- ***Las reflexiones externas** ocasionadas en reflectores situados fuera del medio analizado, localizados cerca de la antena. Dichas reflexiones se producen cuando se trabaja con antenas con apantallamiento pequeño, si en algún punto próximo al perfil hay un elemento fuertemente reflector, y si el rango de los registros es suficientemente grande para que quede registrada la reflexión que se produce en éste. Esto sucede porque parte de la energía de la antena se emite en los lóbulos secundarios. En este caso, el medio por el que se propagan estas reflexiones externas suele ser el aire y la velocidad de propagación se puede aproximar por la de una onda electromagnética en el vacío. Como en este medio no se produce atenuación por absorción, la intensidad de las reflexiones externas suele ser importante, por lo que el ruido que introducen en el registro es*

elevado. Para identificar estas anomalías y separarlas de la señal es necesario una cuidadosa adquisición de datos en la que quede constancia de los elementos próximos a la antena. El efecto de estos elementos se puede representar gráficamente para compararlo con los registros de campo obtenidos y verificar si la anomalía se ha producido en dichos elementos.

- **Cambios laterales en la velocidad de propagación de la onda**, que ocurren cuando en el medio se produce un cambio lateral en el comportamiento electromagnético, por cambios de material o de sus condiciones físicas (saturación y porosidad). Estos cambios han de tenerse en cuenta para obtener en cada caso una conversión adecuada de tiempos dobles de propagación en distancias.
- **Efectos de borde**. Es un caso particular de los cambios laterales en la velocidad de propagación. Se trata de un cambio brusco de especial importancia en los ensayos de laboratorio, donde se suele trabajar con muestras de pequeñas dimensiones. Al situar la antena cerca del límite del medio se producen reflexiones en la discontinuidad medio-aire que se superponen a las que proceden del interior del medio. Analizando la superficie irradiada por la antena, se puede estimar la distancia mínima entre la antena y el borde del medio a la que no se producen estos efectos.
- **Reflexiones múltiples**. Se trata de la reverberación que se produce cuando en el interior del medio hay un elemento fuertemente reflector. El ruido generado en este caso es elevado y puede ocultar totalmente la señal a partir del punto en el que se registra. En ocasiones, una deconvolución puede disminuir el ruido que este efecto produce en la señal.
- **Efectos de reflectores de pequeño tamaño próximos entre sí**. En los casos anteriores se analizan causas del ruido en radargramas. En este caso, se estudia un fenómeno asociado con la resolución de los elementos de interés registrados en el radargrama. En algunos casos, no se pueden separar las anomalías debidas a cada uno de los elementos resitrados si son cercanos y pequeños, por ejemplo, cuando la superficie irradiada por la antena abarca dos elementos, éstos pueden quedar registrados como un único evento; pero pueden separarse cuando la distancia entre ambos es igual o mayor a la huella de la antena, es decir, cuando dicha distancia es mayor a la resolución horizontal del estudio.
- **Desplazamiento del espectro hacia las bajas frecuencias**. Cuando se analiza la resolución (vertical o longitud de la señal y horizontal o huella de la antena) hay que considerar la frecuencia de la señal ya que estos parámetros dependen de la frecuencia (capítulo 4). Es importante, por lo tanto, analizar su comportamiento durante la propagación por el medio y estudiar el filtrado de las altas frecuencias que se produce.

17.1 Introducción.

Durante la adquisición de datos se pueden producir efectos que dificultan la posterior interpretación de los radargramas. Algunos introducen un elevado ruido en los registros. Se trata de reflexiones no deseadas producidas en elementos externos o de reverberaciones ocasionadas por un contraste fuerte en los parámetros electromagnéticos de un medio; estos efectos oscurecen la señal. Otros efectos están ligados a las características del medio ya las condiciones del estudio. Por ejemplo, para poder convertir los tiempos dobles de propagación en profundidades con el mínimo error, es necesario tener en cuenta los cambios laterales que se producen en las condiciones de los medios. Otro suceso interesante es el relacionado con la resolución de los reflectores y la detección de elementos de pequeño tamaño. Se analizan seis problemáticas diferentes acompañadas de ejemplos:

- **Las reflexiones externas.** En el caso de que este efecto no deseable se haya producido, cómo se pueden observar en los radargramas, por qué se producen y cómo se identifican durante la interpretación de datos.
- **Las reflexiones laterales y los efectos de contorno.** Similar al primero pero producido por elementos interiores o discontinuidades laterales en el medio estudiado (por ejemplo, en los efectos que se producen en el caso de un escalón).
- **Las reflexiones múltiples.** Generan ruido que oscurece los registros.
- **Las reflexiones cuando en el medio hay dos o más elementos separados.** Se discuten los registros que producen estos elementos y se incluyen radargramas obtenidos durante unos ensayos realizados utilizando dos elementos inmersos en un medio con una separación que se modifica de un registro a otro.
- **Los cambios laterales en la velocidad de propagación.**

- **Los cambios que se observan en la frecuencia central y en el ancho de banda de los registros.** Producen variaciones sobre los valores esperados para la resolución.

Para realizar una correcta interpretación de los registros hay que analizar con cuidado los efectos que introducen ruido en el radargrama, obteniendo también los espectros de frecuencias de las trazas registradas.

17.2. Reflexiones externas.

El problema de las reflexiones externas en los radargramas aparece siempre que se recibe una señal proveniente del exterior del medio que se analiza. Esto puede suceder cuando se trabaja con una antena isotrópica o con una antena unidireccional no suficientemente apantallada. En los dos casos, parte de la energía se transmite al medio analizado, pero un porcentaje de la energía emitida se propaga en otras direcciones, por un medio diferente del estudiado, que suele ser el aire. Cuando en su trayectoria se encuentra con un cambio brusco de los parámetros electromagnéticos (producido por la presencia de una pared, un vehículo, un techo, etc...), parte de la energía incidente sufre una reflexión y se propaga en dirección contraria, hacia la antena, que capta esta señal como lo hace con la producida en una discontinuidad electromagnética del medio que se quiere estudiar. Las señales provenientes de los diferentes medios se superponen y quedan registradas en el mismo radargrama.

El registro contiene, por lo tanto, reflexiones que, para la misma posición de la antena provienen de medios caracterizados por velocidades diferentes, siendo en general una de ellas $v = c = 30 \text{ cm/ns}$, y otra notablemente inferior.

17.2.1. Reflexiones en elementos externos sobre la antena.

Cuando la antena no está apantallada¹, la energía se emite por un igual en todas las direcciones. Las antenas con un cierto apantallamiento emiten un mayor porcentaje de energía en una dirección determinada. Como parte de la energía de la antena se propaga en direcciones ajenas al medio estudiado, se pueden registrar reflexiones externas cuando el coeficiente de reflexión en las superficies que las producen sea elevado. Este es el caso del ejemplo mostrado en la figura 17.1, un radargrama obtenido en la Catedral de Valencia en el que se han registrado tres reflexiones externas, producidas en la cubierta de las dos naves laterales y de la nave principal. La antena utilizada para obtener este registro es la de 100 MHz (3107 de GSSI), con un apantallamiento que resulta insuficiente para determinados estudios. El rango del registro es de 300 ns y ha sido adquirido en el perfil P5 (figura 13.5). El tiempo de inicio de registro es de 30 ns. La altura de la cúpula sobre el nivel del pavimento es de entre 15 y 20 m.

Las fuertes reflexiones externas de la figura 17.1 provienen principalmente del cimborio de cada cúpula que, construido con elementos metálicos, presenta un elevado coeficiente de reflexión. El tiempo doble de propagación de la reflexión externa principal (anomalía en el centro de la figura 17.1) es de $t=150$ ns, que se corresponde con una distancia de unos 180 cm, resultado que concuerda con la altura de esta zona.

El problema que se presenta cuando se registran reflexiones externas es que al analizar el radargrama (por ejemplo, el de la figura 17.1) se puede interpretar este evento como una reflexión en un elemento interno al medio, con el mismo tiempo doble de propagación. El medio de la figura 17.1 tiene una velocidad característica de propagación de $v = 7.5$ cm/ns. La anomalía localizada a un tiempo doble de 150 ns puede proceder, por lo tanto, de una reflexión a 560 cm de profundidad. En este caso, este resultado es improbable, ya que las excavaciones realizadas en las proximidades del monumento (figura 15.1) indican que la profundidad a la que se encuentran en esta zona los restos más antiguos (romanos) no supera los 3.5 m.

¹ Las antenas no apantalladas se comercializan por su menor peso y su mayor comodidad de manejo, sobre todo en el caso de bajas frecuencias, para las que se requieren antenas de considerables dimensiones.

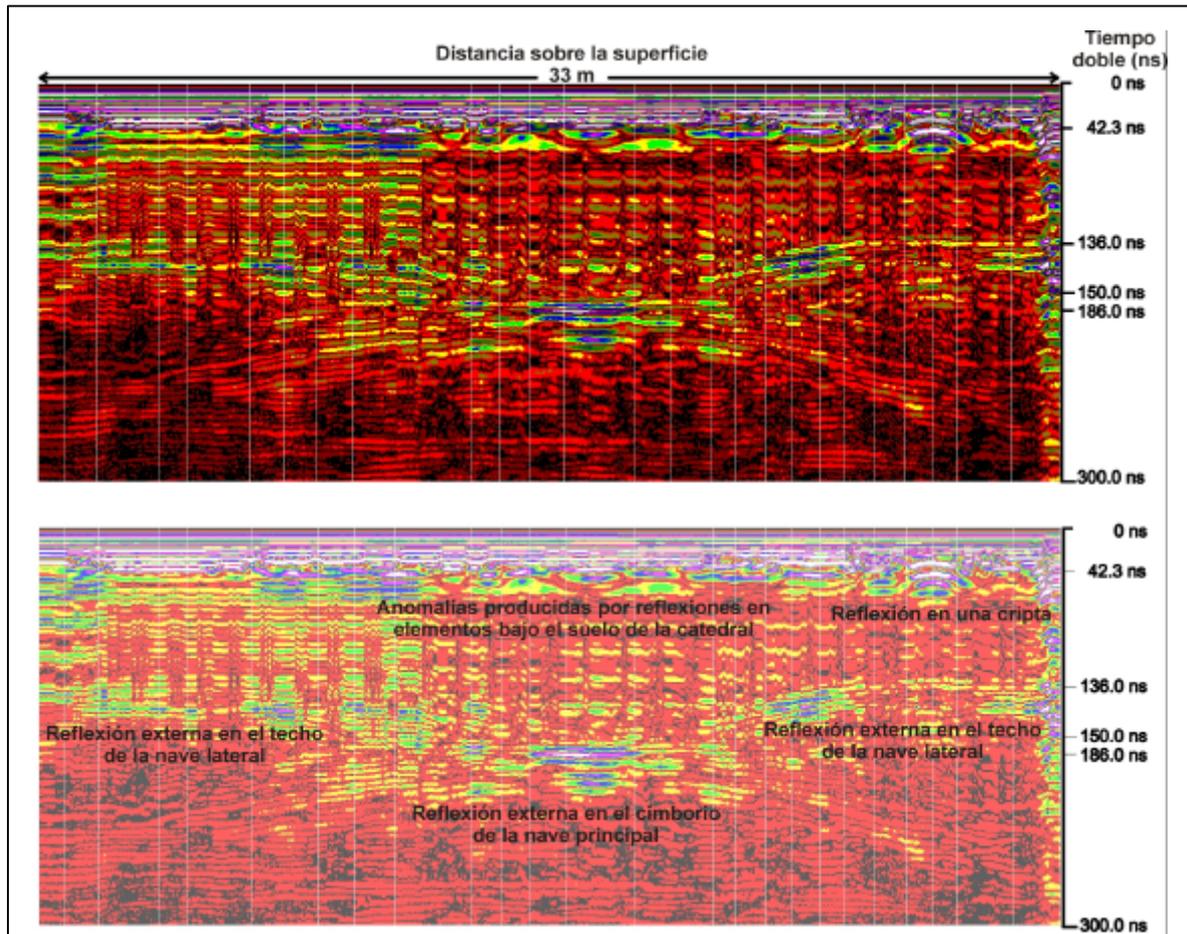


Figura 17.1. Registro obtenido con la antena de 100 MHz (3107 de GSSI) con un rango de 300 ns en la Catedral de Valencia e interpretación de sus anomalías. Se detectan reflexiones externas al medio para tiempos superiores a los 136 ns y reflexiones internas para tiempos menores. La separación entre líneas verticales equivale a una distancia horizontal de 1 m.

La mayor dificultad para interpretar este tipo de registros es que en un mismo radargrama se mezclan reflexiones externas e internas al medio. Por ejemplo, en el registro de la figura 17.1, además de las tres reflexiones externas comentadas, para tiempos de propagación menores, se han registrado eventos procedentes de reflexiones en elementos del subsuelo, como es el caso de la cripta que se observa al final del registro y que también aparece en los demás radargramas adquiridos en el perfil P5 con otras antenas y/o menores rangos de registro.

Para evitar estos problemas, hay que realizar una cuidadosa planificación del estudio, analizando las posibilidades y limitaciones de cada antena. Durante la adquisición de datos, es importante llevar una relación de los elementos externos

al medio en los que se puede producir este problema, anotando la mínima distancia de éstos hasta el perfil así como su tamaño.

Al trabajar al aire libre conviene anotar la altura de las cubiertas atravesadas o la posición de las líneas de alta tensión. En el interior de edificios o de cualquier otro recinto (minas, túneles, bajo puentes, etc.), conviene anotar sus dimensiones y la distancia entre la antena y cada elemento arquitectónico en todos los puntos de los perfiles. Estas consideraciones son de especial importancia en el caso de trabajar con antenas no apantalladas.

Para identificar este tipo de eventos y separarlos de las reflexiones internas es necesario realizar un análisis exhaustivo del registro.

Una forma de localizar estos eventos sobre el radargrama es encontrar las señales que, por posición horizontal y tiempo doble de propagación, pueden corresponder con los elementos anotados durante la adquisición de datos en campo. Para comprobar que realmente se trata de reflexiones en elementos externos y, por lo tanto, asociados con la propagación de la señal en el aire, se puede analizar la excentricidad de la hipérbola que producen. Las hipérbolas que corresponden a la propagación en aire tienen mayor excentricidad, pudiendo parecer casi rectas para distancias pequeñas. En la figura 15.28, se muestra gráficamente esta diferencia entre hipérbolas producidas con diferentes velocidades: $v=c=30$ cm/ns y $v=7$ cm/ns, obtenidas para un mismo tiempo doble de propagación.

La reflexión externa central de la figura 17.1 se puede modelar por la hipérbola mostrada en la figura 17.2 a partir de la ecuación (11.12) con un tiempo doble de propagación $t_0=150$ ns y $v=c=30$ cm/ns. La coincidencia casi exacta entre la curva de la gráfica 17.2 y la del registro de la figura 17.1 confirma la hipótesis de que se trata de una reflexión externa al medio.

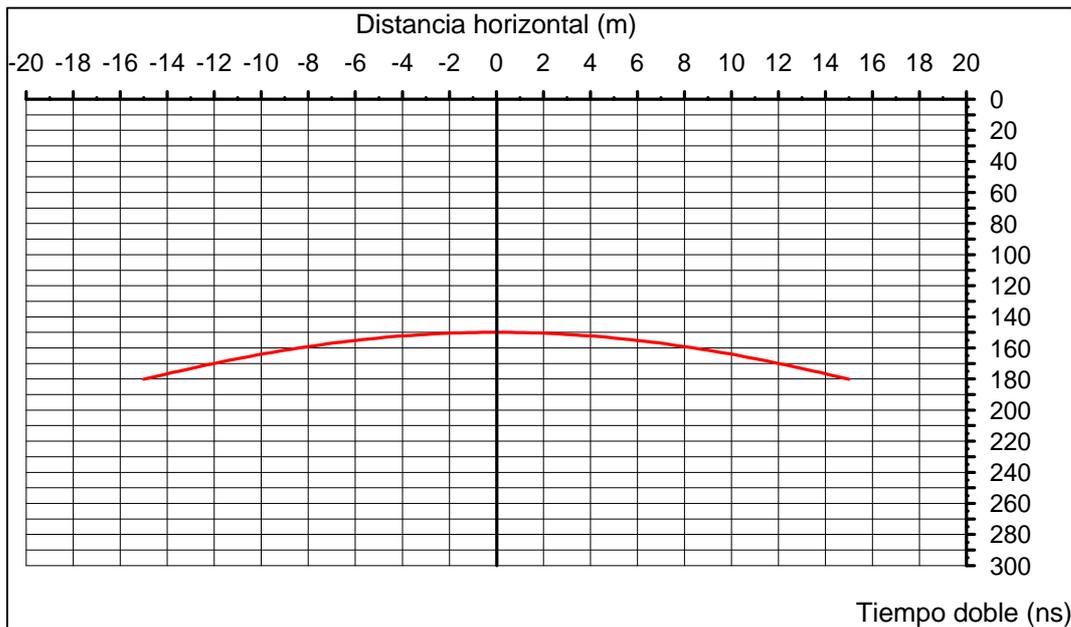


Figura 17.2. Modelo esquemático de la reflexión central observada en la figura 17.1, producida en un elemento situado a 150 ns de la antena, para propagación en el aire. El origen de distancias horizontales se ha situado sobre la vertical del elemento reflector, supuesto de pequeñas dimensiones, comparado con la distancia a la antena.

17.2.2. Reflexiones en elementos externos laterales.

El ruido por reflexiones externas es muy importante cuando se trabaja bajo cubiertas de poca altura, no sólo se produce en objetos sobre la vertical de la antena; también puede aparecer en el caso de elementos laterales externos al medio. Un ejemplo de este segundo caso se muestra en la figura 17.3, donde puede verse un segmento de radargrama obtenido con la antena de 500 MHz (3102 de GSSI), poco apantallada, durante el análisis de un túnel.

El diagrama de radiación de esta antena presentado, por ejemplo, por Arcone (1996) muestra la existencia de lóbulos laterales. El perfil en el que se obtuvo el registro de la figura atraviesa longitudinalmente el túnel (ver el esquema de la figura 17.4). La superficie emisora se dirige hacia la parte inferior de la bóveda. En la parte superior del túnel, colocados equidistantes en toda su longitud, hay unos ventiladores metálicos de grandes dimensiones. En la figura 17.3 se distinguen las reflexiones en los ventiladores (reflexión en la parte izquierda

inferior de la figura 17.3) antes de llegar junto a ellos con la antena. También se observa la reflexión producida en el hastial² situado tras la antena, emplazada ésta sobre el elevador móvil. Se observa en toda la longitud horizontal del registro de la figura 17.3, en su parte central. Estas dos reflexiones externas, de gran amplitud, se superponen a las reflexiones internas.

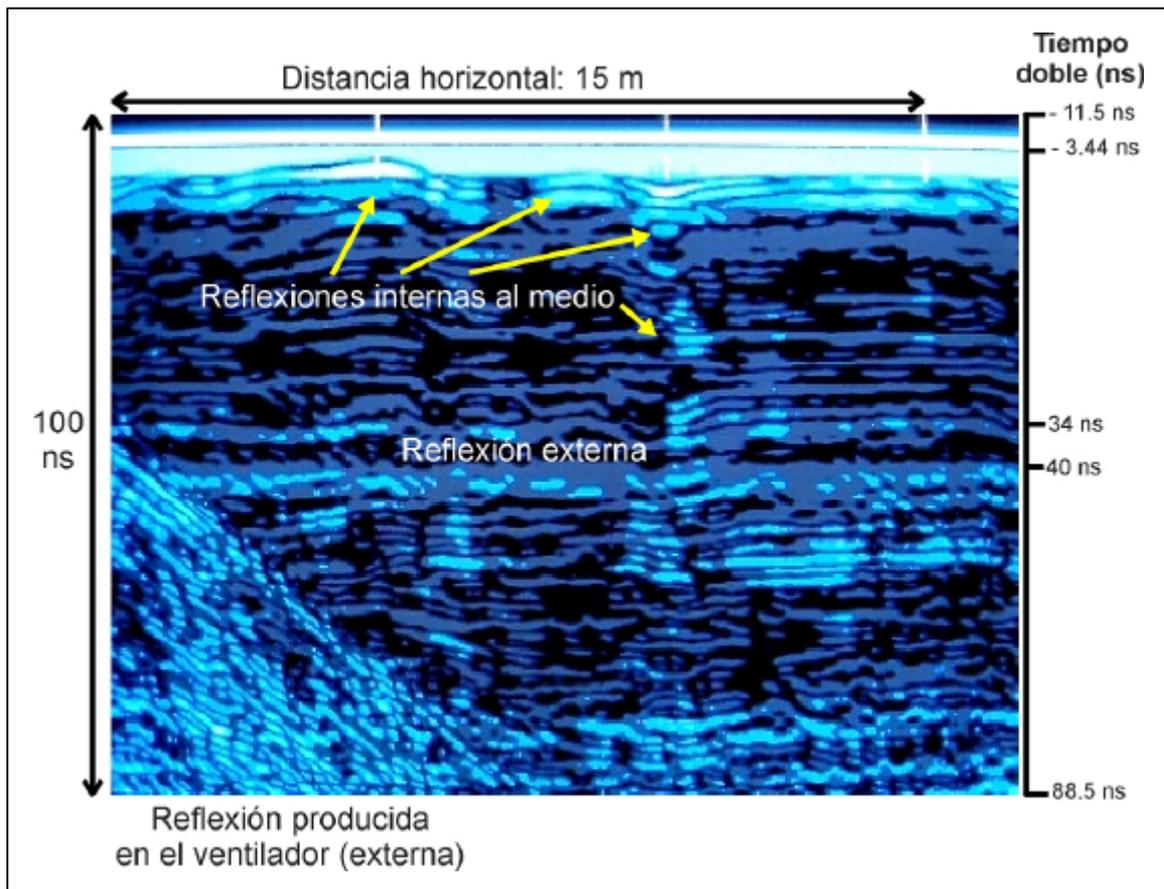


Figura 17.3. Segmento de un registro obtenido en un túnel. Las fuertes reflexiones observadas en la parte inferior izquierda se han ocasionado en un ventilador externo al medio. La reflexión continua a lo largo de todo el registro se ha producido en el hastial detrás de la antena. La distancia entre marcas verticales (parte superior del radargrama) equivale a 5 m.

² Los hastiales hacen referencia a los laterales de una excavación.

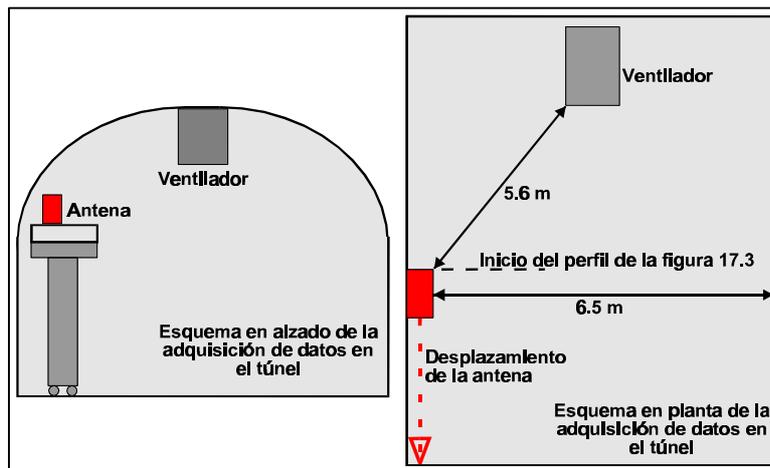


Figura 17.4. Esquema de la adquisición de los datos de la figura 17.3 en un túnel.

La hipérbola que se produce es casi una recta por la elevada velocidad de propagación ($v = c$). En los puntos más próximos al cuerpo externo anómalo (ventilador) se puede observar la curvatura de la hipérbola. La gráfica de la figura 17.5 modela las dos reflexiones externas de la figura 17.3. Como en el registro de campo, la curvatura de la hipérbola sólo es apreciable en los puntos más próximos al vértice.

La similitud entre el registro (figura 17.3) y el modelo (figura 17.5) confirma la hipótesis de que se trata de reflectores externos al medio.

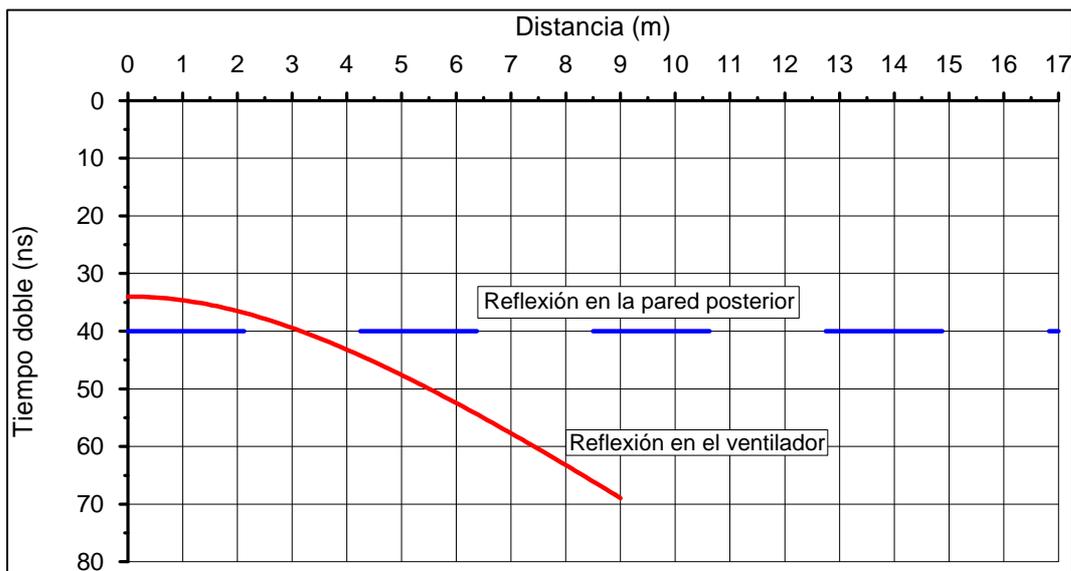


Figura 17.5. Reflexiones externas modeladas considerando la posición de los elementos que han ocasionado las anomalías de la figura 17.3, respecto de la antena.

17.3. Reflexiones laterales e internas al medio y efectos de contorno.

En este apartado se estudian las reflexiones producidas en discontinuidades laterales interiores al medio analizado. Se detallan dos casos:

- Cuando en el interior del medio se produce un cambio de velocidad al variar las condiciones del entorno. Las variaciones laterales en el comportamiento electromagnético de los medios son efectos a considerar al analizar los registros.
- Efectos de contorno en los límites del medio. Es el caso de medios limitados (muros, columnas, escalones, etc...) y también el de las muestras de laboratorio. Las dimensiones finitas de estos elementos ocasionan a menudo reflexiones laterales en su contorno. Es un problema parecido al de las variaciones internas de velocidad, pero merece la pena comentarlo aparte debido a su importancia en ensayos de laboratorio, en los que se trabaja con muestras de dimensiones pequeñas o con materiales confinados en cubetas de tamaño reducido, y por lo tanto, donde los efectos de contorno pueden adquirir una gran importancia.

17.3.1. Cambios laterales de la velocidad de propagación.

Las variaciones laterales de la permitividad efectiva del medio ocasionan cambios en la velocidad de propagación de las ondas. De este modo, el medio se puede dividir en sectores, definido cada uno de ellos por una ϵ_r característica. Dentro de cada sector la conversión de tiempos dobles a profundidades se realiza a partir de una velocidad de propagación característica diferente. Al analizar un medio no es extraño encontrar este tipo de cambios laterales; un cambio en las condiciones de saturación y porosidad produce variaciones importantes en la permitividad efectiva. En algunos medios, como en muros de hormigón, algunos autores como Reynolds (1997) han considerado variaciones de este ϵ_r de hasta ± 15 , en pocos metros de longitud.

En la figura 17.6 se muestra un radargrama donde se observan los efectos de estos cambios laterales. Este mismo registro ha sido analizado con mayor detalle en el capítulo 13, al tratar las aplicaciones del radar de subsuelo al estudio de lesiones causadas por humedad.

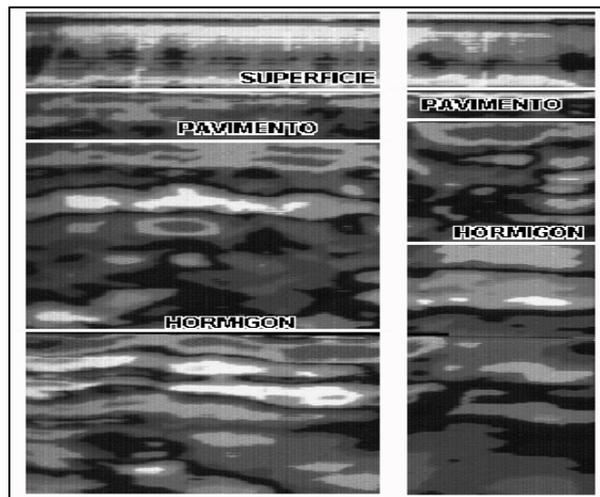


Figura 17.6. Registro interpretado considerando un cambio lateral en la velocidad de propagación de la onda por el medio (capítulo 13).

Otro ejemplo de un mismo suelo donde se aprecian cambios laterales de velocidad es el de la figura 17.7, donde pueden verse tres registros obtenidos en cada uno de los casos estudiados en el capítulo 10. Cada uno de ellos corresponde a un mismo suelo con diferentes condiciones de humedad y compactación, caracterizado por un valor de la permitividad relativa efectiva de 4, 7.7 y 15.6. Dichos valores han sido obtenidos utilizando muestras 36, 37 y 37 cm de espesor, respectivamente. Los tiempos dobles de propagación correspondientes a la llegada de la reflexión en la base de la cubeta, para cada uno de los tres casos, son de 4.8, 6.8 y 8.7 ns.

De aquí se concluye que, para un mismo material, diferentes condiciones de porosidad y saturación implican una permitividad efectiva característica distinta. Si estas variaciones en las condiciones del medio no se consideran en la interpretación, el paso de tiempos dobles de propagación a profundidades puede tener errores importantes.

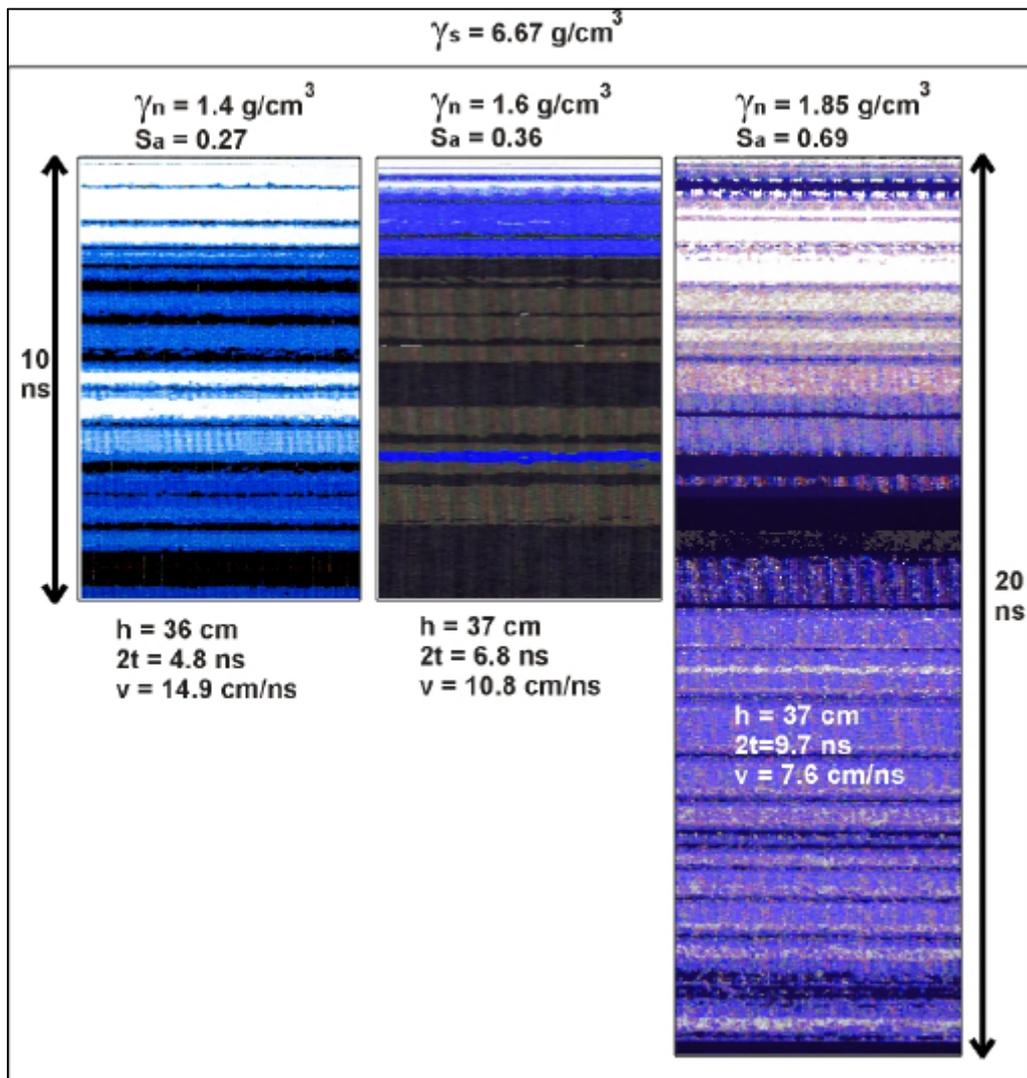


Figura 17.7. Tres registros obtenidos en un mismo material con diferentes condiciones de saturación y compactación. En cada uno de ellos se indica la profundidad a la que se localiza la superficie reflectora (h), el tiempo doble de propagación de la reflexión ($2t$) y la velocidad de propagación de la onda (v). γ_s es el peso específico del sólido, γ_n el peso específico aparente de la muestra y S_a la saturación.

17.3.2. Efectos de borde.

Es un problema similar al de los cambios laterales de velocidad internos al medio. Se trata de un efecto que hay que tener en cuenta sobre todo al realizar experimentos a escala en laboratorio.

Cuando se interpreta un registro hay que tener cuidado y no confundir los eventos debidos a los contornos con anomalías interiores al medio. Una forma de diferenciar estos efectos de borde no deseados puede ser la estimación de las distancias comentadas para cada radargrama.

La energía que emiten las antenas utilizadas con el radar de subsuelo está radiada en forma de lóbulos (capítulo 5), concentrando casi el 90% en el lóbulo principal, que se puede aproximar por un cono, y por tanto, la zona irradiada³ define un área elíptica (figura 17.8).

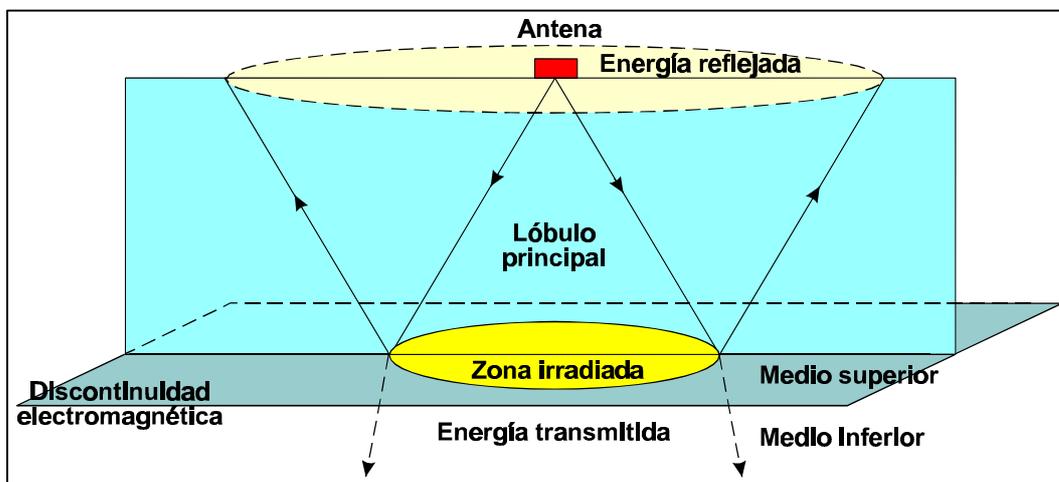


Figura 17.8. Zona de la discontinuidad electromagnética irradiada por la antena (huella de la antena).

Si se mantiene la antena situada a una cierta altura sobre la superficie del medio estudiado, el diámetro mayor de esta área se puede calcular aplicando la ley de Snell, tomando como semiángulo del cono 45° :

$$\frac{\text{sen } 45^\circ}{c} = \frac{\text{sen } r}{v(2)} \quad (17.1)$$

Donde r es el ángulo de refracción y $v(2)$ la velocidad de propagación en el medio inferior (figura 17.9).

³ La zona irradiada se define como el área determinada por la intersección del lóbulo principal con el reflector.

A partir del esquema de la figura 17.9, se calcula el ángulo de refracción, que disminuye si la permitividad del medio inferior es más elevada. Con este ángulo se obtiene el diámetro del área de incidencia del mayor porcentaje de energía (zona irradiada de la figura 17.8). El diámetro de esta área se puede obtener con la siguiente expresión:

$$\text{diam.} = 2d + D = 2(h(2) \operatorname{tg} r + h(1) \operatorname{tg} 45^\circ) \quad (17.2)$$

Donde $h(1)$ es la distancia entre la antena y la superficie del medio y $h(2)$ la distancia entre la superficie del medio y la superficie reflectora (figura 17.9).

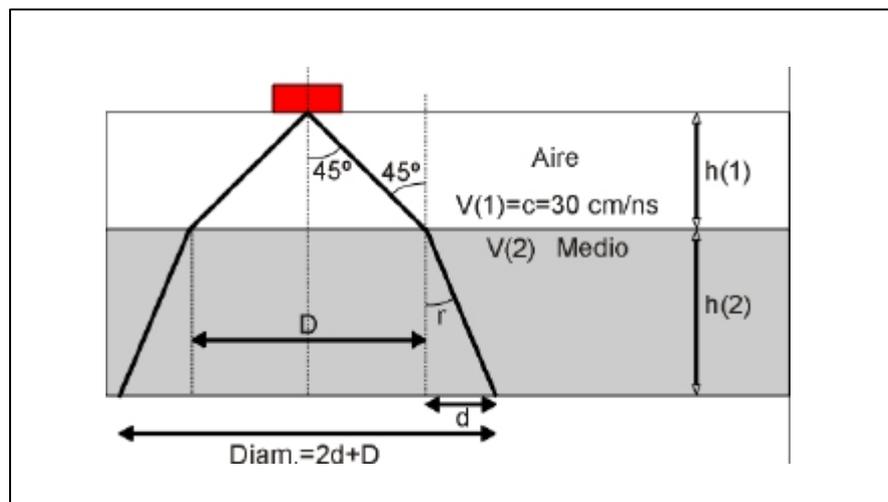


Figura 17.9. Esquema que muestra el diámetro del área de incidencia del lóbulo principal de la antena.

Además de considerar el área de incidencia del lóbulo principal, hay que tener en cuenta que la mayor parte de la vibración que detecta la antena es debida a la contribución de todos los elementos del frente de ondas que forman parte de la primera zona de Fresnel, cuyo diámetro depende de la longitud de onda de la radiación incidente y de la distancia entre la antena receptora y la superficie reflectora (ecuación 4.23). La figura 17.10 muestra como se define la primera zona de Fresnel (huella de la antena).

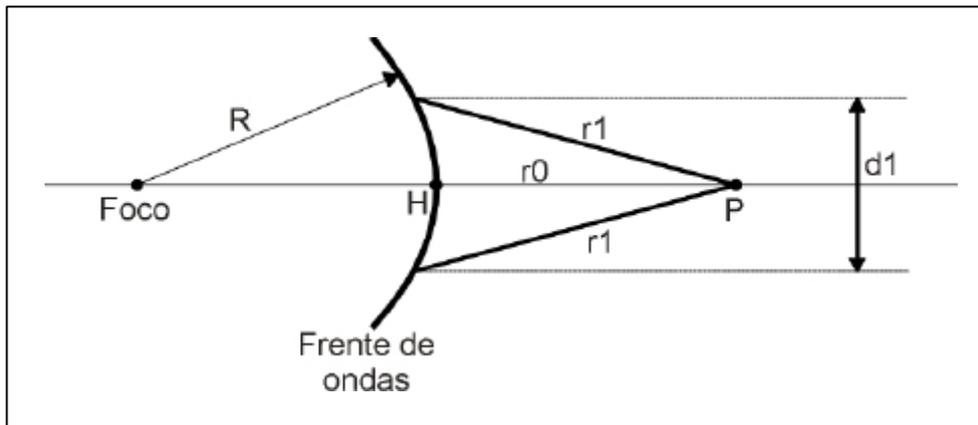


Figura 17.10. Esquema que muestra la definición de la primera zona de Fresnel.

Caso 1.

Los dos efectos mencionados son la causa de los conocidos registros hiperbólicos en el caso de superficies reflectoras pequeñas de contorno limitado. Este efecto, aunque permite calcular velocidades de propagación, también puede introducir, en algunos, casos ruido en los radargramas. Es el caso del registro mostrado en la figura 17.11, adquirido a lo largo de un muro de 12 cm de espesor, tal como se señala en el esquema de la figura 17.12. El registro tiene un rango de 8 ns y la ganancia es de 18 dB, constante para todo el rango del radargrama. Este mismo registro se ha analizado en el capítulo 11 (figura 11.14).

En primer lugar, se calcula el diámetro de la zona de incidencia del lóbulo principal. En este ejemplo (figura 17.11) se tiene que $h(1)=5$ cm, $h(2)=12$ cm y la permitividad es de 6.5 ($v = 11.7$ cm/ns). Con la ecuación 17.1, se obtiene un ángulo de refracción de 16.1° . Con la expresión 17.2, se calcula el diámetro buscado, que resulta de 17 cm.

A continuación, se calcula la primera zona de Fresnel. Para ello se necesita conocer la frecuencia de la radiación. La antena utilizada es la de 1 GHz (modelo 3100 de GSSI). Analizando el espectro de frecuencias, en el caso del registro de la figura 17.11, se tiene que la frecuencia central queda situada cerca de los 800 MHz. Con esta frecuencia y la velocidad de propagación estimada experimentalmente, se calcula que la longitud de onda en el muro es de unos 14.6

cm. A partir de la longitud de onda calculada y utilizando la expresión 4.23, se obtiene que la primera zona de Fresnel tiene un diámetro de 15.1 cm.

Con los datos obtenidos, se puede calcular aproximadamente la separación mínima entre la antena y el borde para que no se produzca reflexión en esta discontinuidad. En este caso, dicha distancia es de entre 10 y 12 cm, tomando como distancia cero la posición del ápex de la hipérbola (anomalía A de la figura 17.11). Sin embargo, el registro utilizado es un radargrama complejo ya que el muro es de poco espesor (problema de campo cercano, capítulo 8), lo que dificulta el análisis de los tiempos de propagación.



Figura 17.11. Registro de 8 ns de rango en el que podemos observar dos hipérbolas. La que se encuentra centrada en el radargrama (A) está ocasionada por una barra metálica situada tras el muro. A la derecha del registro observamos la hipérbola producida por el final del muro (B).

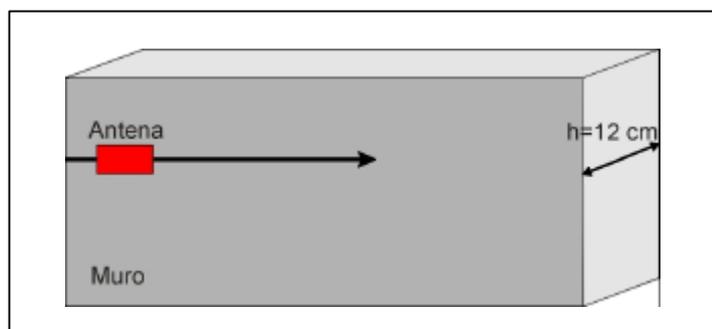


Figura 17.12. Esquema del muro donde se ha obtenido el radargrama de la figura 17.11.

Caso 2.

En el siguiente ejemplo se aprecian más claramente los efectos de borde mencionados. La antena se ha situado a 20 cm de la discontinuidad aire-muro (borde del muro), como se aprecia en el dibujo de la figura 17.13.

En el registro obtenido se observan eventos relacionados con los efectos de contorno (figura 17.14). Centrada en el radargrama, se observa una anomalía evidente que indica la presencia de un tubo metálico situado en la parte posterior del muro. Esta es la reflexión que se quiere analizar y el principal objeto estudio. Sin embargo, en el registro también es posible apreciar una zona (inicio del radargrama, a la izquierda del registro) en la que se observan unas anomalías también relativamente importantes. Este sector corresponde con la mínima separación entre la antena y el borde del muro. El inicio del perfil queda situado a 20 cm del borde de la pared. A partir de este punto la antena se aleja en sentido contrario.

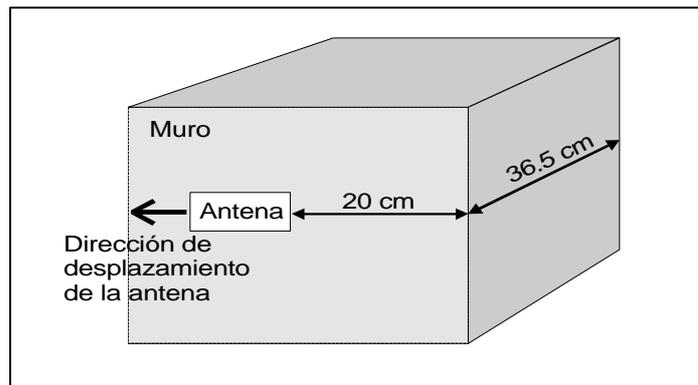


Figura 17.13. Esquema del muro en el que se ha efectuado el ensayo donde ha podido registrarse el efecto de contorno.

El muro es de hormigón armado recubierto por losas decorativas. Su espesor es de 36.5. El rango del registro es de 15 ns y la antena utilizada es la de 900 MHz (3101 de GSSI). El análisis del espectro de la reflexión indica que la frecuencia central se ha desplazado a cerca de los 700 MHz.

En el sector derecho del radargrama de la figura 17.14 no se observan anomalías importantes, aparte de la reflexión en el contacto muro-aire de la superficie posterior, producida a 5 ns de tiempo doble de propagación. Con esta anomalía, se

ha calculado la velocidad de propagación promedio en el muro, que resulta de 14.6 cm/ns.

Para analizar los efectos de contorno, se considera que la antena únicamente emite radiación en su lóbulo principal (figura 17.8), despreciando la radiación en los lóbulos secundarios. Dentro del lóbulo principal, se considera que la mayor parte de la energía captada por la antena es la incidente en la primera zona de Fresnel.

Se trata de dos hipótesis restrictivas, ya que al analizar el radargrama se considera el diagrama de radiación de la antena completo y además no se tiene en cuenta la aportación de los elementos situados fuera de la primera zona de Fresnel. Por este motivo, aunque los resultados que se obtienen del cálculo coinciden con las anomalías del registro de la figura 17.14, algunos de los eventos del radargrama no quedan explicados. Tampoco se han tenido en cuenta efectos de superposición de señales e interferencias. No obstante, estas restricciones no afectan a la bondad de la interpretación.

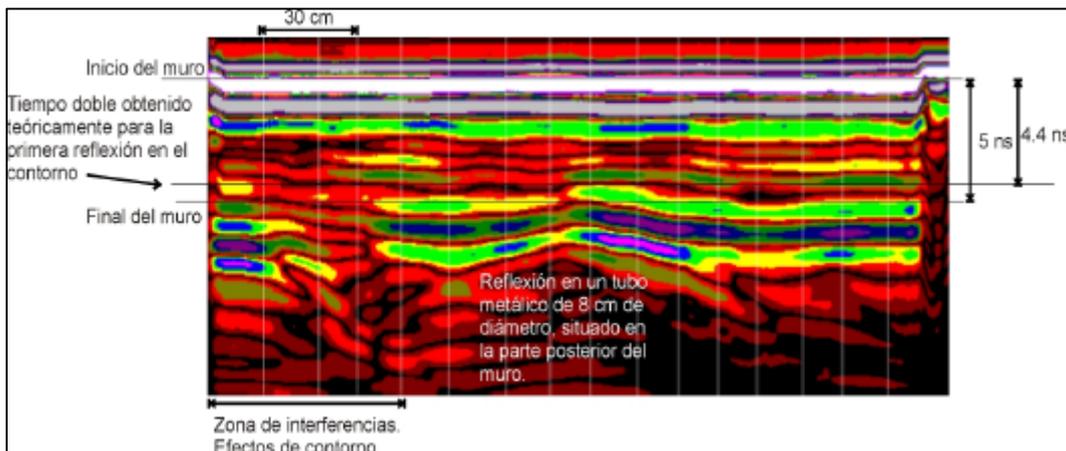


Figura 17.14. Registro de rango 15 ns obtenido en el muro indicado en el esquema de la figura 17.11. A la izquierda del registro se observan efectos de borde. Separación entre líneas verticales: 15 cm.

La longitud de la onda en el vacío es próxima a los 33 cm (antena de 900 MHz). Sin embargo, al considerar la propagación de la onda en el interior del muro, hay que tener en cuenta el desplazamiento del espectro hacia las bajas frecuencias y la disminución de la velocidad de propagación de la radiación. Con la velocidad de propagación se estima la longitud de onda de la radiación en el interior del muro, obteniendo un valor de $\lambda \approx 21$ cm. El radio de la primera zona de Fresnel es de

$d=30$ cm, calculado considerando un valor de r_0 igual al espesor del muro (36.5 cm).

El punto del muro que produce los efectos de contorno cuando el perfil se está iniciando, es decir, cuando la antena está separada 20 cm del borde del muro se muestra en el esquema explicativo de la figura 17.15. Se tiene que calcular la distancia p y la distancia L . Esta última proporciona, a partir de la velocidad obtenida anteriormente, el tiempo doble de propagación de esta contribución que introduce ruido en el registro. Utilizando triángulos equivalentes, se obtienen los valores de $p=25$ cm y de $L=32$ cm, lo que quiere decir que la sección del contorno del muro situada entre los 28 cm y los 36.5 cm (final del muro) introduce ruido en el radargrama.

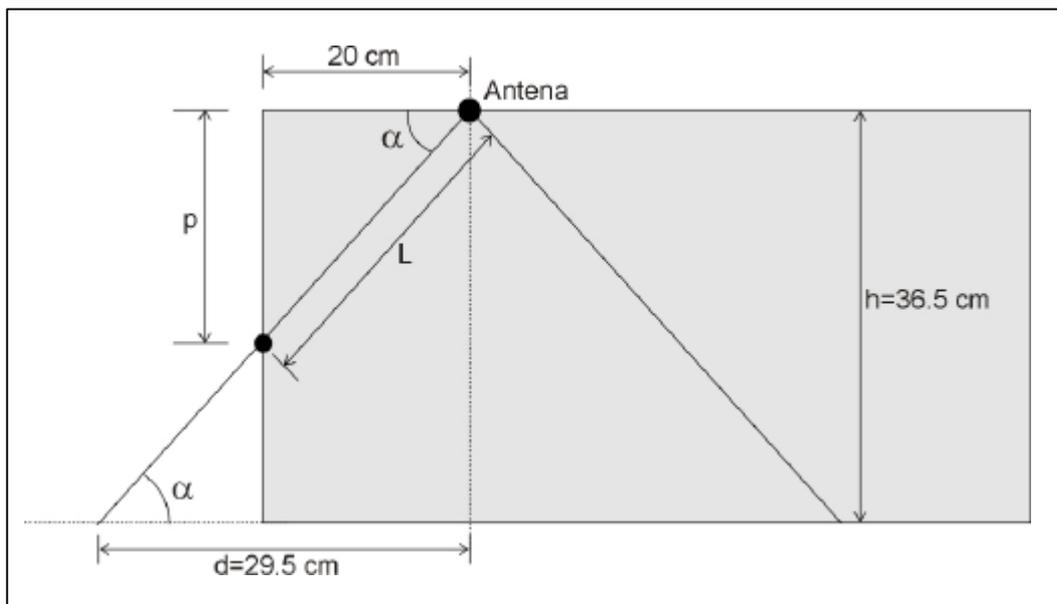


Figura 17.15. Esquema que determina el punto del extremo del muro que introduce efectos de contorno en el registro.

El tiempo doble que se corresponde con la distancia L es de 4.4 ns. Es decir, en el inicio del registro, es de esperar una reflexión a este tiempo doble, registrada antes que la reflexión vertical en la base posterior del muro. En el registro de la figura 17.14 se observa este evento, caracterizado por un aumento de amplitud a un tiempo menor que el correspondiente a la reflexión en la base del muro.

Para calcular el tiempo doble al que deja de ser registrado el efecto de borde, se determina la distancia L_f (figura 17.16) que se obtiene cuando la separación de la

antena del borde del muro es igual al radio de la primera zona de Fresnel. En este caso se obtiene que la distancia es $L_f=46.9$ cm, lo que corresponde a un tiempo doble de propagación de 6.4 ns. Esta distancia horizontal se puede ver en el registro experimental, ya que a partir de lo que correspondería con 30 cm de separación entre la antenna y el borde del muro no se observan efectos de contorno importantes (ver la figura 17.14). Sin embargo en el registro de la figura 17.14 se puede ver que se han registrado efectos a mayores tiempos de propagación. Esta discordancia entre lo que se ha calculado y los registros experimentales, se puede explicar a partir de los efectos de superposición de señales, que no han sido tenidos en cuenta en este ejemplo.

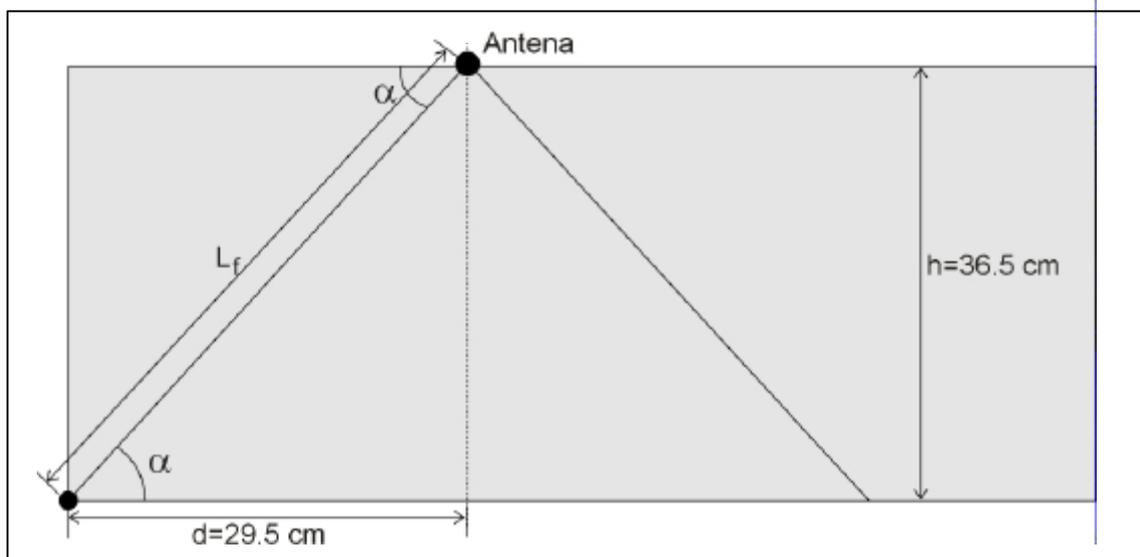


Figura 17.16. Esquema explicativo para determinar el último punto del borde del muro que introduce efectos de contorno en el registro, dadas las hipótesis iniciales aplicadas.

Se puede concluir que algunos de los eventos quedan explicados mediante el proceso descrito, pero se observan anomalías que las hipótesis de partida no permiten explicar. Estos efectos son debidos a la contribución de la segunda zona de Fresnel y también a la existencia de los lóbulos laterales (secundarios) que no se han tenido en cuenta. Aunque algunos autores (por ejemplo, Reynolds, 1997; Arcone, 1996) indican que el 90% de la energía emitida se concentra en el lóbulo principal, los efectos de superposición de ondas pueden ser importantes (capítulo 8).

Sin embargo, estos cálculos permiten conocer la distancia que tiene que existir entre la antena y las discontinuidades del medio para evitar los efectos de borde.

17.4. Reflexiones múltiples.

El problema de las reflexiones múltiples se produce sobre todo cuando en un medio poco atenuante hay una superficie fuertemente reflectora (por ejemplo una lámina metálica).

Si la reflexión es fuerte y la atenuación que se produce entre la superficie reflectora y la antena es pequeña, o bien si éstas están separadas por un tiempo doble de propagación pequeño, la amplitud de la onda que incide en la antena es grande. Parte de esta energía que regresa hasta la antena se refracta, pero parte de ella se refleja para propagarse de nuevo hacia la superficie reflectora. Como la atenuación durante la propagación por el medio es pequeña el porcentaje de energía que alcanza la mencionada superficie es lo suficientemente importante para que la parte que se refleja pueda ser detectada de nuevo por la antena. Este proceso se repite hasta que la amplitud se ha atenuado suficientemente.

Las reflexiones múltiples introducen de esta manera un ruido en la dirección temporal del registro. En muchos casos, se produce la superposición de este ruido con señales procedentes de reflectores situados a mayor profundidad y que alcanzan la antena con una amplitud menor que las reflexiones múltiples. Un ejemplo de radargrama en el que se aprecia el efecto que producen las reflexiones múltiples es el que se muestra en la figura 17.17. Este registro se obtuvo durante el estudio del Teatro Romano de Sagunto, en la *orchestra*. La presencia de una rejilla metálica produce las reflexiones múltiples que aparecen en el registro durante una longitud aproximada de 3.5 m y durante los 80 ns de duración del mismo.

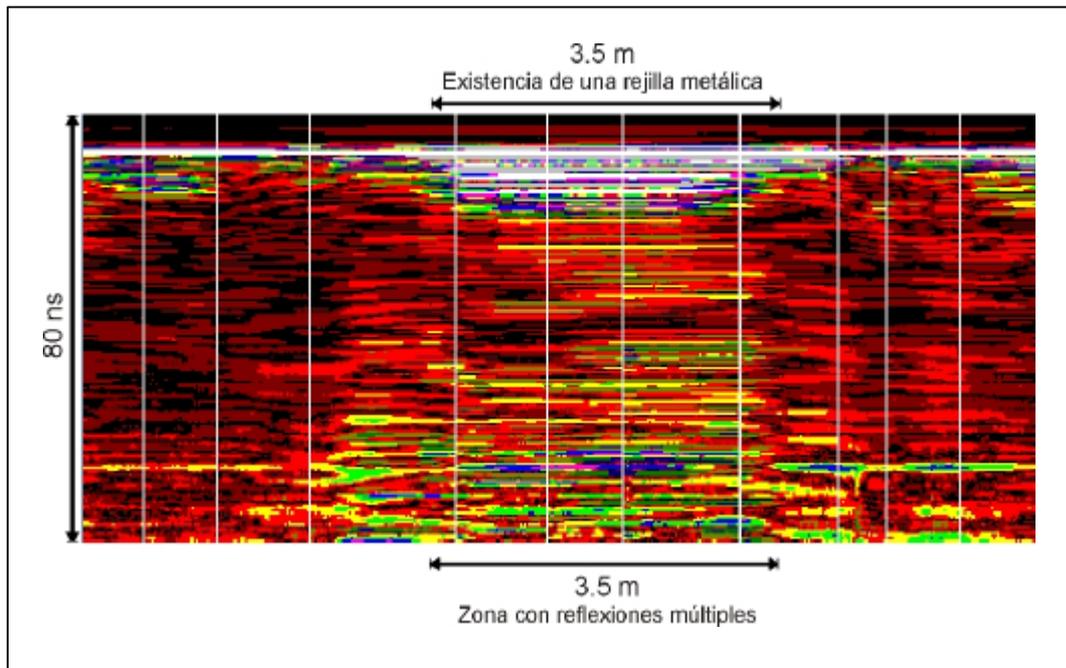


Figura 17.17. Ejemplo de registro de reflexiones múltiples obtenido durante el estudio del Teatro Romano de Sagunto. El rango son 80 ns. La separación entre líneas verticales representa un metro sobre la superficie del medio analizado.

La interpretación de estos registros es compleja, sobre todo si la amplitud de las reflexiones múltiples es importante. Este efecto se intenta paliar utilizando una deconvolución predictiva (capítulo 7). Algunos autores (por ejemplo, Maijala, 1992) consideran que la aplicación de filtros ha de realizarse con cuidado, ya que en los registros fuertemente ruidosos o bien los obtenidos en medios complicados el tratamiento no proporciona resultados satisfactorios.

17.5. Registro de elementos de pequeño tamaño próximos entre sí.

En algunos estudios con radar de subsuelo resulta complicado determinar la situación de los elementos anómalos inmersos en el medio. Esto sucede en el caso de objetos de pequeño tamaño situados uno cerca del otro. Un ejemplo es el caso de una distribución de barras metálicas o armaduras colocadas horizontalmente; se trata de elementos similares, de pequeña sección y situados a corta distancia unos

de otros. Es el caso del registro que se muestra en la figura 17.18, obtenido con la antena de 1 GHz (3100 de GSSI).

El objetivo es obtener la posición de cada una de las barras horizontales inmersas en el hormigón. Este estudio lo menciona García (1997) en su tesis doctoral.

Como puede verse en la figura 17.18, dado que la separación entre barras es de 18 cm y la sección de las barras de entre 43 y 57 mm, parece lógico suponer que cada uno de los elementos anómalos se encuentra en la posición asociada a un máximo de energía y a un tiempo doble de propagación mínimo. Sin embargo, cuando se comparan los radargramas con la información disponible sobre la estructura estudiada se observa que la posición de las barras se corresponde con la zona entre dos hipérbolas consecutivas y no con el ápex de cada una de ellas (punto de mínimo tiempo doble de propagación). También se observa que se tiene una amplitud máxima en el vértice y entre cada dos hipérbolas. García (1997) apunta una explicación a este fenómeno basada en la geometría del problema y en las interferencias entre las reflexiones producidas en dos barras consecutivas, ocasionadas porque la emisión de la antena no es un impulso, sino una senoide.

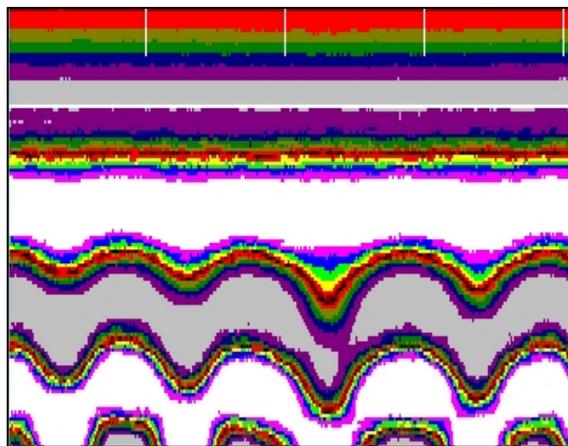


Figura 17.18. Registro obtenido en un perfil que corta transversalmente las barras cilíndricas metálicas existentes en el interior de un muro de hormigón. El rango del registro es de 4 ns. La separación entre líneas verticales en la parte superior se corresponde con 20 cm de perfil.

Esta hipótesis explica la existencia del máximo de amplitud entre dos barras, pero no los máximos entre las hipérbolas ni el motivo por el cual el tiempo mínimo de propagación se obtiene entre los dos elementos anómalos y no cuando la antena queda situada sobre cada uno de ellos, como sería de esperar (figura 7.21).

Por otra parte, García (1997) indica que estas interferencias producirían, dada la geometría del sistema, que los mínimos de energía se correspondieran con las barras, ya que considera que se trataría de interferencias destructivas. En realidad, en los registros, la posición de las barras está determinada con un tiempo doble máximo que corresponde con un máximo de energía. El punto central entre dos barras corresponde a un tiempo mínimo pero también a un máximo de energía. Esto es debido a que el radar no detecta las barras como elementos separados. Como sobre las barras y en el espacio entre barras se tiene un máximo de amplitud, la diferencia entre las dos posiciones es sólo debida a los tiempos.

Este problema, que impide determinar con exactitud la situación de los elementos buscados, se puede reducir al problema de determinar en cada caso de estudio los límites de resolución para conocer si el problema analizado queda dentro o fuera de dichos límites.

La huella de la antena (Conyers y Goodman, 1997) está relacionada con la profundidad de estudio, con el semiángulo del lóbulo principal y con la longitud de la onda. Con estos conceptos, se puede definir la resolución horizontal del estudio.

Otro factor que influye en los registros son las interferencias entre señales provenientes de las reflexiones en elementos distintos de las barras, es decir, las interferencias producidas entre las reflexiones ocasionadas en el conjunto de las barras y las reflexiones producidas en las superficies anterior y posterior del medio donde éstas se encuentran inmersas.

A efectos prácticos este problema se puede resolver realizando unos perfiles previos que permitan efectuar los cálculos de resolución. Con los datos que proporcionan dichos cálculos, se determinan los límites de resolución y se define cuándo la antena separa elementos próximos o cuando detecta estos elementos como un único objeto. Para completar este ejemplo se han planteado unos ensayos de laboratorio que consisten en registrar, dado un medio determinado, la situación de tubos o barras metálicas inmersas en él o situadas detrás de él. Se presentan a continuación dos de los casos analizados. En el primero, el medio es agua. En el segundo, se trata de un muro de hormigón.

17.5.1. Caso 1: dos barras inmersas en agua.

En el primer caso se ha escogido el agua porque se trata de un medio homogéneo y conocido sobre el que ya se han realizado otros ensayos, que presenta una velocidad de propagación característica muy lenta, lo que permite tener una mejor resolución vertical (mayor focalización del lóbulo principal), permitiendo trabajar con espesores menores del medio.

El dispositivo del ensayo consiste en una cubeta de 54 cm de ancho, 73.7 cm de largo y 19 cm de profundidad que contiene agua⁴. El espesor del medio (profundidad de agua) es de 15 cm. En la base de la cubeta, se ha colocado una cinta métrica de plástico para poder situar con la mayor exactitud posible dos barras cilíndricas de acero de 17 mm de diámetro cada una de ellas. En el exterior de la cubeta, sobre el agua, se ha colocado una guía de plástico con objeto de desplazar la antena a 1 cm de la superficie del agua sin que esta distancia variara en ningún momento del recorrido. La guía tiene marcas de distancia cada 5 cm para poder situar en cada instante la antena respecto a las barras del fondo de la cubeta. La antena utilizada es la de 1 GHz (3100 de GSSI). Se ha introducido una marca de posición en el radargrama cada 5 cm para facilitar la interpretación.

Registros experimentales.

El rango del registro (15 ns) se ha calculado estimando la permitividad efectiva del agua (comprendida entre 70 y 100). Diferentes autores recogen la elevada variabilidad de la velocidad en este medio, analizada realizando ensayos prácticos (Reynolds, 1997). La velocidad de propagación puede ser de entre 3 y 3.6 cm/ns. Para una profundidad de agua constante, de 15 cm, el tiempo doble de propagación de la reflexión en la base de la cubeta es de 10 y 8.4 ns para la primera y la segunda velocidad, respectivamente. Aunque el inicio del registro no se sitúe en cero exactamente, los eventos que interesan, se registran con un rango de 15 ns para poder observar la primera llegada y los efectos de la antena con claridad. Este rango también permite separar 2 cm la antena de la superficie del agua para facilitar la adquisición de datos.

⁴ Se trata de agua corriente de uso doméstico.

El primer radargrama se ha registrado sin barras para poder calcular la velocidad en el agua, ya que como se ha podido observar en los ensayos del capítulo 9, esta velocidad presenta cierta variabilidad. El evento correspondiente a la reflexión en la base de la cubeta se localiza a los 9.4 ns (ver la figura 17.19). La velocidad de propagación es de 3.2 cm/ns, lo que equivale a una permitividad efectiva de $\epsilon_{ef}=88$, valor dentro del rango de variación para este medio.

En el siguiente caso, se han introducido las dos barras metálicas en el agua, situándolas juntas en el fondo de la cubeta. El registro obtenido se presenta en la figura 17.19. La antena detecta las barras como un único elemento durante unos 7 cm del recorrido y después deja de detectarlas. El tiempo mínimo de propagación se registra en la vertical del conjunto formado por las dos barras, siendo esta zona una superficie más o menos plana con una longitud de 1.3 cm. El máximo de energía tiene una longitud de 4.3 cm y está centrado en la vertical del conjunto. Por debajo de este evento se observa que la reflexión en la base de la cubeta queda afectada por la reflexión en las barras debido a la superposición de señales.

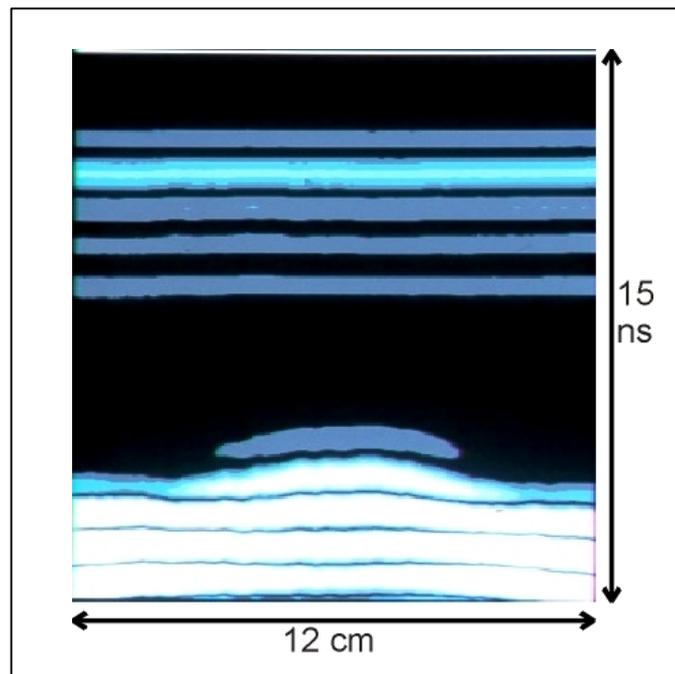


Figura 17.19. Registro obtenido en los ensayos. Medio: agua. Elementos anómalos: dos barras de acero de 17 mm de diámetro juntas, situadas en la base de la cubeta. Rango del registro: 15 ns.

A continuación se han adquirido registros separando las dos barras 4, 6, 8 y 10 cm respectivamente. Los cuatro radargramas resultantes se muestran en la figura

17.20. Se observa como va cambiando el radargrama, comparado con el obtenido con una separación entre barras de 0 cm, para el que no se distingue más que una única anomalía, hasta la máxima separación, para el que ya pueden observarse los dos eventos separados.

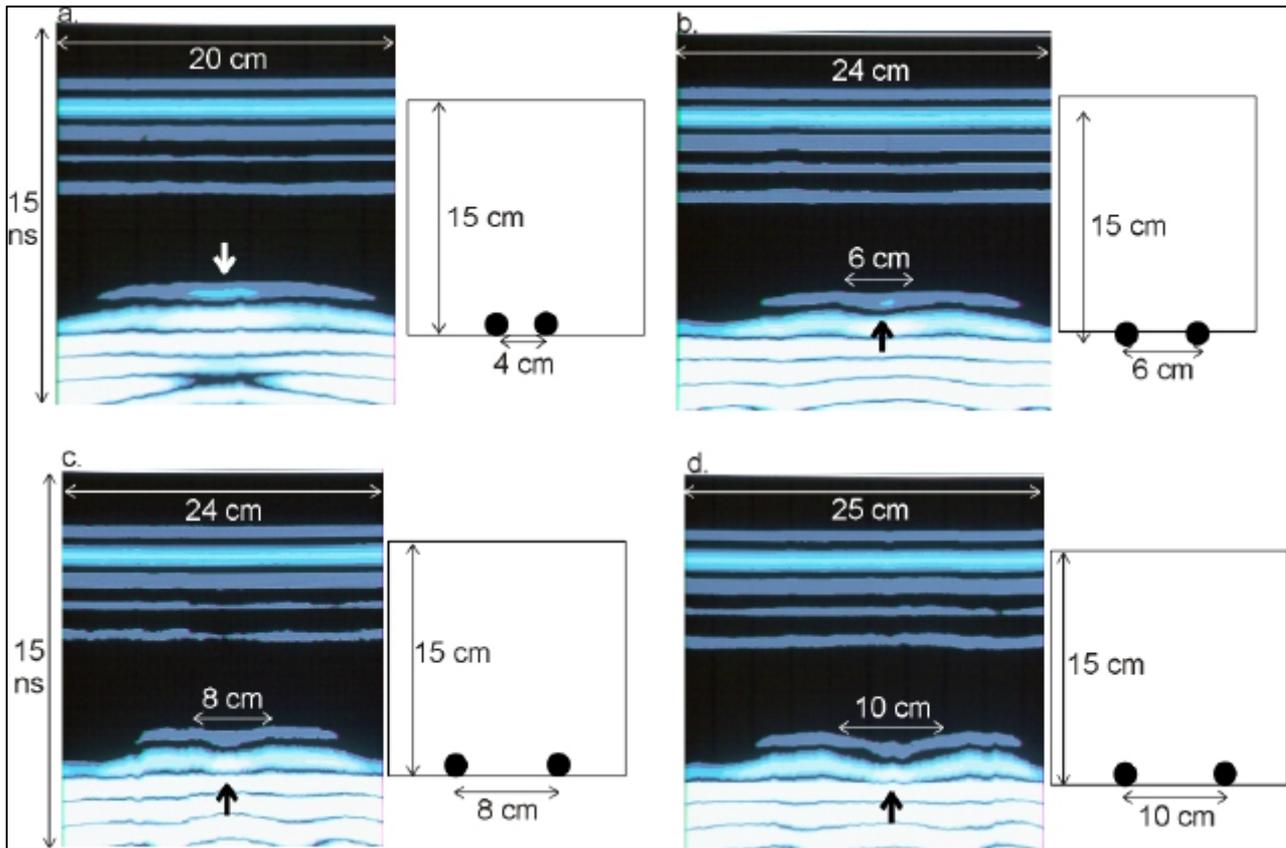


Figura 17.20. Registros obtenidos en el ensayo separando las barras: a) 4 cm, b) 6 cm, c) 8 cm y d) 10 cm. El rango de los radargramas es, en todos los casos, de 15 ns. Las flechas sobre los radargramas señalan el primer máximo de amplitud importante.

Cuando la separación es de 4 cm, el radar no permite diferenciar los dos elementos y los detecta como si se tratase de un único objeto de mayor tamaño. En este caso, la hipérbola tiene un tamaño considerable y la zona de máxima amplitud presenta una longitud horizontal de 15 cm. En la zona central de la hipérbola, hay un máximo de 4 cm de longitud de mayor amplitud, que se corresponde con el tamaño del objeto que “ve” el radar. Se observa que la longitud de la zona plana de la hipérbola (anchura del ápex), que se corresponde con el máximo de amplitud, tiene las mismas dimensiones que la separación entre las barras.

Cuando la separación entre las barras es de 6 cm, se empiezan a diferenciar los dos elementos, ya que, aunque la anomalía que se registra es continua presenta dos máximos correspondientes a tiempos dobles de propagación mínimos. La separación entre los centros de estos dos tiempos mínimos, que se observan como los vértices de dos hipérbolas unidas, es de aproximadamente 6 cm. Es interesante observar en este registro que la amplitud de la señal presenta un máximo importante en el punto de unión de las hipérbolas (figura 17.20.b), que corresponde al punto situado entre las dos barras de acero. Este máximo de energía, sin embargo, queda registrado a un tiempo doble de propagación mayor que los tiempos correspondientes a las barras. También se observa que se producen múltiples en la reflexión en las barras de acero y que la superposición entre la reflexión en las barras y en la base de la cubeta es importante y produce un máximo de amplitud en el punto entre barras. En la situación correspondiente a las barras, la amplitud de la reflexión es menor que en la correspondiente al punto central.

Cuando la separación entre las barras es de 8 cm, el radargrama muestra las mismas características que en el caso anterior, aunque las hipérbolas son menos excéntricas. El máximo de amplitud central es también algo mayor que en los casos anteriores.

Al separar las barras 10 cm, las hipérbolas de la primera llegada se hacen más pronunciadas y disminuye el tamaño de la zona central de interferencia, aunque todavía se observa como un máximo de amplitud y los efectos producidos por las dos barras todavía se solapan. En este caso, se pueden diferenciar las dos barras, aunque su situación no queda exactamente determinada ya que hay más de 10 cm entre los dos vértices de las hipérbolas de la primera llegada.

Estimación de la zona irradiada por la antena.

Hay efectos que se pueden analizar mediante la resolución horizontal del estudio. Dichos efectos dependen de diversos factores: la profundidad del estudio (15 cm), la variación del espectro de frecuencias de la señal durante su propagación por el medio y la velocidad de propagación de la señal (3.2 cm/ns). Se utiliza la primera zona de Fresnel para dar la estimación de la huella de la antena, ya que se ha

observado que los resultados obtenidos son más próximos a los resultados experimentales que los obtenidos por otros métodos.

La figura 17.21 es un espectro de amplitudes de estos registros, correspondiente a la traza central de la reflexión cuando las barras están juntas (figura 17.19). La frecuencia central del espectro del registro de la figura 17.19 (figura 17.21) está situada aproximadamente entre los 470 MHz (donde podemos ver un pico) y los 530 MHz (donde se observa un máximo más pronunciado que el anterior). El ancho de banda es de 540 MHz, con frecuencias de corte de 260 y los 800 MHz, de manera que el pico máximo de la banda (en 530 MHz) se corresponde también con la frecuencia central de la banda. Se ha producido un estrechamiento de la banda de frecuencias y un filtrado de las altas frecuencias que se ha traducido en un desplazamiento, en general, hacia las bajas frecuencias y, en particular, una disminución importante de la frecuencia central de la antena que pasa de 1 GHz en el aire a 530 MHz en el medio.

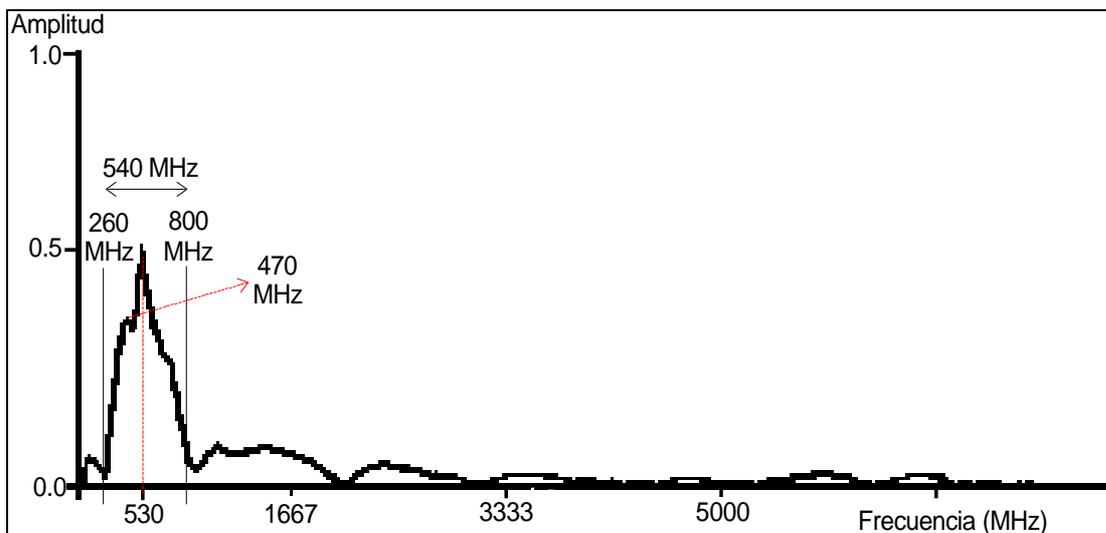


Figura 17.21. Espectro de frecuencias de una traza del registro presentado en la figura 17.18.

Los demás espectros de frecuencias correspondientes a los registros mostrados en la figura 17.20 se incluyen en el anexo 3. En ellos se puede ver que las frecuencias obtenidas son análogas a las del espectro de la figura 17.21.

La longitud de onda que se obtiene a partir de la frecuencia central (530 MHz) es de 6 cm. El radio de la primera zona de Fresnel para una distancia al reflector de

15 cm es de 10 cm. Esto explica que las barras se observen como un único elemento cuando están separadas 4 y 6 cm y que los efectos que produce cada una de ellas se solapan incluso cuando las separamos 8 y 10 cm. A los 6 cm, se empieza a notar que puede tratarse de dos elementos separados o, al menos, de un elemento no plano. Para una separación de 8 cm entre barras, se aprecian ya dos hipérbolas perfectamente diferenciadas, aunque se observan también efectos de superposición y se obtiene un evento en una posición que equivale al punto entre las dos barras. Para el caso de una separación de 10 cm, tenemos aparecen tres eventos separados: las dos hipérbolas (cada una de ellas correspondientes a una barra), y la anomalía de la (centrada entre las dos primeras), que empieza a verse como una pequeña hipérbola. Este último registro corresponde con el caso límite, ya que las barras se sitúan justo en el límite de la huella de la antena. En principio es de esperar que las separaciones superiores a estos 10 cm permitan identificar los dos eventos como anomalías separadas, pero también es muy posible que el efecto de los lóbulos laterales obligue a aumentar esta distancia.

17.5.2. Caso 2: dos barras situadas detrás de un muro.

Se ha utilizado un muro de hormigón con mampostería de 36.5 cm de espesor. Tras el muro se colocan dos tubos metálicos de 3.25 cm de diámetro y de 5.5 cm de diámetro, respectivamente. Como en el caso anterior, la separación entre los tubos se ha ido cambiando, obteniendo un radargrama para cada nueva posición. La velocidad de propagación de las ondas en el muro, calculada previamente, es de 14.6 cm/ns, la longitud de onda de 21 cm. Las antenas utilizadas en este ensayo han sido las de 1 GHz y 900 MHz (3100 y 3101 de GSSI, respectivamente).

En este caso, el medio no es homogéneo y los tubos no están inmersos en él, de manera que aparecen efectos de interferencia entre las señales reflejadas en los tubos y en la superficie posterior del muro.

La secuencia de los registros obtenidos con las antenas de 1 GHz y de 900 MHz se presentan en las figuras 17.22 y 17.23, respectivamente. Los círculos (negros en la figura 17.22 y blancos en la 17.23) indican la posición de los tubos colocados en la parte posterior del muro.

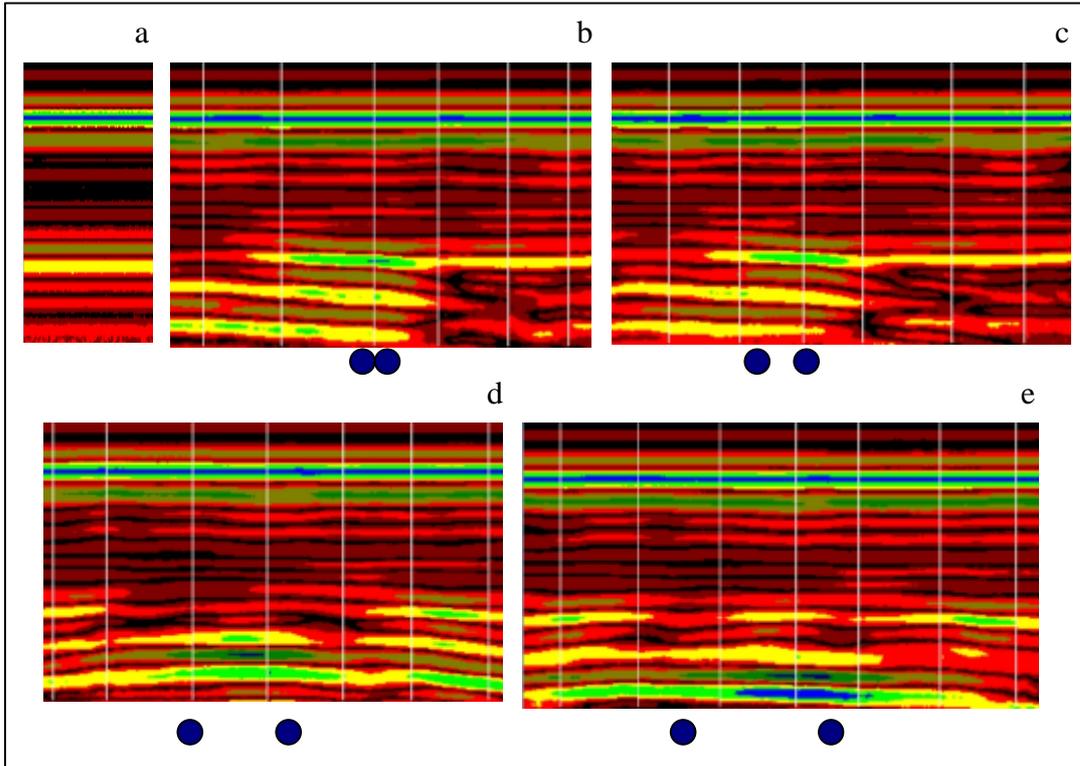


Figura 17.22. Registros de 15 ns obtenidos con la antena de 1 GHz (3100 de GSSI). Cada línea vertical son 10 cm sobre el muro. a) Registro del muro sin barras. b) 2 barras juntas. c) 2 barras separadas 6 cm. d) 2 barras separadas 12 cm. e) 2 barras separadas 18 cm.

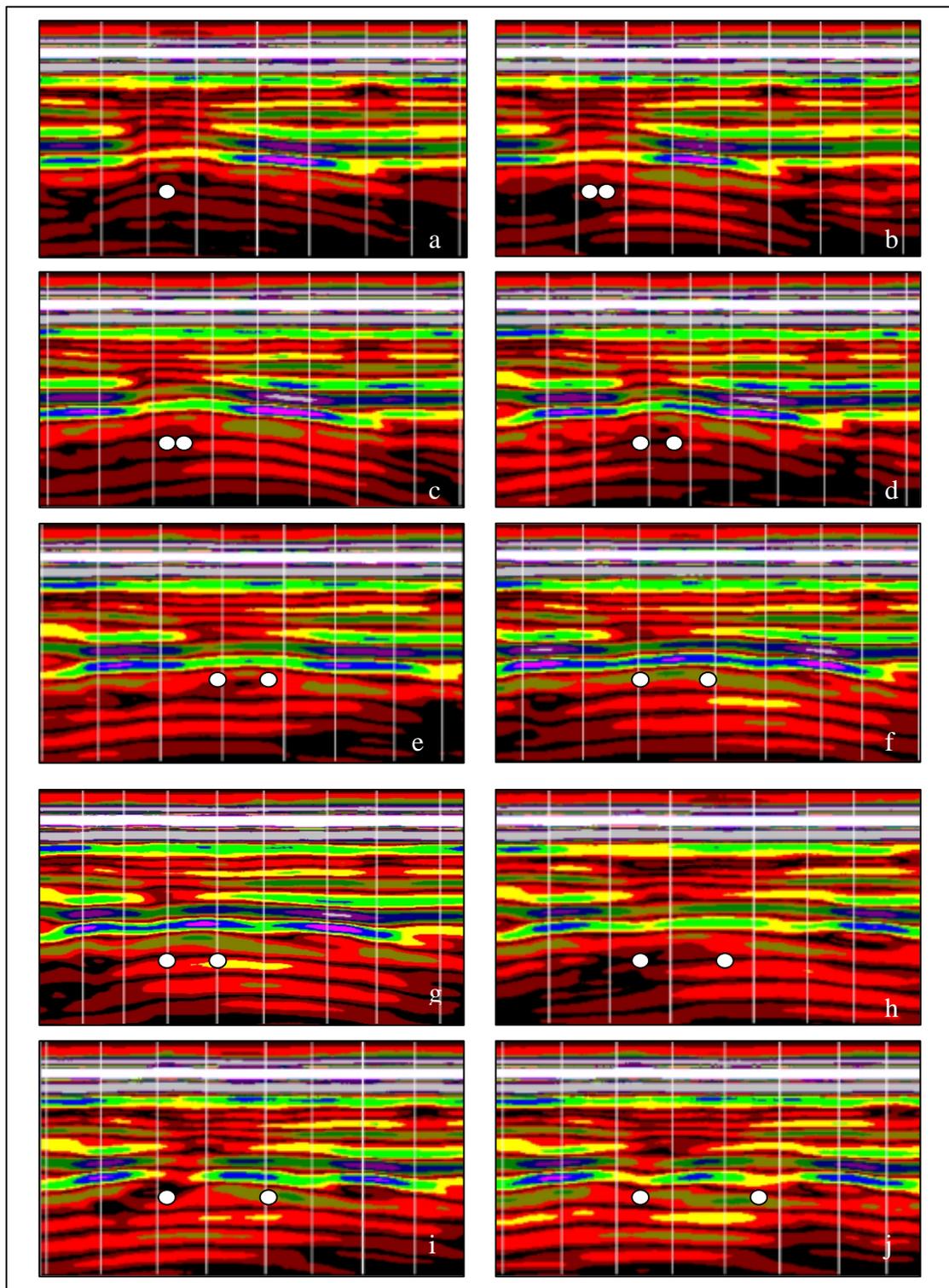


Figura 17.23. Registro de la antena de 900 MHz. Rango: 15 ns. Muro y dos tubos metálicos separados: a) 0 cm, b) 2 cm, c) 4 cm, d) 6 cm, e) 8 cm, f) 10 cm, g) 12 cm, h) 14 cm, i) 16 cm, j) 20 cm. La separación entre líneas verticales corresponde con 10 cm de muro.

El análisis de los espectros de frecuencias indica que los registros de la antena de 1 GHz (3100 de GSSI) tienen, en casi todos los casos, tres picos, siendo el de mayor amplitud el que corresponde a una frecuencia central de 530 MHz. La anchura de la banda es de 600 MHz, situada entre los 130 MHz y los 730 MHz. En el caso de la antena de 900 MHz (3101 de GSSI), se observan dos picos de importancia. El primero corresponde con los 400 MHz y el segundo lo hace con la frecuencia de 600 MHz. La anchura de banda es de 800 MHz, situada entre los 200 MHz y los 1000 MHz. El espectro de la antena de 900 MHz se observa en la figura 17.24.

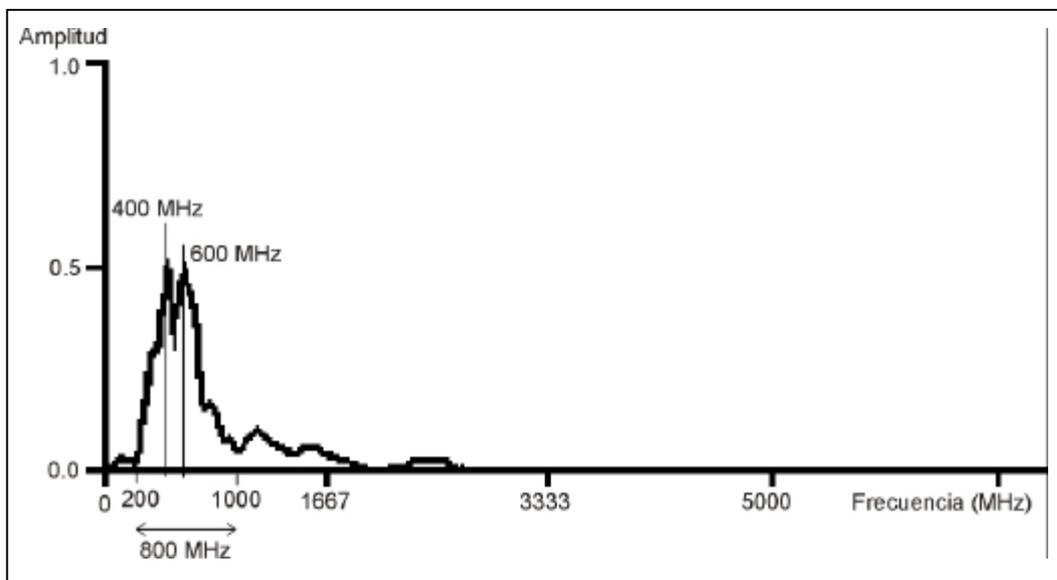


Figura 17.24. Espectro de frecuencia del registro de la figura 17.22.f (antena de 900 MHz), obtenido en el muro. La separación entre barras es de 10 cm. La traza utilizada es la que se corresponde con el centro de las barras.

La resolución calculada para este caso a partir de la primera zona de Fresnel es de 29 cm para el espesor de la pared considerada, valor mayor que la máxima separación de las barras en los registros de las figuras 17.21 y 17.22, lo que explica los efectos observados en dichas figuras.

17.6. Efectos del medio en la frecuencia de las señales.

Durante la propagación de las señales por el medio, se produce un filtrado que afecta, sobre todo, a las altas frecuencias. Este problema está fuertemente ligado a la resolución, tanto vertical como horizontal, de tal manera que es conveniente analizar los espectros de amplitud para estimar la resolución.

En los ensayos de resolución (apartado 17.5) se obtienen valores de la resolución que se corresponden mejor con los calculados a partir de las frecuencias observadas en los espectros que con los obtenidos si se utilizan las frecuencias que caracterizan a cada una de las antenas.

La frecuencia también afecta a la velocidad de propagación de la onda en el medio, al factor de pérdidas y a la penetración de la señal. Para poder calcular este segundo parámetro *a priori* hay que tener en cuenta que la anchura del espectro disminuirá al mismo tiempo que se produce el desplazamiento hacia las bajas frecuencias. Si se desea calcular la velocidad de propagación en un medio determinado partiendo de los parámetros medidos en el mismo (conductividad y permitividad efectivas), hay que tener en cuenta que la dependencia frecuencial es mayor en el caso de bajas frecuencias y conductividad elevada.

17.7. Discusión y conclusiones.

Se han comentado en este capítulo algunos de los problemas que surgen cuando se trabaja con un radar de subsuelo. Se trata de efectos que se producen durante la adquisición de datos pero que han de ser tenidos en cuenta para realizar una interpretación correcta de los registros posteriormente.

Dos de los efectos más comunes son los que aparecen cuando se producen reflexiones externas y cuando se originan las llamadas reflexiones múltiples. Las primeras son eventos producidos por la reflexión de la energía en elementos externos al medio. Pueden ser elementos laterales o bien elementos situados por

encima de la antena. Este efecto se produce cuando el apantallamiento de las antenas no es suficiente. Las reflexiones múltiples son anomalías registradas en el radargrama debidas a la reverberación que se produce cuando en el medio analizado se encuentra un elemento muy reflector. Algunos elementos muy reflectores situados fuera del medio analizado también pueden producir reflexiones múltiples. El problema de estos efectos es el ruido que se introduce en los registros a menudo difícil de eliminar sin eliminar también parte de la señal. En ocasiones la mejor manera de trabajar con un registro en el que se ha introducido ruido por reflexiones externas es tratar de identificar dicho evento sobre el radargrama dibujando gráficas que simulan la reflexión en el elemento externo (a menudo se trata de propagación por el aire) y comparándolas con el registro de campo. Cuando se trabaja con un registro en el que se ha producido la superposición de la señal con reflexiones múltiples puede intentarse una deconvolución.

Otro efecto que se puede presentar, sobre todo si se trabaja sobre una superficie de pequeñas dimensiones (como es el caso habitual de los ensayos de laboratorio), es el que podríamos denominar efecto del contorno. Este efecto se debe al cambio brusco lateral de medio, es decir, a una variación lateral importante de la velocidad promedio de propagación y a que la antena emite la energía en lóbulos. Esto quiere decir que, cuanto mayor sea la profundidad de estudio, más lejos hay que situar la antena del borde del medio, si no se desea que queden registrados en el radargrama los eventos asociados con éste.

Otro efecto de interés es el que se produce cuando tenemos elementos de pequeño tamaño próximos entre sí. La capacidad del radar de resolver los mencionados elementos como eventos separados depende de la resolución horizontal. Se trata, por lo tanto, de un problema asociado con la resolución del equipo, pero al mismo tiempo, también asociado con efectos de superposición de señales. Los registros, en estos casos, son difíciles de interpretar ya que en ocasiones el radar detecta los distintos elementos como un único objeto, donde el mínimo tiempo de propagación está situado entre los dos objetos. A consecuencia de que la energía que recibe la antena tras la reflexión proviene de la contribución de la primera zona de Fresnel, también puede observarse el máximo de energía en el punto correspondiente al centro de los elementos reflectores.

Para analizar los problemas de resolución también hay que tener en cuenta el filtrado del medio sobre la señal que se propaga por el mismo. A consecuencia de esta interacción entre el medio y la onda, se produce un desplazamiento del espectro hacia las bajas frecuencia, con una disminución de la anchura de la banda.

De este apartado se extraen las siguientes conclusiones:

- Dependiendo del equipo utilizado, es habitual que se registren reflexiones externas en los radargramas. Para identificarlas, se puede analizar gráficamente la reflexión producida en los elementos externos al medio, comparando de este modo la gráfica resultante con el registro de campo. Para ello, durante la adquisición de datos es necesario anotar cuidadosamente los elementos próximos a la antena que pueden producir estos efectos, así como la distancia de la antena a la que se encuentran en cada instante.
- Por las características de radiación de las antenas poco o no apantalladas, se pueden detectar como reflexiones externas tanto elementos situados justo por encima de la antena como elementos laterales a la antena que se encuentran en el exterior del medio que se está estudiando.
- Los efectos de contorno han de ser considerados en el caso de una variación lateral importante de la velocidad de propagación promedio. Puede tratarse de cambios dentro del medio analizado (por ejemplo, cambios bruscos en la saturación del medio), pero también puede tratarse del borde del medio analizado, por ejemplo, en el caso del estudio de un muro o de un escalón. También son efectos habituales en ensayos de laboratorio, en los que las muestras son de tamaño reducido. Para evitar que se produzcan, hay que analizar el diámetro de la huella de la antena en el reflector más profundo que interesa estudiar. Conocido este diámetro, se puede situar la antena a la distancia mínima del borde del medio para que no se produzcan efectos de contorno importantes.
- Para obtener el diámetro de la huella de la antena, se pueden utilizar distintos métodos propuestos por diferentes autores. En los ensayos

realizados en el laboratorio, el radio más adecuado es el obtenido a partir de considerar la primera zona de Fresnel.

- Cuando se estudian elementos de pequeño tamaño, inmersos en un medio y cercanos entre sí, es necesario efectuar un cuidadoso cálculo de la resolución del equipo, considerando al mismo tiempo el desplazamiento del espectro hacia las bajas frecuencia, producido durante la propagación de la señal por el medio. La antena puede no resolver los dos elementos por separado, de manera que se observan como un único reflector, con el tiempo mínimo de propagación situado en las trazas correspondientes al punto central entre los dos elementos. Utilizando las zonas de Fresnel se estima la mínima separación horizontal entre los dos elementos para que puedan ser identificados por separado.
- La longitud de la anomalía de máxima amplitud obtenida en el caso de dos barras inmersas en el medio, corresponde con la distancia de separación entre estos dos objetos.
- Cuando la separación de los dos elementos de pequeño tamaño es similar al diámetro de la huella de la antena, los registros producidos con esta geometría presentan tres eventos con un tiempo mínimo de propagación, de manera que el registro parece haberse generado a partir de tres elementos reflectores. Dada esta geometría, las hipérbolas que se originan forman parte de una misma anomalía y no quedan registradas como eventos separados. En general, se observa que la anomalía central (correspondiente a la posición entre elementos) presenta la máxima amplitud.
- Cuando los dos elementos de pequeño tamaño están situados justo tras un cambio de medio, es decir, justo por debajo de un reflector importante, se producen interferencias entre las señales reflejadas, de manera que, para algunas distancias, los mínimos de amplitud se sitúan en las zonas del registro que se corresponden con la posición real de los objetos reflectores. Si a este efecto se le une el que se produce en los tiempos dobles de propagación, es posible encontrar los mínimos de tiempo y de energía en

las zonas que se corresponden con la situación de los objetos. Esto puede llevar a una interpretación errónea de los registros.