

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE



MASTER EN INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE

TESINA

*Aplicación del georadar para la mejora del
rendimiento de una red hídrica*

Presentada por: Mario Tavera
Director: Rafael Pérez García

Valencia, mayo de 2008

INDICE

	Pag.	
CAP.1	Introducción.....	6
1.1	Las redes de abastecimiento de agua: situación en España.....	6
1.2	El rendimiento hidráulico de las redes de abastecimiento.....	7
1.3	Planificación de campañas para la mejora del rendimiento de una red.....	8
1.4	Objetivo de la investigación.....	11
CAP.2	Fundamentos Teóricos y modelación del fenómeno radar.....	13
2.1	Breve historia del georadar.....	13
2.2	Fundamentos teóricos.....	14
2.3	Longitud de onda en un medio diferente del vacío.....	17
2.4	Reflexión y refracción.....	17
2.5	Ecuación del radar.....	20
2.6	Modelación electromagnética por FDTD.....	21
2.6.1	Exigencias numéricas del modelo.....	23
2.6.2	Convolution Perfectly Matched Layer (CPML).....	24
CAP.3	Aplicaciones del georadar en hidráulica urbana.....	28
3.1	Características electromagnéticas del subsuelo.....	28
3.2	Técnica del georadar y adquisición de datos.....	31
3.3	Aplicaciones en hidráulica urbana: antecedentes.....	34
3.3.1	Localización de fugas de agua.....	34
3.3.2	El georadar para la detección de tuberías enterradas.....	36
3.3.3	Problemas durante la adquisición e interpretación.....	38
3.4	Ensayos para la evaluación de la eficacia del georadar en hidráulica urbana.....	40
3.4.1	Ensayos en laboratorio.....	40
3.4.2	Ensayos con arena.....	44
3.4.3	Ensayos con arcilla saturada.....	45
3.5	Radan 6.5: potencialidad del software para el postprocesamiento...	48
3.5.1	Aplicación de la deconvolución predictiva.....	48
3.5.2	Aplicación de la Transformada de Hilbert.....	52
3.5.3	Otros tipos de tratamientos.....	54

3.5.4	Visualización en 3-D del subsuelo.....	58
3.6	Aplicación a un caso de estudio.....	59
3.6.1	Introducción.....	59
3.6.2	1 ^{era} campaña de mediciones.....	61
3.6.3	Resultados parciales relativos a la 1 ^{era} campaña.....	66
3.6.4	2 ^{nda} campaña de mediciones.....	68
3.6.5	Conclusiones.....	80
CAP.4	Conclusiones y desarrollos futuros.....	81
4.1	Conclusiones.....	81
4.2	Desarrollos futuros.....	83
	Reseña bibliográfica... ..	84
	Anexo 1: Aplicación a un caso de estudio: tabla de los registros.....	87
	Anexo 2: Filtro inverso Q.....	89
	Anexo 3: Parámetros de configuración por defecto de las antenas utilizadas.....	104
	Anexo 4: Especificaciones de la Unidad Central SIR-3000.....	105

CAPITULO 1: Introducción

1.1 Las redes de abastecimiento de agua: la situación en España

El abastecimiento de agua potable es una más de las actividades fundamentales dentro de los distintos tipos de servicios públicos que aportan calidad de vida a los ciudadanos. Presenta unas características peculiares frente a otros servicios y su funcionamiento puede ser analizado desde orientaciones muy diversas: como recurso, la cantidad de agua disponible para el consumo está limitada y, en ocasiones, su distribución es irregular en el tiempo y en el espacio. Como producto de consumo, son de especial interés los aspectos sanitarios relacionados con la calidad de agua y su mantenimiento mientras permanece en el sistema de conducciones. Como bien de dominio público, está afectado de una cobertura legal y unas garantías tuteladas por distintas administraciones a un mayor nivel que otros bienes. El sistema de abastecimiento se encarga de distribuir el agua desde los puntos de inyección, hacia los puntos de consumo. Por ello, adolece necesariamente de una gran dispersión espacial, que complica el trabajo para un adecuado mantenimiento de la red. En muchos sistemas de distribución, una cantidad significativa de agua se pierde a lo largo de los varios elementos de la red por fugas o consumos no autorizados (acometidas ilegales) (R. Pérez, 2005).

Según un estudio de diciembre 2005 se ha calculado que por fugas y fraudes con el agua se roban a los municipios españoles 1100 millones de euros anuales con más de 900.000 millones de litros que se pierden cada año por las mismas razones (fuente *La Expansión*).

Las fugas y el consumo ilegal o no controlado de agua en las redes de abastecimiento representan un desgaste de un recurso natural que es un bien escaso, y una pérdida económica relevante. La pérdida principal de tipo económico viene de los costes del tratamiento y transporte. Las fugas dan como resultado también perjuicios económicos secundarios representados en forma de daños en la misma red, y en otras estructuras. Las pérdidas de fluido pueden incluso causar problemas de contaminación, visto que cada fuga puede representar un posible punto de entrada para contaminantes si la presión en el sistema bajase demasiado [Eyuboglu et al., 2004] (fenómeno conocido como intrusión patógena).

Las pérdidas de agua potable ya tratada que se producen en las redes de abastecimiento de las principales ciudades españolas rondan entre el 25 y el 30%, frente a un valor alrededor del 10% en Alemania y de un 5% en Suiza, por ejemplo. Ante la ausencia de un estudio pormenorizado sobre el rendimiento de las redes de abastecimiento en España, el dato anterior está basado en análisis detallados sobre abastecimiento en distintas ciudades, con un número determinado de habitantes, y de un cálculo estimativo posterior que se extrapola a toda la población española. No obstante, tenemos constancia de que hay poblaciones en España en las que se pierde hasta un 80% del agua que circula por sus tuberías.

1.2 El rendimiento hidráulico de las redes de abastecimiento.

El rendimiento hidráulico se puede expresar de maneras diferentes según el punto de vista requerido. Una definición muy utilizada, la más intuitiva, lo define como el porcentaje de agua facturada en baja (pérdidas de la red de distribución, mermas en tratamientos y explotación de redes, consumos sin facturación o consumos fraudulentos) respecto al total del agua bruta captada. Es la cara opuesta (complementario a uno) de las pérdidas totales, que en sentido amplio incluyen diversos conceptos: como pérdidas en alta (por transporte y potabilización) y en baja.

Antes de determinar el rendimiento real de una red de abastecimiento es fundamental conocer con la mayor precisión posible la distribución de caudales en el sistema, ya que muchas veces se asocian pérdidas con agua no registrada, y además, cuando se cita el rendimiento no se especifica de qué rendimiento se trata: medido, facturado o el útil (*D. Manuel García Ferrando Director Técnico de EMIVASA, SEREA 2005, Valencia*).

<p>Q (Caudal entrante al sistema)</p> <p>Q = Q_m + Q_u = Q_m + Q_{uc} + Q_{ul}</p>	<p>Q_m (Caudal medido por contador de abonado)</p>		<p>Consumo doméstico</p> <p>Consumo comercial</p> <p>Consumo industrial</p> <p>Consumo oficial (municipal)</p>	
	<p>Q_u (Caudal incontrolado)</p> <p>Q_u = Q_{uc} + Q_{ul}</p>	<p>Q_{uc} (Caudal consumido no medido) (Pérdidas aparentes)</p>		<p>Limpieza de depósitos</p> <p>Purgas de red</p> <p>Puesta en servicio nuevas tuberías</p> <p>Hidrantes contra incendio</p> <p>Estimaciones (no existe contador)</p> <p>Q_{uce} = Subcontajes</p> <p>Contadores parados</p> <p>Fraudes y tomas ilegales</p>
		<p>Q_{ul} (Pérdidas reales)</p>		<p>Fugas en tuberías y acometidas</p> <p>Fugas provocadas</p>

Tabla 1. Distribuciones de caudales en redes de abastecimiento.

Otra clasificación que se puede extrapolar de la tabla anterior en relación a la cantidad de caudal perdido, y que resulta ser también muy intuitiva, es la que considera las fugas aparentes y fugas reales. Las primeras están referidas a la cantidad de caudal de agua que no ha sido contabilizada debido a fallos en los contadores, o porque no se contabiliza deliberadamente (consumo no facturado autorizado) o de manera fraudulenta (acometidas ilegales). Las fugas reales representan el agua que se pierde efectivamente por roturas a lo largo de la red.

1.3 Planificación de campañas para la mejora del rendimiento de una red.

Para alcanzar una mejora en el rendimiento de una red de abastecimiento se tiene que tener en cuenta la complejidad del tema y hay que abordar el problema desde varios puntos de vista. A nivel de planificación espacial y temporal, es útil apoyarse a sistemas de información geográfica que nos pueden ayudar a considerar el problema en sus proporciones adecuadas, permitiéndonos así la capacidad de decidir con que prioridad actuar y donde. Estos se basan normalmente en datos históricos (presiones, caudales, número de incidencias de fugas etc...) que a su vez se manejan e interpretan con herramientas estadísticas y también de inteligencia artificial (*minería de datos*), siempre que la cantidad y la calidad de los datos lo permita. Desde el punto de vista económico, se sabe que a un precio de venta del agua le corresponde un volumen óptimo de fugas (Cabrera et al. 1999). Y ello es así por cuanto alcanzado un determinado nivel de eficacia, llevar a cabo una mejora supone una inversión económica superior al nivel de ingresos que el gestor deja de percibir por el agua perdida. Establecido este nivel óptimo mediante técnicas adecuadas, habrá que evaluar el estado mismo del sistema mediante las auditorías (*water audits*), que se suelen acompañar con un trabajo previo de sectorización de la red (partición de la red en distritos hidrométricos independientes mediante el uso de válvulas de cierre), lo cual permite a su vez manejar la red en una manera más cómoda y fácil de controlar. Después que se hayan encontrado los distritos o sectores con rendimientos bajos el paso siguiente implica un nivel de detalle más alto, la mayoría de las veces mediante trabajos de campo y/o basado en mediciones de valores característicos de la hidráulica (caudales y presiones).

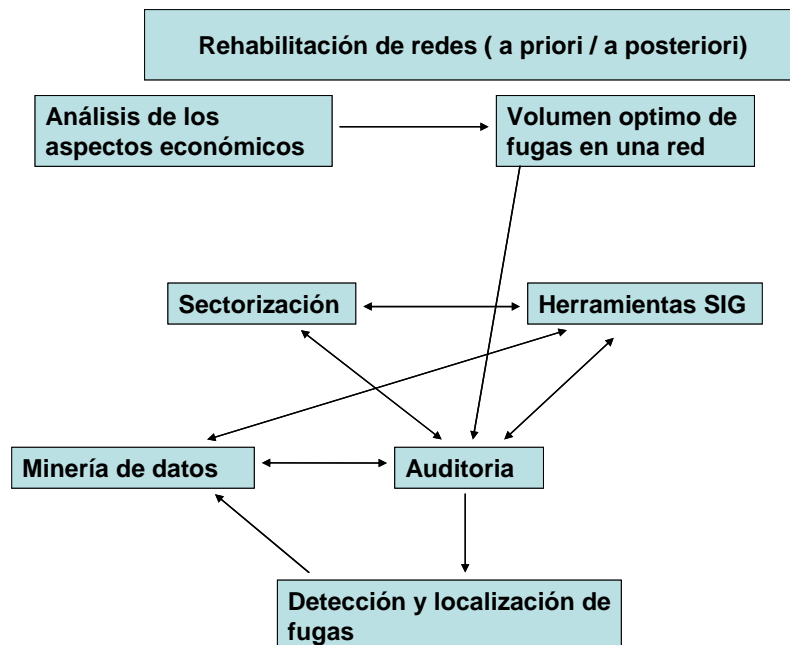


Figura 1. Ejemplo de un posible esquema de todas las componentes, y como ellas puedan estar relacionadas, de un programa de rehabilitación de redes hidráulicas.

Para alcanzar este objetivo es mejor contemplar el uso combinado de varias técnicas que deben

de ser utilizadas según las necesidades y según las informaciones obtenidas en los pasos anteriores explicados. Con respecto a la localización de fugas, las técnicas convencionales están basadas o en el análisis de mediciones de caudales y presiones en los nudos, o en técnicas acústicas que analizan el ruido provocado por las fugas a lo largo de la red según su intensidad o su frecuencia en el tiempo. El *método del consumo cero* se basa por ejemplo en mediciones de caudales nocturnos, cuando los consumos sean mínimos y un valor anómalo y sospechoso de los mismos nos puede indicar las presencias de una fuga. Los equipos acústicos por otra parte pueden funcionar a varios niveles. Como prelocalizadores miden la intensidad del ruido mediante sensores oportunamente distribuidos en sectores no muy grandes de la red (del orden de unos km²). Los sensores más utilizados son los hidrófonos y los acelerómetros: los primeros se inmergen en el agua y miden el ruido de la fuga por las ondas de presiones que viajan en el flujo mismo; los segundos miden las vibraciones mecánicas que se propagan a lo largo de las paredes de las tuberías, y se colocan en elementos singulares (metálicos) de la red como hidrantes y válvulas. Hasta ahora los elementos acústicos son los aparatos más utilizados también en la localización puntual. Empezando con las herramientas más rudimentales como la varilla de escucha, pasando por el muy conocido geófono, y hasta llegar al correlador, el cual utiliza la función de correlación del ruido provocado por la fuga y medido por dos sensores (acelerómetro o hidrófono) puestos a los dos extremos del punto sospechado. Debido a la mala transmisión del ruido por las paredes de las tuberías de plástico, el material que hoy en día se está utilizando más en lugar de los metales, han surgido otros métodos basados en técnicas innovadoras y en algunos casos exóticos (como el método Sahara por ejemplo) que prescinden del tipo de material utilizado en cada caso. Es esto el caso de la termografía infrarroja, de los gases trazadores y del georadar. La termografía infrarroja detecta las diferencias de temperatura en el suelo debidas al nivel de humedad, que es capaz de detectar, para localizar el punto de fuga. Los gases trazadores, helio o hidrogeno, necesitan que se vacíe la red para ser inyectados en un segundo momento y venir detectados en el suelo mediante visualización directa o mediante sensores. Estos se utilizan principalmente en nuevas instalaciones en el caso de que las mismas no hayan superado las pruebas de estanqueidad o de presión. Finalmente el georadar se basa en la emisión de impulsos electromagnéticos con la posterior recepción de las reflexiones producidas en las discontinuidades detectadas en el subsuelo (las fugas o las tuberías mismas según el caso).

Con respecto a la detección y localización de acometidas ilegales el georadar puede ser incluso más eficaz que en el caso de localización de fugas, ya que se han presentado a este propósito varios trabajos de investigación, empezando con la muy conocida tesis doctoral de Peter Ulriksen de la Universidad de Lund (Suecia), titulada “*Application of Impulse Radar to Civil*

Engineering”. Además tenemos constancia de varias empresas en Europa y sobre todo en Ibero-America que utilizan este aparato de manera sistemática para campañas de este tipo. Por ejemplo, entre los años 2004-2006 el Canal de Isabel II, el ente gestor del abastecimiento de la Comunidad de Madrid, ha puesto en marcha un Plan de Seguridad para detectar posibles enganches fraudulentos a la red de distribución que transporta el agua por toda la Comunidad. Según un artículo publicado en el periódico *El Mundo* en el agosto 2006, la Dirección de Seguridad del Canal de Isabel II detectó en esa época, mediante también la técnica del georadar, 200 tomas ilegales de agua y en la mayoría de ellas se ha procedido al corte del suministro. Todas ellas podían llegar a consumir hasta 160.000 litros diarios de agua, cantidad equivalente al consumo de una población de 1.000 habitantes en un día. Meses antes, la empresa también dio a conocer algunos robos de agua que se estaban realizando en la región. Entre las personas que extraían el agua de manera ilegal había un empresario que vendía posteriormente el líquido. En la ciudad de Celaya en México, dentro del “*Programa de Recuperación de Agua 2005*”, la *Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Celaya* realizó la revisión general del catastro hidráulico en los 14 Distritos Hidrométricos (DH’s) y realizó el barrido de detección de pérdidas en zonas en donde las eficiencias físicas eran menores al 80%. Después haber realizado una revisión de las lecturas tomadas en cada DH para determinar posibles anomalías, se realizó una revisión en campo del catastro comercial, para identificar usuarios no autorizados y se generó un listado con todas las anomalías encontradas. La actualización del catastro, mediante la localización de las acometidas no visibles o ilegales, se llevó a cabo de manera sistemática precisamente con georadares.

1.4 Objetivo de la investigación

Como hemos visto, a la hora de mejorar el rendimiento de una red de abastecimiento tienen una importancia fundamental la detección y localización de las pérdidas de agua (pérdidas reales), pero también la localización de las acometidas ilegales o más generalmente de todas las componentes del sistema hídrico de las que no queda constancia en los mapas catastrales.

Son varias las incidencias y las componentes a tener en cuenta en una tarea de este tipo. Antes de todo es importante que los técnicos encargados tengan conocimientos previos sin los cuales es fácil tener una visión parcial e incorrecta del sistema. Otro factor importante es la experiencia de quien se encarga de las mediciones. Es una tendencia siempre más generalizada utilizar en estos casos métodos no destructivos (como por ejemplo el georadar).

Se denomina “ensayo no destructivo” a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o nulo. Se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique un daño considerable a la muestra examinada [fuente *Wikipedia*].

El objetivo del presente trabajo es analizar y evaluar la efectividad y eficacia del georadar como herramienta útil para mejorar el rendimiento de una red de abastecimiento urbana, por medio de: localización de fugas de agua; detección de acometidas ilegales o tuberías no registradas en los mapas catastrales, y todas esas circunstancias en las que el instrumental nos pueda ser útil para un mejor conocimiento del sistema en general.

La técnica se basa en la emisión de pulsos electromagnéticos con la posterior recepción de las reflexiones producidas en las discontinuidades detectadas en el subsuelo. Como ya hemos dicho, en nuestro caso el georadar es de utilidad dentro de un programa general de rehabilitación de un cualquier sistema hídrico, al nivel de los *caudales incontrolados* y más concretamente en la detección de las acometidas ilegales (*pérdidas aparentes*) y, sobre todo, de las fugas de tuberías en la red (*pérdidas reales*). Estos dos últimos sucesos dan lugar a una discontinuidad en los parámetros electromagnéticos del subsuelo, esto es, un cambio brusco que los pulsos a alta frecuencia emitidos por el aparato encuentran en su camino. Es una técnica que en los últimos años se ha aprovechado de los espectaculares avances tecnológicos, sobre todo en el campo de la informática, para alcanzar un nivel de resolución y cantidad de información impresionante. No obstante, y es otro de los objetivos de dicho trabajo, se necesitan estudios más profundos con respecto a la interpretación de la imagen (*image processing*), y del tratamiento y análisis de las señales electromagnéticas, mediante el uso de técnicas estadísticas o de inteligencia artificial

(redes neuronales por ejemplo).

Después haber hecho una breve y significativa historia de su desarrollo y haber explicado la teoría donde se fundamenta y la técnica de utilización, pasaremos a describir detalladamente sus aplicaciones en hidráulica urbana. Hablaremos de los antecedentes en literatura y de su utilización como método de localización de fugas y de tuberías enterradas. Dentro de la investigación se ha pensado oportuno realizar ensayos que nos han permitido evaluar la capacidad de esta potente herramienta para mejorar el rendimiento de una red de abastecimiento, tratando de establecer cuales son las condiciones mejores en las que puede trabajar a una alta eficiencia.

CAPITULO 2: Fundamentos teóricos y modelación del fenómeno radar

2.1 Breve historia del georadar

La técnica del georadar es, simplificando mucho, 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 (ordenador) 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.

Las aplicaciones del georadar de subsuelo como técnica ecológica, no destructiva y de alta resolución están ampliamente documentadas, también por la gran versatilidad que lo caracteriza. Los campos de utilización incluyen exploraciones de flujos de agua subterráneos (Davis&Annan, 1989); investigaciones arqueológicas (Imai et al.; Bevan 1991, Vega Pérez Gracia 2001); monitorización para la recuperación de aceite en procesos industriales (Witterholt and Kretschmar, 1984); aplicaciones de ingeniería civil (Lau et al., 1982); en la detección de tuberías enterradas y de fugas de agua (Eyuboglu et al., 2004; Tavera y Pérez, 2007); para la localización de minas en zonas de guerra etc.

La teoría que constituye el funcionamiento del georadar se desarrolla ya en la segunda mitad del siglo XIX. La falta de los soportes tecnológicos adecuados ha impedido durante mucho tiempo su desarrollo. Después de que Maxwell y Hertz (1864-1886) enunciaran las leyes físicas que rigen la propagación de las ondas electromagnéticas en los medios, se tuvo que esperar hasta los años 30 del siglo XX, cuando Sir Watson y Watt construyeron el primer sistema radar que fue utilizado en la Segunda Guerra Mundial para fines militares. Después de la guerra se hicieron experimentos aislados que utilizaban el radar como método de prospección del suelo. Luego, durante varios años, el georadar fue olvidado hasta llegar a los años '50. En esa época un avión estadounidense se estrelló en Groenlandia al no haber podido detectar una capa de hielo en el suelo. El particular acontecimiento hizo que algunos investigadores se interesaron al uso del radar como metodología de prospección del subsuelo empezando justo por el hielo polar. En la década siguiente se utilizó también con otros materiales (J.C. Cook), y en el 1976 *Moffat & Puskar* construyeron un interesante radar creado específicamente para la detección de las reflexiones en el subsuelo. En la última década del siglo XX con el rápido desarrollo de los ordenadores se entró en la época más fecunda de los avances del aparato radar.

2.2 Fundamentos teóricos

Las cuatro ecuaciones de Maxwell comentadas antes nos dan las bases teóricas para describir el fenómeno y son las siguientes:

$$\begin{aligned}\nabla \vec{D} &= \rho_f \\ \nabla \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{M} \\ \nabla \times \vec{H} &= -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}\end{aligned}\tag{1}$$

Donde E y H representan respectivamente el campo eléctrico y magnético; D y B el vector desplazamiento eléctrico y vector inducción magnética; ρ la densidad de carga libre y J la densidad de corriente.

Las ecuaciones de Maxwell junto con las ecuaciones constitutivas (2) nos permiten entender las interacciones entre las ondas electromagnéticas y los medios en los cuales se propagan.

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \epsilon \vec{E} \\ \vec{H} &= \frac{\vec{B}}{\mu} \\ \vec{J} &= \sigma \vec{E}\end{aligned}\tag{2}$$

Donde ϵ , μ , y σ constituyen los tres parámetros que caracterizan un medio determinado electromagnéticamente. La conductividad σ representa la medida de la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica. La permitividad dieléctrica ϵ nos da la medida de la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico. Finalmente la medida de la capacidad de un medio para atraer los campos magnéticos viene descrita por la permeabilidad magnética μ . Este último parámetro, en la gran mayoría de suelos o materiales que se encuentran cotidianamente, suele ser igual a 1, y por lo tanto, como veremos más adelante, se puede hacer una importante simplificación en la estimación de la velocidad de la onda. Además, para las altas frecuencias (50-1600 MHz, las frecuencias correspondientes al georadar) y por la mayor parte de los materiales del subsuelo los fenómenos de polarización dominan sobre los fenómenos de conductividad, y por eso muchos autores coinciden en que los medios se pueden caracterizar electromagnéticamente solamente por la constante dieléctrica, ϵ . El valor de la constante absoluta es igual al producto del valor de la misma en el vacío por el valor relativo que varía entre el valor 1 del aire y el valor 81 del agua a 20° C.

Las ondas electromagnéticas viajan en un medio a una velocidad que depende de la constante dieléctrica relativa del subsuelo, de la velocidad de la luz en el vacío, y de la permeabilidad magnética relativa. La velocidad de la onda electromagnética (V_m) en un material viene dado por:

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{(\epsilon_r \mu_r / 2)((1 + P^2) + 1)}} \quad (3)$$

donde $P = \sigma / \omega \epsilon$ es el factor de pérdida, y σ es la conductividad, $\omega = 2\pi f$ (f es la frecuencia), y ϵ la constante dieléctrica absoluta. En materiales con un bajo factor de pérdida tenemos $P \rightarrow 0$. Además, como se ha explicado antes, los terrenos y suelos con características magnéticas son muy poco comunes, de modo que podemos suponer $\mu_r = 1$, y en ese caso la velocidad de la onda electromagnética viene dada por:

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{0.3}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ m/ns} \quad (4)$$

La profundidad de penetración (D) puede ser determinada por (5), calculando antes la velocidad en el medio V_m utilizando la ecuación anterior. Finalmente, el tiempo doble de propagación puede ser determinado mediante la representación gráfica de las señales del georadar. Con estas premisas la profundidad resulta entonces ser:

$$D = \frac{T \cdot V_m}{2} \quad (5)$$

El éxito del método del radar de subsuelo es debido principalmente a la capacidad de los materiales de permitir las transmisiones de las ondas radar. Algunos materiales, como el hielo polar, son prácticamente transparentes a estas ondas. Otros materiales, como la arcilla saturada y el agua del mar, absorben o reflejan las ondas de manera que aparecen prácticamente opacas en los radargramas obtenidos. El contraste de las constantes dieléctricas relativas entre capas adyacentes es una función de la radiación electromagnética. Cuanto más grande es el contraste, más grande la cantidad de energía reflejada (*Eyuboglu, Mahdi 2004*).

Otra manera de expresar las ecuaciones de Maxwell es la siguiente:

$$\begin{aligned}\nabla^2 \bar{E} &= \gamma^2 \bar{E} \\ \nabla^2 \bar{H} &= \gamma^2 \bar{H}\end{aligned}\tag{6}$$

Donde E y H son los fasores (números complejos) vectoriales de los campos eléctricos y magnéticos expresables en la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\bar{E} &= E_0 e^{j\omega t} \\ \bar{H} &= H_0 e^{j\omega t}\end{aligned}\tag{7}$$

Donde E_0 y H_0 son las amplitudes de los campos, $j = \sqrt{-1}$, $\omega = 2\pi f$ es la pulsación (medida en rad/seg) y f es la frecuencia de la onda electromagnética (Hz). En la (6) la cantidad compleja γ es definida número de onda complejo (o constante compleja de propagación) y se puede expresar como:

$$\gamma = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)\tag{8}$$

Los dos principales fenómenos que relacionan la propagación de las ondas electromagnéticas y los movimientos de las cargas eléctricas en los medios, como ya hemos visto, son la conducción y la propagación. Aplicando desde el exterior un campo eléctrico a un material conductor se obtiene conducción, o sea los electrones empiezan a migrar en el sentido opuesto a la dirección del campo eléctrico inducido. Por otro lado aplicando un campo eléctrico a un material dieléctrico se obtiene polarización, o sea, se observa una orientación de las moléculas dipolares del material bajo la acción del campo aplicado desde el externo de manera tal de generar un campo que sea opuesto a eso. En el caso de que el material no esté constituido por moléculas dipolares se tiene una deformación de las moléculas causada por la separación de las cargas positivas y negativas bajo el efecto del campo eléctrico mismo.

Combinando de manera oportuna las ecuaciones anteriores se obtiene la siguiente expresión:

$$\nabla^2 \bar{E} = j\omega\mu\sigma\bar{E} - \omega^2\mu\varepsilon\bar{E}\tag{9}$$

Donde el primero termino tiene en cuenta de los fenómenos de conducción, mientras el segundo los de polarización. Hay que evidenciar que por las frecuencias utilizadas por el georadar, ambos términos resultan ser a veces significativos.

Continuando en el análisis de la difusión de la onda electromagnética, consideramos su parte progresiva, que puede ser escrita en la forma:

$$\bar{E}(z,t) = E_0 e^{-\alpha z} e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (10)$$

La misma indica que la onda se propaga a lo largo del eje z en un sistema de ejes cartesianos, α representa el *coeficiente de atenuación* y β es el *coeficiente de fase*, respectivamente iguales a:

$$\alpha = \omega \frac{\mu \varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 \omega^2}} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad [m^{-1}] \quad (11)$$

$$\beta = \omega \frac{\mu \varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 \omega^2}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad [m^{-1}] \quad (12)$$

En este punto podemos concluir que el número de onda complejo puede ser expresado, en función de los dos coeficientes arriba indicados, en la manera:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (13)$$

2.3 Longitud de onda en un medio diferente del vacío.

La longitud de onda en un medio dado, λ_m , dependerá de la velocidad de fase (e indirectamente de la constante dieléctrica efectiva del mismo) y de la frecuencia de la onda emitida. Como en la expresión aparecerán parámetros de la propagación en el vacío, podremos relacionarla con la longitud de la onda en el vacío:

$$\lambda_m = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega} v = \frac{2\pi}{\omega} \frac{c}{\text{Re} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} = \frac{\lambda_0}{\text{Re} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \quad (14)$$

Donde λ_0 es la longitud de la onda en el vacío.

En medios no magnéticos ($\mu_r=1$), la expresión se simplifica, quedando:

$$\lambda_m = \frac{\lambda}{\text{Re} \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (15)$$

La longitud de la onda determina la resolución vertical del georadar y dependerá de la frecuencia de emisión de la antena y de la constante dieléctrica efectiva del material.

2.4 Reflexión y refracción.

Un modelo muy sencillo del subsuelo, con respecto al georadar, está constituido por una serie

de capas estratificadas. El comportamiento electromagnético de cada capa viene descrito por su permitividad dieléctrica, permeabilidad magnética y conductividad dieléctrica. Cada capa del subsuelo se comporta como un filtro sobre la señal electromagnética, que al propagarse se atenúa y se dispersa.

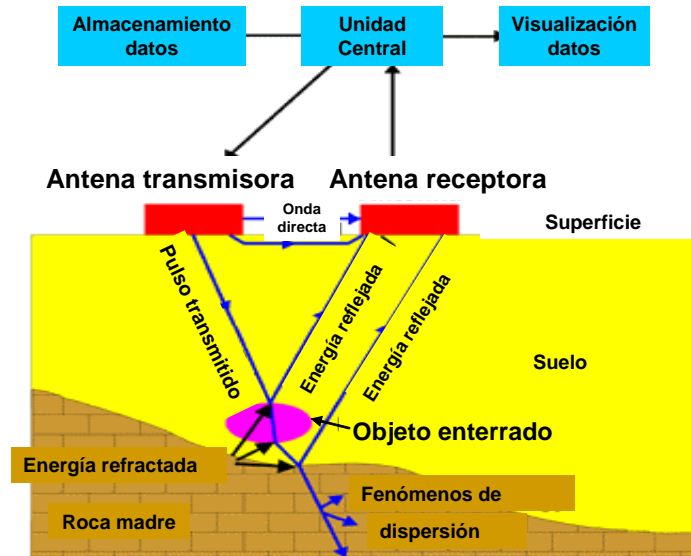


Figura 2. Técnica de funcionamiento del georadar

En los límites de las varias capas la señal del georadar se refleja parcialmente y se transmite parcialmente. Además, al tener la onda una incidencia no perpendicular parte de la señal se refracta.

La ley de Snell relaciona los ángulos de incidencia, reflexión y refracción con las velocidades de propagación de las ondas en los dos medios que están en contacto.

El porcentaje de energía reflejada depende del contraste existente entre los parámetros electromagnéticos de los diferentes materiales del medio. Este porcentaje nos define los coeficientes de transmisión y de reflexión de la energía.

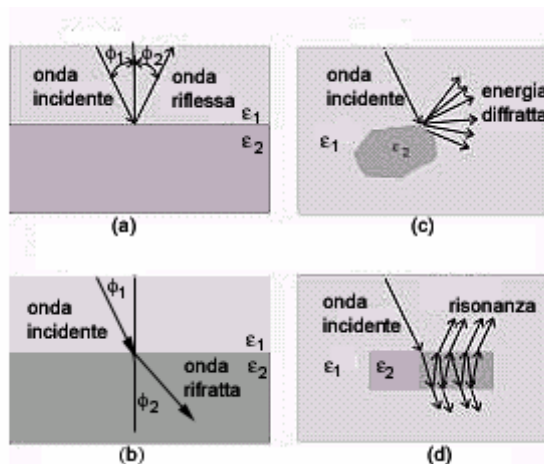


Figura 3. Fenómenos relacionados a la óptica geométrica. La ley de Snell

La impedancia de un campo electromagnético es el cociente entre el campo eléctrico y el campo magnético, pudiendo definir una impedancia para el campo electromagnético incidente, η_1 , que coincidirá con la del campo magnético reflejado, y otra para el campo electromagnético refractado, η_2 , es decir, transmitido:

$$\eta_1 = \left\{ \frac{\vec{E}_i}{\vec{H}_i} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \right\} = \left\{ \frac{\vec{E}_r}{\vec{H}_r} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \right\}$$

$$\eta_2 = \left\{ \frac{\vec{E}_t}{\vec{H}_t} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{r2}}{\epsilon_0 \epsilon_{r2}}} \right\} \quad (16)$$

A partir de las expresiones de las impedancias se pueden calcular los coeficientes de transmisión y de reflexión de Fresnel de la energía, como el cociente entre el campo incidente y el campo refractado en el primer caso, y el cociente entre el campo incidente y el campo reflejado en el segundo caso. Si a_i es el ángulo de incidencia de la onda sobre la superficie plana, y a_t es el ángulo de refracción, estos coeficientes adoptan la siguiente expresión:

$$R_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_r}{\vec{E}_i} = \frac{\eta_2 \cos(a_t) - \eta_1 \cos(a_i)}{\eta_1 \cos(a_i) + \eta_2 \cos(a_t)}$$

$$T_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_t}{\vec{E}_i} = \frac{2\eta_2 \cos(a_i)}{\eta_1 \cos(a_i) + \eta_2 \cos(a_t)} \quad (17)$$

Donde $T_{1 \rightarrow 2}$ es el coeficiente de Fresnel de refracción entre los medios superior (1) e inferior (2), $R_{1 \rightarrow 2}$ es el coeficiente de Fresnel de reflexión en el contacto entre los dos medios, E_i es el campo incidente, E_r el campo reflejado y E_t el campo refractado o transmitido.

En los estudios que se realizan con georadar, pueden simplificarse estas expresiones ya que el sistema opera con reflexión de un ángulo muy pequeño, pudiendo ser considerados los ángulos de incidencia y de reflexión (en el caso de que la superficie reflectora sea plana) como de cero grados, es decir, que se trabaja con incidencia normal. En estas condiciones, los coeficientes de reflexión y de transmisión únicamente dependen de la relación entre impedancias complejas. Si además se trabaja en medio no magnéticos, una aproximación adecuada para la mayoría de los materiales en los cuales se aplican estos estudios con georadar, la expresión de los coeficientes queda como:

$$R = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}$$

$$T = \frac{2\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}$$
(18)

Se puede observar que la suma del coeficiente de reflexión (que representa el porcentaje de energía reflejada de la energía incidente) y del coeficiente de refracción (que representa el porcentaje de energía transmitida al segundo medio, de la energía incidente), es la unidad. De las expresiones anteriores, se puede deducir que cuanto mayor sea la diferencia entre los parámetros electromagnéticos de los medios, mayor será el coeficiente de reflexión, es decir, que a mayor contraste entre los dos medio en contacto, mayor porcentaje de la energía incidente será reflejada en la discontinuidad, y por lo tanto, tendremos un menor porcentaje de energía transmitida al medio inferior. Valores de R elevados implican en un estudio con georadar, por una parte, la posibilidad de observar en los registros con más facilidad la onda reflejada, mientras que por otro lado la penetración del método disminuye y las reflexiones producidas en contrastes posteriores son de menor amplitud, ya que el porcentaje de energía refractada es menor, lo que contribuye a que la amplitud de la onda en posteriores reflexiones sea menor.

2.5 Ecuación del radar.

La ecuación del georadar conocida en la literatura relaciona entre ellos los parámetros fundamentales del aparato permitiéndonos de evaluar sus prestaciones. La forma general de la ecuación, valida para un radar biestático (donde la antena transmisora y la antena receptora son distintas) es:

$$P_r = \frac{P_t G_t \sigma}{(4\pi R^2)^2} \cdot \frac{A_e}{L}$$
(19)

Donde P_r es la potencia recibida, P_t la potencia de la señal transmitida, G_t es la ganancia de la antena de transmisión, σ es la *radar cross section* de la anomalía detectada, que depende de su geometría (su evaluación no es muy sencilla al ser posible de manera analítica solamente para geometrías muy sencillas). Se tiene también:

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r$$
(20)

Donde A_e es el área efectiva de la antena receptora, R es la distancia a la cual se encuentra la anomalía, y L cuantifica las pérdidas por propagación.

Como se ha dicho anteriormente, esta ecuación permite evaluar las prestaciones de un sistema radar, una vez que se conozcan los parámetros conocidos del sistema, o sea la capacidad de alcance del radar que se define como la distancia máxima (R_{max}) a la cual es posible detectar reflexiones de las anomalías.

Para realizar esto es necesario conocer la potencia del ruido N de la antena recibiente y fijar la relación señal/ruido mínimo SNR_{min} de manera tal de garantizar las prestaciones deseadas.

$$SNR_{min} = \frac{P_r}{N} \quad (21)$$

Considerando ambas las ecuaciones se obtiene el valor de la distancia máxima según la expresión:

$$R_{max} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sqrt[4]{\frac{P_t G_t \sigma A_e}{N \cdot SNR_{min}}} \quad (22)$$

La aplicación de la ecuación (19) a los sistemas GPR no es muy sencilla, además del hecho que más importante que la relación señal/ruido, es necesario tener en cuenta de la relación señal/*clutter* (SCR). Como en los sistemas de georadar tradicionales el *clutter* está relacionado a las reflexiones debidas a los objetos no deseados, que hacen claramente complicado la interpretación de los datos obtenidos.

2.6 Modelación electromagnética por FDTD

El método a las diferencias finitas en el dominio del tiempo es una técnica utilizada para resolver numéricamente ecuaciones diferenciales y permite un análisis sencillo de convergencia. La idea fundamental en la que se basa consiste en el sustituir los diferenciales de las variables por los correspondientes valores incrementales. Por ejemplo, se aproxima:

$$u'(x) \approx \frac{u(x+h) - u(x)}{h} \quad (23)$$

donde h es el parámetro de discretización de la variable independiente.

Vamos a ver ahora como aplicar este método en el ámbito del electromagnetismo: sabemos que a partir de las ecuaciones des Maxwell (en el dominio del tiempo) en el vacío podemos también

escribir:

$$\frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0} \nabla \times \bar{H}, \quad \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \bar{E} \quad (24)$$

Cada una de estas ecuaciones tiene componentes en las tres dimensiones, por lo cual en general representan 6 ecuaciones escalares. Tomamos el caso más sencillo, el monodimensional, cuyos vectores de campo se consideran dependientes por una sola coordenada espacial, obteniendo así (por ejemplo para las componentes E_x y H_y):

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = -\frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial H_y}{\partial z}, \quad \frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (25)$$

Estas son las ecuaciones de una onda plana que se propaga a lo largo del eje z , con el campo eléctrico polarizado a lo largo del eje x y el magnético a lo largo del eje y .

Utilizando las aproximaciones de diferencias “centrales” bien para las derivadas espaciales bien para las temporales, obtenemos:

$$\frac{E_x^{n+1/2}(k) - E_x^{n-1/2}(k)}{\Delta t} = -\frac{1}{\epsilon_0} \frac{H_y^n(k+1/2) - H_y^n(k-1/2)}{\Delta x} \quad (26)$$

$$\frac{H_y^{n+1}(k+1/2) - H_y^n(k+1/2)}{\Delta t} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{E_x^{n+1/2}(k+1) - E_x^{n+1/2}(k)}{\Delta x}$$

En estas ecuaciones el instante temporal (discreto) viene caracterizado por los índices arriba (podemos calcular el tiempo absoluto mediante la fórmula $t = \Delta t \times n$). Los términos entre paréntesis representan la distancia, por la cual $z = \Delta x \times k$. Las ecuaciones precedentes pueden ser escritas de forma iterativa:

$$E_x^{n+1/2}(k) = E_x^{n-1/2}(k) - \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \cdot \Delta x} [H_y^n(k+1/2) - H_y^n(k-1/2)]$$

$$H_y^{n+1}(k+1/2) = H_y^n(k+1/2) - \frac{\Delta t}{\mu_0 \cdot \Delta x} [E_x^{n+1/2}(k+1) - E_x^{n+1/2}(k)] \quad (27)$$

Resumiendo, el método de las diferencias finitas o FDTD (*Finite Difference Time Domain*) aplicado a las ecuaciones de Maxwell permite la modelación gracias a una formulación exacta de los fenómenos de propagación y de interacción de las ondas electromagnéticas en el seno de un medio cualquiera. Las ecuaciones de Maxwell son resueltas en el dominio temporal según una aproximación de los campos continuos eléctricos y magnéticos por campos discretizados

dentro de un volumen discretizado del espacio, y durante un tiempo determinado, también discretizado. Las derivadas espaciales y temporales de los campos se calculan por diferencias de los campos discretizados según un esquema de orden 2 en espacio y en el tiempo. Los campos son determinados así en cada muestra temporal en todos los puntos del espacio.

Esta técnica nos puede ser útil en el momento en el que se quiera simular sintéticamente un fenómeno electromagnético, sin la necesidad de llevar a cabo experimentos físicos en laboratorio o de campo; o también en el caso de que se quiera hacer una comparación entre los resultados teóricos y prácticos. Bergmann et al. (1998) la han utilizado para la modelación de la propagación electromagnética en medios cuyos parámetros de permitividad y conductividad sean dependientes de la frecuencia. Al Shukry et al. (2006) han desarrollado una metodología numérica, que utilizaba la técnica FDTD, para la caracterización de la firma digital en 3-D de tuberías de plástico y metal. Los medios utilizados fueron 4: aire, agua, suelo y PVC o metal. En esta ocasión se demostró que la señal reflejada de los dos *targets*, PVC y metal, se visualizaba en las trazas de amplitud de manera clara y fácil de identificar. Los resultados sintéticos, obtenidos por FDTD, se comprobaron con ensayos parecidos en laboratorio dando resultados satisfactorios.

2.6.1 Exigencias numéricas del método

Los algoritmos de cálculo del método FDTD pueden llegar a resultados no posibles físicamente. *Taflove* determina un criterio de estabilidad del método aplicable a todo tipo de medio dieléctrico encontrado:

$$\Delta t \leq \Delta t_{\max} = \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}} \quad (28)$$

Donde:

Δx , Δy , Δz son los pasos espaciales según los ejes O_x , O_y , O_z

Δt_{\max} = paso temporal máximo

c = velocidad en el medio

Esta condición fija una preparación de muestras temporal máxima que elimina el riesgo de divergencia de los cálculos. Sin embargo, la dispersión numérica es otro aspecto de los errores que puede generar el FDTD y en particular sobre el cálculo de la fase. Estos errores pueden acumularse entre ellas. Por ello, una red de mallas realizada más finamente permite eficazmente reducir este error. La tabla siguiente pone en evidencia que la red está íntimamente vinculada a los pasos espaciales. Una red $\lambda/30$ permite obtener una tolerancia sobre la fase distintamente disminuida. Por otro lado, para minimizar esta desviación, es preferible escoger un paso temporal próximo de Δt_{\max} .

Paso espacial	$\lambda/5$	$\lambda/10$	$\lambda/20$	$\lambda/30$	$\lambda/50$	$\lambda/100$
Error en la fase para una longitud de onda, propagación axial	18.0°	4.2°	1.0°	0.47°	0.17°	0.04°

Tabla 2. Influencia de los pasos espaciales en la dispersión numérica en la modelación FDTD

La modelación en diferencias finitas está sometida a diversas restricciones. Así, la diferencia entre la velocidad de fase numérica y la velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío c , induce una cierta dispersión numérica. Esta dispersión está vinculada al tamaño de las mallas espaciales y al intervalo temporal, determinados a partir de la longitud de onda de la señal en el medio.

También es necesario preservar la estabilidad numérica, como en el caso extremo que ocurre cuando la onda no recorre más de una celda por iteración temporal. Esto implica una relación entre la velocidad máxima de la onda v_{\max} , el paso en el tiempo y el paso espacial y la dimensión euclidiana del espacio D ($D=1, 2$ o 3) de la siguiente forma:

$$\frac{v_{\max} \Delta t}{\Delta} \leq \frac{1}{\sqrt{D}} \quad (29)$$

Una corrección geométrica puede ser aplicada sobre el cálculo para anular el error sobre la velocidad de fase numérica a 45°, a lo largo de las diagonales de las celdas (donde era débil al principio). Definimos una resolución espacial $R = \lambda/\Delta$, donde λ es la longitud de onda y Δ el paso espacial, así como una resolución temporal $\eta = \Delta / (c \cdot \Delta t)$, donde Δt es el paso temporal. Un número de celdas más grande por su longitud de onda (o sea R grande) minimizará la dispersión numérica.

2.6.2 Convolution Perfectly Matched Layer (CPML)

Otro problema se tiene al considerar un modelo con límites finitos como un medio infinito. En un modelo, los bordes están considerados como interfaces y reflejan por consiguiente la señal. En primer lugar vamos a introducir la noción de capas absorbentes antes de hablar de PML y CPML.

- Las capas absorbentes:

El algoritmo FDTD no puede tomar en consideración los sistemas infinitos. Así, la noción de condiciones en las fronteras absorbentes (Absorbing Boundary Condition, ABC) considera como capas a las pérdidas en el nivel de estas fronteras (introducción de una conductividad eléctrica σ y de una conductividad magnética σ^*) perfectamente adaptadas a las ondas planas en incidente normal.

Si consideramos un problema bidimensional, en el caso transverso eléctrico TE para el que solo las componentes E_x , E_y y H_z están presentes, en una capa adaptada, la proyección de las ecuaciones de Maxwell en coordenadas cartesianas se escriben:

$$\begin{cases} \varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x = \frac{\partial H_z}{\partial y} \\ \varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma E_y = -\frac{\partial H_z}{\partial x} \\ \mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} + \sigma^* H_z = \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \end{cases} \quad (30)$$

Si la condición siguiente entre las conductividades eléctricas y magnéticas se satisface, entonces la impedancia de onda se adopta igual a la del vacío y la reflexión sobre una interfaz vacío-medio es nula para cualquier onda plana en incidencia normal.

$$\frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma^*}{\mu_0} \quad (31)$$

- Perfect Match Layer (PML):

Sobre la frontera del dominio de cálculo, se aplican las condiciones de absorción de segundo orden de Mur o la condición de capa perfectamente adaptada (P.M.L.) de Bérénger, como una forma para simular las condiciones de espacio abierto (infinito).

Aunque imperfecto, este método fue utilizado hasta que *Bérenger* presenta en 1994 una nueva propuesta con el medio perfectamente absorbente llamado PML. Este medio permite generalizar el concepto de las capas de *Holland*, porque cada onda que llega sobre el medio penetra la capa sin reflexión, cualquiera que sean su ángulo de incidencia, su polarización o su frecuencia. El principio del método consiste en una descomposición de los componentes del campo electromagnético, por ejemplo en tres dimensiones podemos tener $E_z = E_{zx} + E_{zy}$. El sistema de Maxwell pasa de un sistema de seis ecuaciones (y seis incógnitas), a un sistema a doce ecuaciones (12 incógnitas).

Si volvemos al mismo caso TE que en el párrafo precedente (dos dimensiones), las ecuaciones del medio PML son, por definición, las siguientes:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma_y E_x = \frac{\partial(H_{zx} - H_{zy})}{\partial y} \\ \varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma_x E_y = \frac{\partial(H_{zx} - H_{zy})}{\partial x} \\ \mu_0 \frac{\partial H_{zx}}{\partial t} + \sigma_x^* H_{zx} = -\frac{\partial E_y}{\partial x} \\ \mu_0 \frac{\partial H_{zy}}{\partial t} + \sigma_y^* H_{zy} = -\frac{\partial E_x}{\partial y} \end{array} \right. \quad (32)$$

Estas ecuaciones, más generales que las propuestas por *Holland*, se limitan a los medios que no presentan pérdidas.

- Convolution Perfect Match Layer (CPML):

El PML inicial propuesto por *Bérenger* no permite tomar en consideración fácilmente cualquier material, y permite modelar únicamente los suelos dieléctricos sin pérdidas. Una solución a este problema es la que aportan *Roden* y *Gedney* con los CPML calculados como un producto de convolución. Este método se apoya, como para los PML, en el estiramiento de las coordenadas en el dominio frecuencial, y utiliza un producto de convolución en el momento del paso al dominio temporal. Los CPML permiten tomar en consideración los medios con pérdidas así como los medios dispersivos.

Si nos referimos nuevamente a las ecuaciones de Maxwell, obtenemos, después de una proyección de la ley de Ampere sobre el eje (O_x):

$$j\omega\varepsilon E_x + \sigma E_x = \frac{1}{S_y} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{1}{S_z} \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (33)$$

siendo S_i la función de estiramiento de Bérenger: $S_i = 1 + \frac{\sigma_i}{j\omega\varepsilon_0}$

Observamos que en esta ecuación, los términos que conciernen al medio real están a la izquierda y los términos del medio PML están a la derecha, siendo los CPML independientes del medio físico que rodean.

Transpuesta en el dominio temporal, esta ecuación llega a ser:

$$\varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x = \bar{S}_y(t) \otimes \frac{\partial H_z}{\partial y} - \bar{S}_z(t) \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (34)$$

siendo $\bar{S}_i(t)$ el inverso de la transformada de Laplace de $1/S_i$; $\bar{S}_i(t) = TL^{-1} \left[\frac{1}{S_i} \right]$ y « \otimes »

representa el operador producto de la convolución.

En el dominio discreto, el cálculo del producto de convolución nos lleva al sistema de ecuaciones siguiente, asegurando así el desplazamiento de la componente E_x en los PML:

Con $b_i = e^{-\sigma_i \frac{\Delta t}{\varepsilon_0}}$ y $a_i = b_i - 1$

$$\begin{aligned} \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{E_x^{n+1} - E_x^n}{\Delta t} + \frac{\sigma}{2} \left(E_x^{n+1} - E_x^n \right) &= \\ \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}} - H_z^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta y} - \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}} - H_y^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta z} + \Psi_{e_{xy}}^{n+\frac{1}{2}} - \Psi_{e_{xz}}^{n+\frac{1}{2}} & \\ \Psi_{e_{xy}}^{n+\frac{1}{2}} = b_y \Psi_{e_{xy}}^{n-\frac{1}{2}} + a_y \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}} - H_z^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta y} & \\ \Psi_{e_{xz}}^{n+\frac{1}{2}} = b_z \Psi_{e_{xz}}^{n-\frac{1}{2}} + a_z \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}} - H_y^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta z} & \end{aligned} \quad (35)$$

donde Ψ_j^i es una función intermedia, homogénea a una densidad de corriente.

Una permutación circular permite escribir las ecuaciones relativas a las cinco otras componentes del campo electromagnético.

CAPITULO 3: Aplicaciones del georadar en hidráulica urbana

3.1 Características electromagnéticas del subsuelo.

En este apartado queremos describir y analizar, basándonos en estudios antecedentes, el comportamiento de las ondas electromagnéticas durante su propagación por medios materiales, en función de las características que presentan dichos medios.

La prospección con radar de subsuelo se realiza sobre medios que, a menudo, son mezclas de distintos tipos de materiales. Hemos visto que los parámetros característicos electromagnéticos de los materiales son tres: ϵ , σ y μ . Por separado cada elemento tiene sus propias características electromagnéticas. Juntos, forman un medio cuya conductividad, permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética dependen de cada uno de estos elementos y del porcentaje del mismo en la mezcla.

En las tablas siguientes se muestran los valores correspondientes de esos parámetros para diferentes materiales, juntos con la velocidad de la onda v y el factor de pérdidas

Material	ϵ_r	σ (mS/m)	μ_r	v (cm/ns)	Γ (dB/m)
Anhidrita	6.7	-	-	11.6	-
Arenisca seca	6	0.00001-0.001	-	11.2	-
Arenisca húmeda	6-8	10	-	10.6-11.2	24
Basalto seco	8	-	1.08 (2% magnetita)	10.6	-
Basalto húmedo			1.18 (5% magnetita)		
Caliza seca	4-7	0.00001-0.001	0.999987	11.3-13.4	14
Caliza húmeda	8-9	10-25		10-10.6	
Carbón	4-5	-	-	13.4-15	-
Cuarzo	4.3	0.001-3.3	0.999985	14.5	-
Dolomita	6.8-8	-	-	10.6-11.6	-
Esquisto seco	7	-	-	11.3	-
Esquisto húmedo				-	
Gneis	9-10	-	-	9.5-10	-
Granito seco	5-6	0.00001	1.00(0% magnetita)	12.3-13.4	10^{-3}
Granito húmedo	7-15	1	1.04(1% magnetita)	10.6-11.3	0.6
Hulla	2.5-15	-	-	7.7-19	-
Margas	5-15	1-100	-	9	1-100
Mármol	8.3-13	-	-	8.3-10.4	-
Roca Volcánica (Piedra pómez)	4-7	-	-	-	-
Sal gema	5-6	0.01-1	-	13	0.01-1

Tabla 3. Parámetros electromagnéticos y características de la propagación de las radiofrecuencias y microondas utilizadas para prospección en diferentes tipos de rocas

Material	ϵ_r	σ (mS/m)	v (cm/ns)	α (dB/m)
Aluviones	9-23	10-100	6.3-10	-
Arcilla seca	3	0.25	17.3	0.28
Arcilla húmeda	8-15	50-1000	8.6-11	20
Arcilla limosa	30-50	>1000		
Arena seca	3-6	0.01	12-17	0.01
Arena húmeda	20-30	0.1-1	5.5-6	2.3
Arena costera seca	10		9.5	0,03-0.3
Limos secos	3-10			
Limos saturados	10-40	1-100	7-9.5	6
Grava	<8	<0.8	>10.6	-
Grava arenosa saturada.	15-22	<0.8	7.7-6.4	-
Suelo agrícola	9-25	1-100	6-10	-
Suelo agrícola medio	15	-	7.7	-
S. agr. grueso seco	8-15	0.8	10.6-7.7	-
S.agr. areno-limoso (saturado)	10-15	0.8-1.5	9.5-7.7	-
S.agr. húmedo	15-22	1.5-2	7.7-6.4	-
S.agr. saturado	20-26	0.8-1.5	6.7-5.9	-
Suelo arcilloso seco	2-3	0.1-1	21.2-17.3	-
Suelo arenoso seco	2-3	0.1-1	21.2-17.3	-
Suelo de bosque	12			
Suelo de marismas	12	-	8.6	-
Suelo de pastoreo	13	-	8.3	-
Suelo limoso seco	2-3	0.1-1	21.2-17.3	-
Suelo promedio	16	-	7.5	-
Turba	50-78	1-2	3.4-4.2	-

Tabla 4. Parámetros electromagnéticos para diferentes tipos de suelos y para materiales no compactados.

Material	ϵ_r	σ (mS/m)	v (cm/ns)
Hormigón	6-30	1-10	5.5-11.2
Asfalto	3-8	0.1-1	13.4-17.3
Suelo de cemento	16	10-100	7.5
PVC, epoxy, polyesters	3	-	17.3
Tubería metálica	1	100000000	-
Tronco de árbol	5	1	-
Nylon	3.6	-	-

Tabla 5. Parámetros electromagnéticos y características de la propagación de las ondas electromagnéticas para materiales utilizados en construcción, para diferentes plásticos y otros elementos no clasificados en las tablas anteriores.

En los medios que nos interesan en Hidráulica Urbana el parámetro μ suele ser aproximadamente igual a la unidad, por lo cual la fórmula (3) de la velocidad de la onda se puede simplificar. Además, en las altas frecuencias utilizadas por el georadar, los fenómenos de polarización dieléctrica dominan sobre los fenómenos de conductividad, así que simplificando se suele caracterizar un medio solamente por la constante dieléctrica ϵ .

En general, las principales características de los medios que influyen en los estudios con georadar son cinco: la composición química del medio, la granulometría, la densidad, la porosidad y el fluido intersticial existente. Todos los autores coinciden en el asignar a la constante dieléctrica dos valores extremos: el valor 1, relativo al aire; y el valor 80-81 relativo al

agua a la temperatura de 20° C.

La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas, estrechamente relacionada a la constante dieléctrica mediante la ecuación (4), queda afectada por las características descritas anteriormente, pero principalmente por la porosidad del medio y por el fluido contenido en estos poros, ya que estas dos condiciones del medio determinan en gran medida los valores de sus parámetros electromagnéticos.

Otro material de interés es la arcilla. Por arcilla se entiende el material cuyo grano tiene un diámetro medio inferior a 2 µm. Según varios estudios la existencia de arcilla reduce el tamaño de los poros del medio y disminuye su comunicación, creando un fenómeno de microporosidad. La granulometría del material del medio y de la arcilla, así como la forma de los granos son factores destacados en este proceso.

En medios formados por mezclas se utilizan modelos que permiten obtener su constante dieléctrica en función de las constantes de los materiales componentes y de su presencia porcentual.

El modelo CRIM, modelo de refracción complejo, que algunos autores han aplicado a una mezcla trifásica de hielo, agua y aire, queda definido por:

$$\sqrt{\varepsilon_n} = (1 - f_h - f_a) + \sqrt{\varepsilon_h f_h} + \sqrt{\varepsilon_a f_a} \quad (36)$$

Siendo ε_n la permitividad dieléctrica relativa para la nieve que proporciona el modelo CRIM, ε_h la permitividad dieléctrica relativa del hielo, ε_a la permitividad dieléctrica relativa del agua, f_h la fracción del volumen de hielo y f_a la fracción del volumen de agua. Para la permitividad dieléctrica relativa del aire se ha tomado la unidad.

Knoll y Knight (1994) utilizan la relación de la ecuación (37) entre el valor de la permitividad dieléctrica efectiva medida en las mezclas de arena y arcilla (ε_m) y los parámetros geotécnicos: la porosidad (ϕ), el contenido de arcilla ($P_{arcilla}$), el grado de saturación de agua (S_a) y las permitividades dieléctricas efectivas de los cuatro elementos (arena: ε_{arena} ; arcilla: $\varepsilon_{arcilla}$; agua: ε_a y aire: ε_0):

$$\sqrt{\varepsilon_m} = \phi(1 - S_a)\sqrt{\varepsilon_0} + \phi S_a \sqrt{\varepsilon_a} + (1 - \phi)P_{arcilla}\phi\sqrt{\varepsilon_{arcilla}} + (1 - \phi)(1 - P_{arcilla})\sqrt{\varepsilon_{arena}} \quad (37)$$

Otra relación es la que proponen *Hara y Sakayama* (1984) para medios de tres fases (38). Esta relación es muy similar a la utilizada por *Knoll y Knight* (1994). En ella se relacionan también

las permitividades dieléctricas relativas del material (ϵ_m), el aire (ϵ_{aire}) y el agua (ϵ_{agua}) con la porosidad (ϕ) y la saturación (S_a).

$$\sqrt{\epsilon} = \phi \left((1 - S_a) \sqrt{\epsilon_{aire}} + S_a \sqrt{\epsilon_{agua}} \right) + (1 - \phi) \sqrt{\epsilon_m} \quad (38)$$

Concluyendo, tanto la porosidad como el fluido intersticial tienen una gran influencia en las fluctuaciones que se observan en la permitividad dieléctrica efectiva. De forma general ya se ha aclarado que la permitividad dieléctrica efectiva que se puede medir mediante métodos experimentales depende de: la porosidad, la saturación de agua y el contenido porcentual de los materiales que componen los medios. Conforme aumenta la saturación, la permitividad aumenta. El valor máximo, de 81, se alcanza para una porosidad igual a 1 y una saturación total. Dentro de los materiales que pueden componer el medio, por sus características físicoquímicas, la arcilla es uno de los que más puede influir tanto en nuestras medidas como en la penetración de la señal.

Todo esto indica que, si los medios analizados se pueden representar con el modelo de la ecuación (30), la fuerte dependencia del parámetro medido con el contenido de agua y con la porosidad hace que sea imprescindible determinar estos dos factores para conocer su valor con una mayor exactitud. La dependencia con la saturación y la porosidad (porcentaje de agua en el medio) es más importante que la dependencia con la permitividad dieléctrica del material que forma la matriz del medio que lo forma (los elementos sólidos que componen el medio y los porcentajes de cada uno de ellos en la mezcla).

Esto indica que cuando se realizan estudios de campo es fundamental tratar de estimar el posible contenido de agua del medio (saturación) y la compactación del medio (porosidad).

3.2 Técnica del georadar y adquisición de datos

Un equipo georadar dispone básicamente de los siguientes componentes: una unidad central con monitor incorporado; una antena emisora y una receptora que se desplazan sobre la superficie del medio que se desea analizar; otra unidad para la visualización y el almacenamiento de registros. Las antenas son encargadas de emitir la energía hacia el interior del medio y de registrar las ondas que provienen de las reflexiones producidas en las discontinuidades interiores. Más accesorios son: marcadores y odómetros para ayudarnos a situar los perfiles, equipamientos como los vehículos de transporte y otros que nos puedan servir para detallar aún más el trabajo.

Las antenas pueden ser básicamente de dos tipos: monoestáticas, donde una misma unidad es a la vez emisora del impulso electromagnético y receptora de la señal reflejada; o biestáticas que

son formadas por dos módulos separados. Las antenas monoestáticas tienen la ventaja de realizar un mayor número de perfiles con más facilidad y rapidez.

Tomando como ejemplo el modelo *GSSI-5103A* con antena de 400 MHz las características técnicas se pueden resumir en la siguiente tabla.

Frecuencia central	400 MHz
Rango de profundidades	0 – 4 m
Dimensiones	30 x 30 x 17 cm
Peso	5 Kg.

Tabla 6. Características técnicas de una antena GSSI de frecuencia central de 400 MHz.

Las mediciones realizadas, bajo la forma de sucesiones de trazas de amplitud son visualizadas en la pantalla de la unidad central. La unidad central nos permite trabajar y analizar los datos en una manera muy versátil y fácil de utilizar. Dicha unidad permite también un preprocesamiento de los datos que, si es necesario, nos permite seleccionar un rango de frecuencias más adecuado, aplicar una ganancia (amplificación de las señales), y otros tipos de tratamientos.

Una traza de amplitud se puede describir intuitivamente como la cantidad de energía reflejada por las discontinuidades detectadas en el subsuelo en función del tiempo. En la figura siguiente se presenta un ejemplo.



Figura 4. Ejemplo de traza de amplitud: reflexiones de energía en función del tiempo

Una serie de trazas una al lado de otra nos proporciona un radargrama. El número de trazas que componen un registro depende de la resolución horizontal (*scan/units*) elegida a nuestra conveniencia. En este modo los registros/radargramas obtenidos aparecen en un plan espacio-tiempo. El tiempo se mide normalmente en nanosegundos ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ seg.}$) y representa el tiempo doble de propagación de la señal emitida: el tiempo que la señal tarda en ir y volver hasta la discontinuidad detectada. Para una visualización más cómoda se suele asignar a cada

rango de amplitud una diferente gradación de gris, o un color que resalte las variaciones bruscas de los parámetros electromagnéticos. Los registros que se obtienen son similares a los obtenidos cuando se realizan estudios de sísmica 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 impulsos se puede realizar muy rápidamente.

Por este motivo, aunque se trata de registros puntuales (trazas), los radargramas pueden llegar a considerarse 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 longitud horizontal como la profundidad a la que se encuentra. La profundidad que se puede alcanzar depende tanto de las condiciones del medio analizado como del equipo utilizado.

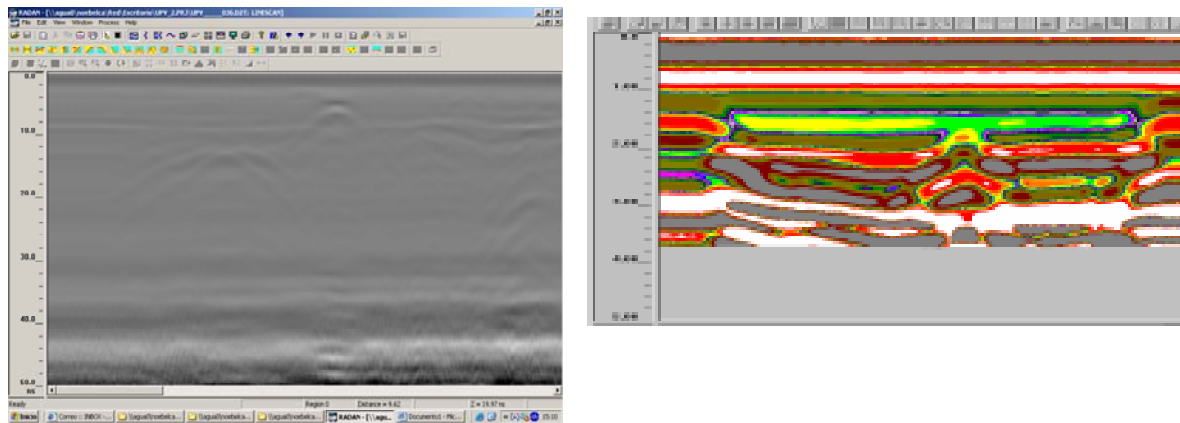


Figura 5. Ejemplo de registros en escala de colores o en escala de diferentes gradaciones de gris

En muchos casos los datos obtenidos en campo sin tratamiento posterior, son suficientes para llevar a cabo un ensayo satisfactoriamente. En el caso contrario, o cuando se busque hacer un trabajo con mayor nivel de detalle, disponemos también de un software *ad hoc* que nos permite hacer un postprocesamiento más completo: el RADAN 6.5.

El software funciona en ambiente Windows y se puede conectar con la unidad central mediante conexión USB. Las capacidades del RADAN son muy amplias y permite tratar los datos de manera elaborada utilizando técnicas matemáticas avanzadas como la transformada de Fourier, la transformada de Hilbert, filtros frecuenciales IIR, filtros FIR, y la migración de datos. Éstas son técnicas ampliamente utilizadas en el tratamiento de datos sísmicos que han resultado ser muy útiles también en nuestro campo.

3.3 Aplicaciones en hidráulica urbana: Antecedentes

El georadar ha nacido originariamente como una técnica no destructiva para la realización de análisis geológicos del subsuelo (prospección geofísica). Con el tiempo su uso se ha extendido a varios campos: desde la arqueología, pasando por todos una serie de estudios destinados a la detección de minas en zona de guerra, hasta varios aspectos de la ingeniería civil, incluida la hidráulica urbana. En los últimos 10 años se han desarrollado una serie de investigaciones finalizadas a su desarrollo como herramienta para la mejora del rendimiento de redes hidráulicas urbanas.

Como comentamos anteriormente, son dos las aplicaciones principales que podemos efectuar con el radar de subsuelo en hidráulica urbana. La primera, debida a su capacidad de detectar tuberías enterradas, es dirigida a obtener un catastro más preciso de la red: en zonas donde las conducciones son muy viejas y donde se desconoce la posición exacta de la tubería y también para la detección de acometidas ilegales. El segundo uso es finalizado a localizar la posición exacta de una fuga de agua. A este respecto hay que remarcar que el georadar puede ser el último paso en la búsqueda puntual de fugas ya que antes ha sido necesario un estudio detallado de auditoria y de prelocalización (normalmente con equipos acústicos).

3.3.1 Localización de fugas de agua.

El uso del radar como método de localización puntual de fugas se está difundiendo cada vez más en los últimos años, y ya existen varios estudios de investigación a este respecto. La manera de actuar en este caso es la siguiente: una vez conocida la posición de la tubería (y al momento de utilizar el radar se tiene que suponer conocida) no resulta complicado seguirla longitudinalmente; en el caso de que exista en algún punto una fuga de agua, ésta aparecerá bajo la forma de anomalía relacionada con el material del entorno de la tubería debido al cambio de propiedades electromagnéticas que en él provoca dicho líquido.

Desde los años '90 se han comenzado una serie de investigaciones concernientes este tema. El primero en realizar un trabajo de una cierta relevancia fue *Hunaidi (GPR for Detection Leaks in Buried Plastic Water Distribution Pipes, National Research Council Campus of Ottawa – Canadá 1998)* que ya en el pasado se ocupó de métodos de localización de fugas pero con equipos acústicos. Hunaidi finalizó un ensayo de campo en condiciones reales con tuberías de material plástico intentando averiguar el potencial del radar con varias tipologías de fugas, de procesamiento de imágenes, y análisis de los datos. La herramienta utilizada fue un PULSEKKO RADAR SYSTEM, la tubería era de PVC, larga 200 m y con diámetro de 150 mm. El suelo utilizado era un terreno arcilloso y limoso. El diámetro del agujero de fuga se hizo de $\frac{1}{4}$ de pulgada que produjo un caudal medio de 20 l/min. El terreno se dividió mediante una malla de 10 m por 40 m. Las antenas utilizadas fueron de 50, 100, 200, 450 MHz. Las

conclusiones obtenidas aunque muy prometedoras no lograron algún resultado significativo, también debido al tipo de suelo en cuestión (la arcilla saturada provoca una atenuación de la señal muy fuerte).

Procediendo en orden cronológico se realizaron pocos años después dos interesantes trabajos dentro de los cuales el uso del georadar como equipo de detección de fugas fue utilizado junto con otras técnicas en manera complementaria. *K.R. Maser y M.S Zarghamee (Leak and Condition evaluation of a buried Aqueduct, Arlington 1999)* ensayaron en un acueducto de un área metropolitana un conjunto de varias metodologías: a parte del georadar, la termografía infrarroja y test de ultrasonidos. Los resultados fueron: de las 25 fugas documentadas, 13 se confirmaron, en 9 casos la fuga no fue evidenciada y en 3 no se pudo evaluar; se encontraron otros 35 posibles lugares con una posible fuga; se encontró una alta conductividad del suelo en 9 áreas, 6 de las cuales cerca de las posibles fugas. El trabajo demostró un posible uso más eficaz del radar pero como complemento a otras técnicas.

En el 2002 *Liu et al. (A Case Study to Detect the Leakage of Underground Pressureless Cement Sewage Water Pipe using GPR, Electrical, And Chemical Data, 2002)* utilizaron el georadar junto con técnicas de medición del potencial eléctrico y datos geoquímicos para la detección de fugas en tuberías de hormigón de redes de saneamiento.

En el 2003 se presentó en el *WorkShop* internacional que se celebra en materia de radar de subsuelo, otro trabajo específico sobre la evaluación de la funcionalidad del aparato para las fugas de agua en tuberías de plástico. Dicho trabajo se desarrolló en Grecia por *Stampolidis et al. [Detection of Buried Plastic Distribution Pipes in Urban Places – A case study]* en la área urbana de Creta. Se utilizó un PULSEKKO RADAR SYSTEM y una antena de 225 MHz apantallada con cuidado para evitar el ruido externo típico de una ciudad. Con un intervalo espacial entre un perfil y el otro entre 4 y 10 m se obtuvieron 59 perfiles GPR, de longitud del perfil de 330 m. En total la longitud ensayada fue de 1350 m. Respecto al trabajo anterior se hizo un estudio de post procesamiento interesante aplicando un filtro pasa bajo para eliminar el ruido de alta frecuencia. La velocidad media de la onda fue de 0,07 m/ns y la profundidad máxima alcanzada de 1,5-2,5 m. Los resultados logrados intentaron dar una caracterización gráfica de los puntos de fuga mediante patrones de reflexiones (hipérbolas) evidenciados; en el caso de tubería de plástico llenas de agua se encontró la *dual reflection* como reflexión característica. Se evidenciaron también las diferentes respuestas en la superficie entre la acera y el asfalto de la calzada.

En el mismo congreso pero en el año siguiente *M. Nakhakash et al. (Water Leak Detection Using Ground Penetrating Radar, Iran 2004)* enfocaron el mismo problema de manera más teórica utilizando simulaciones electromagnéticas. El modelo utilizado fue el FDTD (*Finite Difference Time Domain*), modelo en el dominio del tiempo a las diferencias finitas. El proyecto

fue facilitado también por las características del suelo de Irán, que es muy seco y permite un contraste muy fuerte entre la zona húmeda de la fuga y la zona seca. Se decidió hacer un modelo de simulación en vez de un ensayo real por los altos costes que este último implicaba. La idea era de caracterizar la fuga según su tipología y según el material de la tubería enterrada, variando también los parámetros de las antenas y del suelo (conductividad y permitividad típicos de las cercanías estudiadas) realizando así numerosas simulaciones de manera útil para entender el fenómeno en su totalidad. La constante dieléctrica media elegida era de 4,5 y la conductividad $\sigma = 0.01$ s/m. Las tuberías tenían un diámetro de 20 cm y una longitud de 120 cm.

Sucesivamente se desarrollaron otros trabajos para intentar modelar el fenómeno. *Lymperopoulos et al. (Detection of Water Leaks in Supply Pipes with Active Microwave GPR Sensors and Electromagnetic Modelling, Grecia 2004)* utilizaron la técnica del sistema radar de frecuencia modulada de onda continua (*Frequency Modulation Continuous Wave*) y de onda continua (*Continuous Wave*) que utiliza el desplazamiento de fase o desplazamiento de frecuencia para distancias cortas. El objetivo era obviamente aumentar la efectividad de localización de la fuga. Los resultados logrados demostraron la eficiencia del método *CW* en el detectar un ligero efecto Doppler en el agua en movimiento, mientras los sensores remotos del sistema *FMCW* resultaron ser una adecuada herramienta para aplicar el algoritmo creado para la ocasión y obtener una visualización del subsuelo en las cercanías de las fugas. Un trabajo similar se hizo por *Sang-Wook Kim et al. (Comparison of FMCW and Pulse Type GPR for Water Leakage Detection, Korea 2005)*: en este artículo se compararon dos sistemas de GPR, *FMCW* y *Pulse*, y se evaluaron para la detección de fugas con un ancho de banda de 100 MHz – 400 MHz. Se construyó un *outdoor test* para adquirir la señal del radar en caso de fuga de agua. La situación de fuga fue también implementada con un modelo. La factibilidad de los dos sistemas fue analizada mediante la comparación de los datos medidos. También se desarrolló un algoritmo de detección.

Pero, los trabajos más interesantes se llevaron a cabo en el *Department of Applied Science University of Arkansas de Little Rock* (EE.UU.), donde se realizaron trabajos con un enfoque experimental que han inspirado parte de la filosofía de este trabajo.

3.3.2 El georadar para la localización de tuberías enterradas

Un gran número de sistemas de abastecimiento bien en Europa y bien en Iberoamérica son relativamente antiguos y en muchos casos se desconoce la exacta posición de las tuberías. En otros casos, donde por ejemplo la red tiene que abastecer espacios muy amplios y los tramos de tuberías alcanzan longitudes muy largas, la red es más sensible a sufrir la instalación de acometidas ilegales realizadas por empresas y particulares para utilizar el agua de forma

fraudulenta. La utilidad del georadar en estos casos se concreta en la detección y localización de las tuberías enterradas que por un motivo u otro no aparecen en el plan de que se disponga al momento.

La manera de actuar con el radar en este caso es la siguiente: se escoge un tramo de la tubería principal conocida y se desplaza el equipo paralelamente a la misma, de forma que se discurre transversalmente a las acometidas de los usuarios. De esta manera, si pasamos por encima de una tubería enterrada el georadar detecta una discontinuidad electromagnética en la señal recibida, que se visualiza en la pantalla de una forma característica y reconocible (hipérbolas) que mostramos en la figura siguiente.

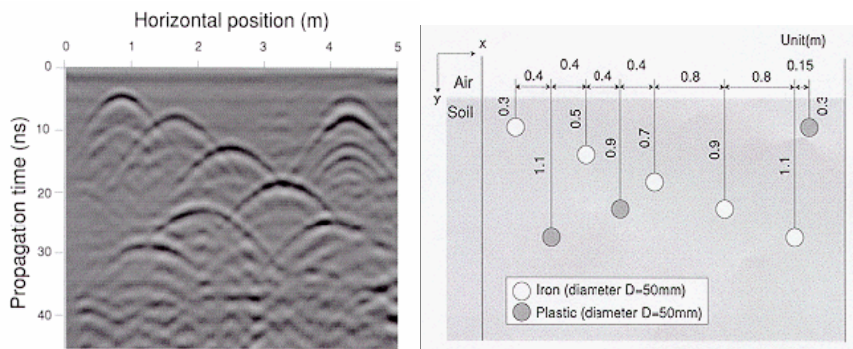


Figura 6. Visualización de tuberías de diferentes materiales y diámetro por medio del georadar

Recordamos que cada objeto, que haya dimensión finita, enterrado y detectado por el georadar viene visualizado mediante una figura hiperbólica. La razón deriva de la propagación en forma cónica característica de las ondas electromagnéticas. El radar empieza a detectar cada objeto enterrado (tubería, rocas, vacíos etc.) antes que esté posicionado en la vertical correcta proporcionando señales a la respuesta a diferentes tiempos aunque el objeto sea a la misma profundidad. En la figura (7) se puede ver gráficamente el fenómeno.

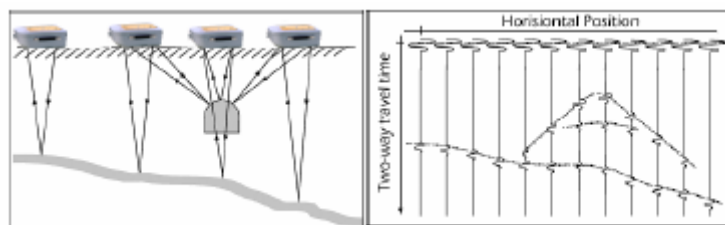


Figura 7. Propagación cónica de las ondas electromagnéticas y su efecto en la visualización de objetos de dimensiones finitas

Los primeros trabajos importantes relacionados con la detección de tuberías enterradas fueron realizados por *Unterberger* y *Ulriksen* en los años '70-'80. Sobre todo este último, de la Universidad de Lund (Suecia) describió en su tesis doctoral (*Application of Impulse Radar to*

Civil Engineering, Lund University of Technology, 1982) las varias formas en las cuales se pueden visualizar las tuberías enterradas dependiendo de su contenido, de su material y de su espesor. *Lorenzo y Cuellar (1995)* de la Universidad de La Coruña llevaron a cabo varios ensayos y demostrando la utilidad del georadar en la localización de tuberías enterradas. Gracias a la visualización característica de todos los cilindros por medio del radar, que nos proporciona dos reflexiones, tuvieron la posibilidad de estimar, en muchos casos, el diámetro ya que la velocidad de las ondas en el aire y en el agua (que fluyen dentro de las tuberías) es bien conocida.

La profundidad a la que se encuentran las tuberías en el subsuelo suele ser reducida, por lo que es posible intentar su localización con las antenas de frecuencia elevada (500-1000 MHz) que, además, aportan la resolución adecuada para el pequeño diámetro que presentan muchas de ellas (del orden de centímetros) (*E. Lorenzo, V. Cuellar, 1995*).

3.3.3 Problemas durante la adquisición e interpretación de datos

Cuando se llevan a cabo ensayos en laboratorio y sobre todo en campo, son varias las problemáticas que durante la adquisición de datos con radar de subsuelo pueden superponer el ruido sobre la señal, dificultando la posterior interpretación. Esto, también sucede si no se tiene en cuenta la resolución que se puede alcanzar o los cambios de velocidad laterales del medio.

Vega Pérez Gracia en su tesis doctoral “*Radar de subsuelo - Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico*” (2001) describe eficazmente 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. Los efectos descritos son los siguientes:

- Las reflexiones externas.

Pueden ocasionarse cuando parte de la energía se propaga en otras direcciones fuera de la principal y su trayectoria se encuentra a un cambio brusco de los parámetros electromagnéticos (una pared, un vehículo, un techo...). Son ocasionadas en reflectores situados fuera del medio analizado, localizados cerca de la antena. Dichas reflexiones se producen cuando se trabaja con antenas con bajo nivel de apantallamiento, 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. 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 velocidad 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 necesaria 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 averiguar si la anomalía se ha producido en dichos elementos.

- Cambios laterales en la velocidad de propagación de la onda.

Las variaciones laterales de la permitividad efectiva del medio ocasionan cambios en la velocidad de propagación de las ondas. 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. El medio se puede dividir en sectores, definido cada uno de ellos por una ϵ_r característica.

- Efectos de borde.

Es un problema similar a los cambios laterales en la velocidad de propagación internos al medio. 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.

El problema de las reflexiones múltiples se produce sobre todo cuando en un medio poco atenuante hay una superficie fuertemente reflectora (por ejemplo una lamina metálica). Se producen en este caso reverberaciones. 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, un tratamiento de señales llamado “deconvolución predictiva” puede disminuir el ruido que este efecto produce en la señal. En uno de los capítulos siguientes describiremos un ensayo en el cual se aplica dicho tratamiento.

- Efectos de reflectores de pequeño tamaño próximos entre sí.

En los casos anteriores se analizan las causas de ruido en los radargramas. Sin embargo en algunos estudios con radar de subsuelo resulta complicado determinar la situación de los elementos anómalos inmersos en el medio. 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 registrados, si están cercanos y son pequeños, por ejemplo, cuando la superficie irradiada por la antena abarca dos elementos, éstos pueden quedar registrados como un único elemento; 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.

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

3.4 Ensayos para la evaluación de la eficacia del georadar en hidráulica urbana

Siguiendo la línea de *Eyuboglu, Mahdi y Al Shukri*, que en el 2004 desarrollaron un experimento en laboratorio para evaluar las fugas en tubería de plástico y metal (*Detection of Water Leaks Using GPR, 2004*), se han comenzado y están todavía en curso ensayos en el laboratorio del Centro Multidisciplinar de Modelación de Fluidos (CMMF) de la Universidad Politécnica de Valencia con el objetivo de establecer la firma digital de las fugas en tuberías y de las mismas tuberías mediante el georadar. Otros ensayos se han llevado a cabo directamente en campo en las cercanías de la Universidad Politécnica de Valencia. Se han variado las condiciones de trabajo y de los materiales utilizados, y al final los radargramas fueron tratados y procesados con el ayuda del ordenador. A este propósito, pensamos oportuno evidenciar otra vez la importancia del parámetro electromagnético de los materiales de mayor influencia sobre el éxito positivo de los estudios con el radar: la constante dieléctrica ϵ_r (ver párrafo 3.1).

3.4.1 Ensayos en laboratorio

El modelo físico de laboratorio ha consistido sencillamente en un cajón de madera de $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0,6\text{ m}$ que se ha rellenado de un suelo convencional de los alrededores de la UPV. El fondo del cajón se ha realizado mediante una serie de listones de madera tratados, de tal forma que se pueda permitir la evacuación del agua fugada. En la caja se han montado refuerzos laterales para contención. No se ha utilizado ningún elemento metálico en el ensamblado del cajón.

La elección del diámetro se ha basado en intentar simular a una escala de laboratorio las características reales de las conducciones de distribución compatiblemente con las dimensiones del modelo estudiado. Se han elegido tuberías de diámetros de 110 mm y 1 pulgada . Las tuberías se han enterrado inicialmente a una profundidad de $30\text{-}23\text{ cm}$ respectivamente.

El terreno utilizado ha consistido en un suelo arcilloso seco. Ensayos siguientes han evidenciado un valor de la constante dieléctrica relativa de $2,4$. Este valor está muy cerca al valor de la ϵ_r ,

característico de ese material que se puede encontrar en literatura. Para su determinación, debido a la capacidad de los metales de reflejar totalmente la señal electromagnética, se ha utilizado una barra de hierro puesta a una profundidad de 20 cm. Se ha variado el valor de la constante dieléctrica hasta que la profundidad de la barra detectada por el radar coincidiese con la real. De esta manera se ha obtenido el valor de dicha constante.

En las tuberías se han practicado unos orificios de 3 mm para simular las fugas; en el caso de la tubería de 110 mm se ha posicionado el agujero hacia abajo mientras que en el caso de la tubería de 1" hacia arriba. Las tuberías han estado las dos en condiciones de lámina libre. La simulación de fugas se ha desarrollado en tres fases principales:

- 1) Mediciones en seco. Se han utilizado dos antenas diferentes (900 MHz y 1,5 GHz) y se han variado las direcciones del perfil (longitudinal o transversal), los parámetros del aparato y los tratamientos aplicados, con el objetivo de encontrar la mejor configuración posible antes de inyectar el agua en las tuberías.
- 2) Inyección de agua en las dos tuberías para obtener la firma digital de la fuga de una tubería de PVC. Los ensayos en las dos tuberías se han hecho en diferentes momentos dando tiempo al terreno de relleno de secarse para no cambiar sensiblemente las propiedades electromagnéticas del suelo.
- 3) Postprocesamiento de los registros mediante RADAN 6.5.



Figura 8. Laboratorio CMMF: caja de madera donde se han realizado parte de los ensayos

Fase 1

Las antenas utilizadas han sido dos modelos de la firma GSSI, de 900 MHz y 1,5 GHz. Se han

realizado varios ensayos en seco en las dos tuberías, con el objetivo de encontrar la configuración de la antena que proporcionaba ver las imágenes más nítidas posibles.

La curva de ganancia se ha ajustado de manera tal que se amplificaba la señal en correspondencia con las discontinuidades interesantes (tuberías). Después de varios métodos de preprocesamiento se ha decidido que los datos se tenían que filtrar con un filtro frecuencial paso banda utilizando una banda entre 600 MHz y 3000 MHz.

Al final de esta fase se ha encontrado más adecuada la antena que tiene la mayor resolución (1,5 GHz). Eso se debe a las magnitudes limitadas de la caja. Para su profundidad, y considerando que las tuberías se pusieron a 20-30 cm de la superficie (algo no muy común en la realidad), la antena de 1,5 GHz nos facilitó el mejor compromiso entre resolución y profundidad alcanzable.

Fase 2

La primera inyección de agua se ha efectuado en la tubería de 1", inyectando 400 ml de agua. Los resultados logrados han sido satisfactorios y los efectos distorsionantes provocados por la fuga son evidentes (fig. 9). La pérdida de líquido ha resultado ser muy concentrada, debido a la pequeña cantidad inyectada, de manera que el contraste entre zona seca y húmeda ha sido puntual y fácilmente detectable mediante el aparato radar. La segunda inyección de agua se ha efectuado en la tubería de diámetro 110 mm. Se ha puesto inicialmente un litro para sucesivamente inyectar tres litros más en tres momentos diferentes (a media hora el uno del otro).

Los radargramas obtenidos han evidenciado las discontinuidades en dos maneras distintas. En el primer ensayo correspondiente a la tubería de diámetro menor y con el agujero de fuga situado hacia arriba, el hueco provocado por el chorro de agua se forma encima de la tubería y luego se sale por los dos lados de la misma. En el hueco se queda una cantidad de agua muy reducida que va a cambiar las características electromagnéticas del medio alrededor durante un tiempo significativo (del orden de unos días). La anomalía, bien visible, se visualiza en el radargrama como una hipérbola situada por debajo de la tubería misma.

En el caso de la tubería de diámetro más grande, y con el agujero situado hacia abajo, la anomalía relativa a la fuga se visualiza de manera menos localizada. En este caso el agua, tal vez por el no ser bien compactado el terreno, encuentra rápidamente caminos preferenciales hacia abajo, y se fuga mediante un rápido drenaje. Las características electromagnéticas del terreno debajo de la tubería han cambiado de manera difusa por el incremento de humedad en el entorno. En esta zona la velocidad baja notablemente y parte de la visualización de la tubería se colapsa hacia abajo (fig. 10).

En las figuras siguientes mostramos los radargramas, sin tratamientos, correspondientes a las

tuberías de 1” y de 110 mm en diferentes condiciones de saturación. El perfil longitudinal de la tubería de 1” (fig. 9) está representado por la capa más oscura en la izquierda. El registro de la derecha ha sido registrado una hora después de la inyección de agua. La saturación del entorno de la tubería provoca un retardo de la señal (por la presencia del agua) y por eso parte de la tubería aparece más profunda de lo que es en realidad. En los registros en colores (fig. 10) se comparan dos perfiles longitudinales, relativos a la tubería de 110 mm. Los dos se refieren al caso de fuga: 1 minuto y una hora después de la inyección del agua.

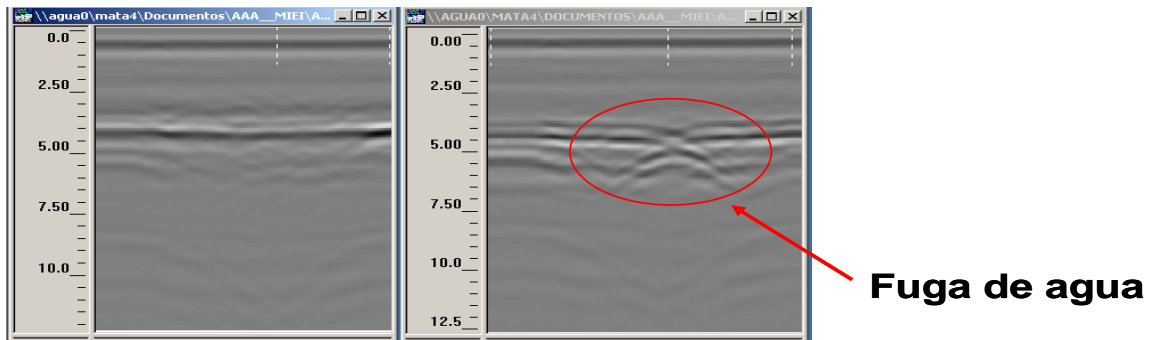


Figura 9. Perfil longitudinal de la tubería de 1”, antes y después de la primera inyección de agua en un ensayo de laboratorio

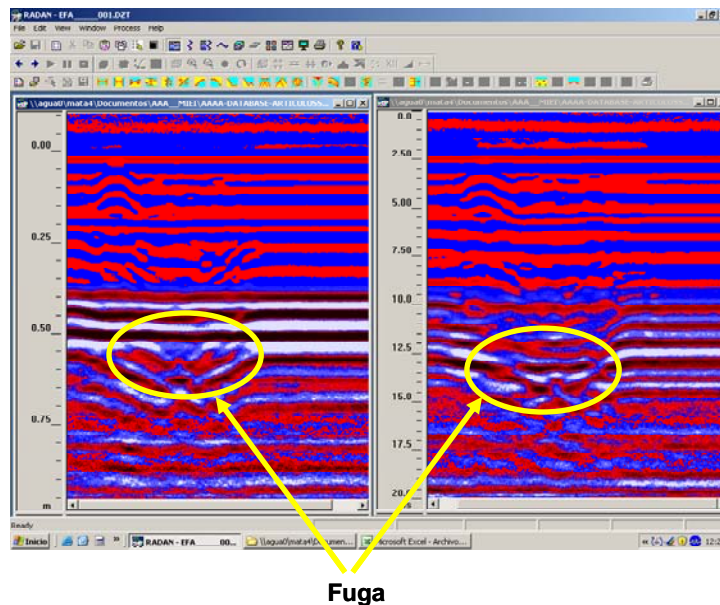


Figura 10. Perfil longitudinal de la tubería de 110 mm en diferentes condiciones de saturación

El efecto de retraso de la señal en presencia de saturación del entorno, es bien visible además en los registros de la fig. 11. Como antes, las mediciones se hicieron en seco y después de la inyección del agua. Los perfiles son transversales a las dos tuberías y se puede apreciar en el registro de la izquierda como la saturación hace que la segunda hipérbola que corresponde a la tubería de 1” se sitúe en un punto más bajo respecto a su posición real. En este registro son evidentes también las típicas reflexiones dobles provocadas por la presencia de agua en la

tubería de la derecha. Estudios anteriores habían ya evidenciado el hecho de que la mezcla suelo-agua nos proporcionaba anomalías en forma de hipérbolas parecidas a cualquier objeto de dimensión finita (Nakhkash, Mahmood-Zadeh, 2004).

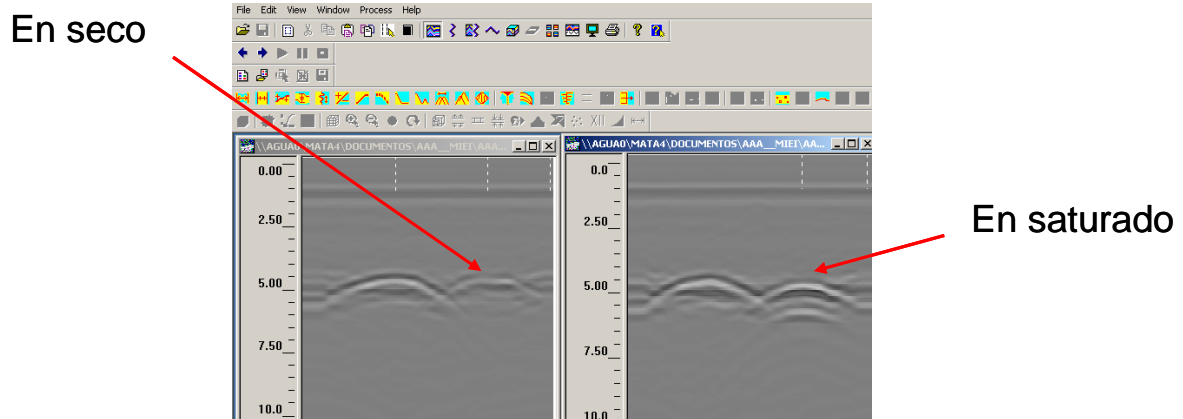


Figura 11. Perfil transversal de las dos tuberías en seco y en condición de saturación

Fase 3

En total se han realizado más de 200 perfiles del radar variando, como se ha comentado, las condiciones de diferentes maneras: las antenas, las direcciones del perfil (longitudinal o transversal), los parámetros del aparato, los filtros frecuenciales y tratamientos aplicados. En esta fase los registros se han procesado con el software RADAN 6.5 y se han aplicado tratamientos para obtener una mayor nitidez de la imagen. En un párrafo siguiente hablaremos de los resultados obtenidos con el RADAN relativos a este ensayo, y junto con otros, describiremos algunas de sus potencialidades.

3.4.2 Ensayos con arena

Un segundo ensayo se ha llevado a cabo con arena y precisamente en la Playa de la Malvarrosa en Valencia. La tubería utilizada ha sido de PVC de una pulgada de diámetro, la misma que ya se utilizó en laboratorio, y se posicionó a una profundidad de 28 cm de la superficie. Las condiciones del *test* resultaron perfectas para el ensayo. La arena seca es un material muy drenante; al ocurrir una fuga de agua en ese material, el contraste entre la zona húmeda y seca es muy evidente, con lo que la discontinuidad se detecta fácilmente.

El valor de la constante dieléctrica resultó ser alrededor de 4, conforme con los valores asignados por otros autores a la arena seca. Se hicieron 20 ensayos: en seco, inmediatamente después de la inyección de agua, y a intervalos de tiempo regulares después de la inyección misma.

Los resultados han sido altamente satisfactorios, visto que los registros nos han permitido individuar la zona de fuga rápidamente. Este es un caso típico en el que no se necesita de

postprocesar los datos, sino solo un adecuado preprocesamiento y una correcta calibración del equipo.

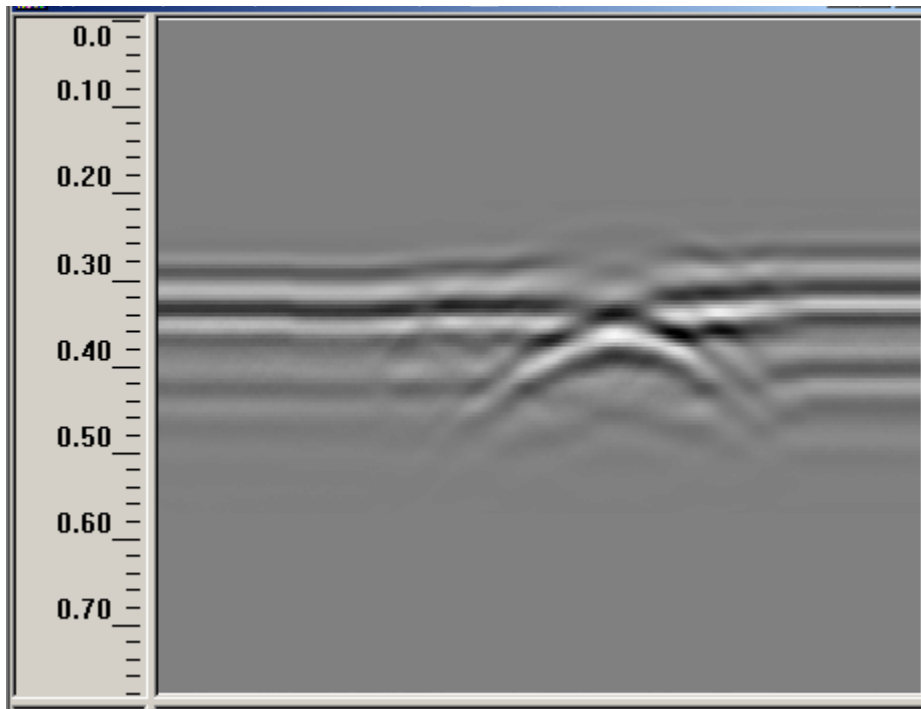


Figura 12. Ensayo en la Playa de la Malvarrosa con arena seca. Tubería de 1". Profundidad de la tubería igual a 28, 5 cm. Se encontró un valor de la $\epsilon = 4$

3.4.3 Ensayos con arcilla saturada.

El paso natural siguiente que se ha llevado a cabo ha sido progresar de un ensayo a escala de laboratorio a otro con dimensiones más cerca de las que se dan en la realidad. Por eso se ha utilizado material de excavación de obras dentro de la Politécnica de Valencia y se ha procedido a simular otro ensayo, pero a una escala más grande. Este paso ha permitido salir de las condiciones más controladas de laboratorio hacia las implicaciones y limitaciones que podemos encontrar en campo. Si consideramos el enfoque de nuestra investigación, que cabe dentro de un marco más experimental que teórico, podemos entender correctamente este paso como lógico. La tubería utilizada ha sido de PVC de diámetro igual a 110 mm y se ha enterrado a 50 cm de profundidad. El terreno en cuestión ha resultado ser de tipo arcilloso con un alto nivel de saturación.

Recordamos que, todavía, los métodos convencionales de localización de fugas son aquellos que utilizan el análisis del ruido de las fugas para localizarlas puntualmente. Estos equipos acústicos, sobre todo los correladores y los micrófonos de tierra, han perdido efectividad por la escasa capacidad de transmitir las vibraciones de ruido de las tuberías de plástico. El georadar tiene la ventaja que no depende del tipo de material de las tuberías en cuestión y así, si

hubiéramos utilizado una tubería de metal en uno de estos ensayos esto no hubiera influenciado la calidad de los resultados.



Figura 13. Foto de ensayo in situ en la Universidad Politécnica de Valencia con un terreno arcilloso procedente de una excavación antecedente. Se encontró un valor de la $\epsilon = 8$. Se utilizó la antena de 400 MHz, y la tubería de 110 mm se puso a una profundidad de 50 cm

Los ensayos *in situ* conllevan problemas e implicaciones que no se pueden controlar fácilmente como dentro de un laboratorio. En nuestro caso el suelo utilizado ha sido un relleno de una excavación dentro de la universidad. El suelo tenía las características de gran esponjamiento y poca compactación. La cantidad de huecos con agua y aire presentes en el relleno contribuyó a provocar un ruido de alta frecuencia elevado en los radargramas. Para el cálculo de la constante dieléctrica se ha utilizado una barra de hierro de 60 cm enterrada a 42 cm de profundidad. El metal, siendo un reflector total a las ondas electromagnéticas, ha sido fácilmente detectado por el georadar. Este experimento nos facilitó una constante ϵ_r igual a 8. Es un valor típico de muchos terrenos y materiales, y, de todas maneras, más alto de los valores encontrados en los ensayos anteriores.

La otra diferencia importante con respecto al trabajo en laboratorio, ha sido la antena utilizada: la antena de 1,5 GHz tiene una resolución elevada, y considerando también las dimensiones pequeñas de laboratorio, obtuvimos una imagen muy nítida de la fuga. En este caso, pensando a las posibles utilidades del georadar en redes reales, donde las tuberías se encuentran a una profundidad de 50 cm a 2 metros, se ha pensado oportuno utilizar una antena de 400 MHz, y siempre por esta razón se ha elegido ese dado valor de la profundidad (50 cm). Debido al

elevado ruido presente, al suelo poco compactado, y de consecuencia a la cantidad de vacíos detectados, la imagen de la tubería ha resultado ser poco nítida y muy ruidosa. En este caso ha sido necesario un tratamiento posterior de los registros mediante PC. Los ensayos realizados han sido longitudinales a lo largo de la tubería y transversales justo encima del agujero. Se ha dejado la barra de metal para tener una referencia, visto la sensibilidad del radar para su detección. En las figuras siguientes se muestran: un perfil longitudinal con la mancha de agua provocada por la fuga; perfiles transversales que ponen en evidencia la distorsión presente en la hipérbola correspondiente a la barra de hierro por la presencia de agua que poco a poco se expande a su alrededor.

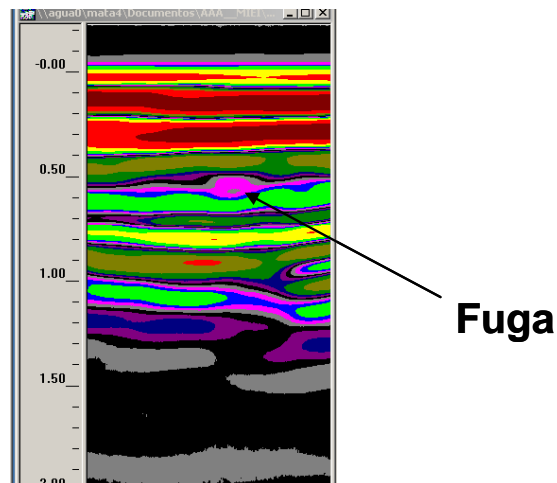


Figura 14. Visualización de la saca de agua provocada por la fuga en el ensayo in situ anterior

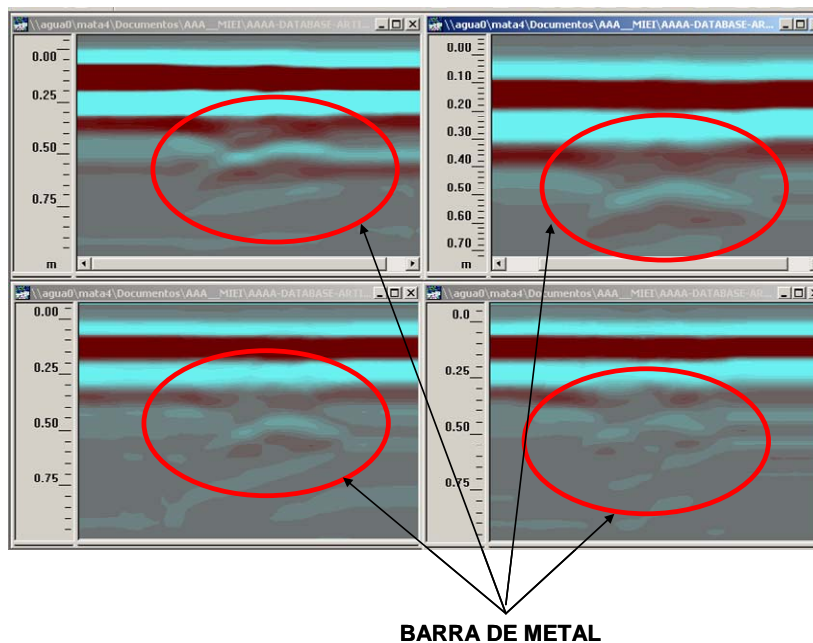


Figura 15. Resultados del outdoor test. Perfiles transversales: se puede apreciar la distorsión que la fuga de agua ejerce sobre la barra de metal puesta pocos centímetros arriba

3.5 Radan 6.5: Potencialidad del software para el postprocesamiento

A la hora de hacer mediciones en campo, es muy importante tener bien claro el objetivo específico que se quiere alcanzar en cada paso. En muchos casos, si se ha tenido el cuidado necesario los radargramas son fácilmente interpretables en la pantalla de la unidad central. Cuando esto no sea posible se tiene a disposición un software que nos permite limpiar parcialmente los radargramas del ruido (y entonces mejorar la relación señal/ruido) y/o resaltar algún elemento de ellos. El programa es el ya mencionado RADAN 6.5 de la empresa americana GSSI.

En un párrafo anterior hemos mencionado ya los posibles problemas que se pueden encontrar en las mediciones en campo:

- Reflectores externos.
- Radargramas complicados con varios elementos presentes en el subsuelo.
- Efectos del borde.
- Cambios laterales en la velocidad del medio.
- Reflexiones múltiples

Por algunos de estos problemas es suficiente la experiencia del técnico encargado para una correcta evaluación. Para otros es necesario un tratamiento posterior mediante el RADAN que nos permita una mejor interpretación.

En este apartado se ha pensado analizar con más detalles las posibilidades del software pensando en las aplicaciones que conciernen esta investigación y que se van a describir a seguir.

3.5.1 Aplicación de la deconvolución predictiva en presencia de fuertes reflectores

La deconvolución predictiva es un procesado que tiene como objetivo mejorar la resolución vertical de los radargramas. Es una técnica de procesado que se utiliza típicamente en la sismica pero que nos puede servir también en temas de radares de subsuelo. Se aplica porque se considera que la traza registrada por la antena receptora del georadar es una señal que depende de la respuesta de las antenas, del pulso inicial y de los efectos que ejercen sobre la señal los materiales del suelo durante su propagación, actuando éstos como un filtro sobre la señal emitida. El objetivo que se persigue es deconvolucionar la onda para eliminar los efectos del medio sobre el pulso inicial, que se deforma durante su propagación. De esta forma se persigue transformar el radargrama de campo en un registro donde las señales representan únicamente la reflexión primaria. Se suele aplicar donde se ocasionan reflexiones múltiples. Las reflexiones múltiples son reverberaciones que se producen cuando en el interior del medio hay un elemento fuertemente reflector (como un metal). El ruido generado en este caso es elevado y puede ocultar totalmente la señal a partir del punto en el que se registra.

El georadar, según la mayoría de los investigadores que lo han utilizado, es una tecnología

“imperfecta”, en el sentido que son varias las interpretaciones que se pueden dar a los registros, y muchas incidencias pueden afectar su uso. En las mediciones en campo, por ejemplo en el caso de que se quiera actualizar el catastro de una red de abastecimiento, son muchas las causas que pueden causar ruido no deseado en la señal recibida. Si consideramos el caso de que las tuberías pasen cerca de cables metálicos también enterrados, las tuberías de abastecimiento o saneamiento que queremos detectar podrían ser ocultadas por las reflexiones múltiples provocadas por los cables. En este caso una deconvolución podría ser útil para una más fácil interpretación de los radargramas.

Considerando que la señal recibida no tiene la misma forma que el pulso emitido por efecto de los materiales en los que se ha propagado, es posible representar la señal registrada como una convolución entre la señal inicial y los efectos que el subsuelo induce sobre la misma, sumándole el ruido que puede contener el registro. Se puede expresar como (Vidal, 1995):

$$r(t) = p(t) * s(t) + n(t), \quad (39)$$

Donde $r(t)$ es la traza registrada, $p_i(t)$ es el pulso inicial emitido por la antena, $s(t)$ es la respuesta del terreno y $n(t)$ el ruido. El símbolo $*$ indica la convolución de las dos funciones adyacentes.

Si la onda emitida fuese efectivamente un impulso, la señal registrada (traza) representaría la respuesta del medio a dicho impulso. Sin embargo, la señal emitida no es un impulso ideal (una delta de Dirac). Por lo tanto, la onda registrada representa la convolución entre la onda emitida y la respuesta del terreno al impulso. Esta función comprende todas las reflexiones primarias y las múltiples sucesivas. Estos efectos de convolución hacen que un impulso que proviene de una reflexión simple que se propaga por el medio, se ensanche a la vez que su forma se complica. Cada traza del registro consiste en un impulso inicial estrecho que se va dispersando a medida que la onda se propaga por el medio, con la consiguiente disminución de la resolución vertical y la consiguiente adición de ruido, como es el caso de las reflexiones múltiples. El registro se complica conforme aumenta el tiempo de propagación.

Resumiendo, durante este procesado, lo que se hace es deconvolucionar la respuesta del terreno y la onda emitida, comprimiendo las componentes de ésta, eliminando las reflexiones múltiples y dejando únicamente las reflexiones primarias producidas en las discontinuidades del terreno. El resultado deseable de un proceso de deconvolución son señales de reflexión con la forma del impulso inicial, lo más sencillas posible y con la mínima duración que permitan las características de filtrado del suelo.

El tratamiento de deconvolución que se realiza en el procesado de los datos de georadar con el programa RADAN III de GSSI es el denominado *predictivo* (GSSI, 1990). La deconvolución predictiva es el método desarrollado por Peacock y Treitel (1969).

Como hemos visto, las reflexiones múltiples introducen información repetitiva en el registro oscureciendo la información procedente de zonas situadas a mayor profundidad que el reflector que las ocasiona. Al aplicar este filtro se considera que las reflexiones primarias no son predecibles, de forma que con él únicamente se eliminan las reflexiones múltiples. Para aplicar este tipo de procesado se requiere un modelo estadístico basado en la hipótesis de que las intensidades y los tiempos de llegada de los eventos portadores de información en una traza sísmica se pueden representar como series de puntos aleatorios.

Durante el diseño del filtro, antes de aplicarlo, se suele añadir un pequeño porcentaje de ruido blanco a la señal. Este proceso se conoce como “preblanqueado”. Cuando se ha diseñado el filtro se procede a la deconvolución predictiva de la señal. El proceso consiste en, dada la traza en un determinado tiempo “ t ”, predecir el valor de la misma en un tiempo “ $t+a$ ”, siendo “ a ” el denominado intervalo de predicción (“prediction lag”) (Robinson y Treitel, 1978; GSSI, 1990). El valor del parámetro “ a ”, que debe ser igual o similar al intervalo temporal entre las múltiples, determina la longitud deseada del impulso de salida del filtro.

Este tratamiento se aplica para una determinada longitud de tiempo de predicción, “ l ” (“*prediction length*”), que es el tiempo doble de propagación de la reflexión primaria, es decir, el tiempo que ha tardado la señal en alcanzar el reflector que provoca las múltiples y regresar hasta la antena receptora y que indica así mismo la longitud del filtro utilizado.

La selección de estos dos parámetros (a y l) debe realizarse cuidadosamente ya que normalmente se desconoce la forma del pulso no convolucionado. Hay que considerar también que al desconocimiento frecuente de la forma original del impulso transmitido se añade que la señal registrada normalmente contiene ruido que no puede despreciarse, sobre todo en el caso de medios complicados.

Por las razones que hemos explicado al inicio de este párrafo, se piensa que la deconvolución sea un tratamiento útil para el georadar en hidráulica urbana, considerando la presencia extensa en el subsuelo urbano de cables y tuberías de metal.

Con este objetivo se ha efectuado otro ensayo en laboratorio, donde en la misma caja utilizada para la simulación de fugas, se ha puesto una barra de metal encima de las tuberías de PVC, y se han procesado los radargramas en el PC. Los parámetros de deconvolución aplicados son los siguientes: $l = 16$ ns, $a = 5$ ns, un 2% de ruido blanco.

En ocasiones, y como hemos hecho en nuestro caso, se multiplica el resultado final por una ganancia porque las amplitudes de las trazas quedan fuertemente atenuadas tras el proceso de deconvolución.

Los resultados de la deconvolución se aprecian en las figuras siguientes.

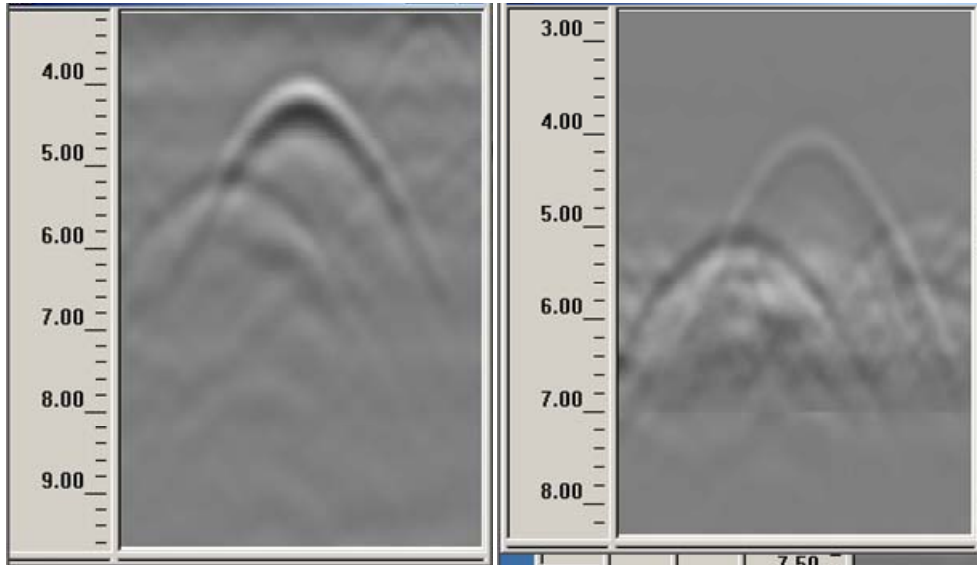


Figura 16. Deconvolución predictiva aplicadas a las dos tuberías de 110 mm y de 1" en laboratorio. Se puede apreciar en la figura a la derecha una mejor visualización de la tubería de 1"

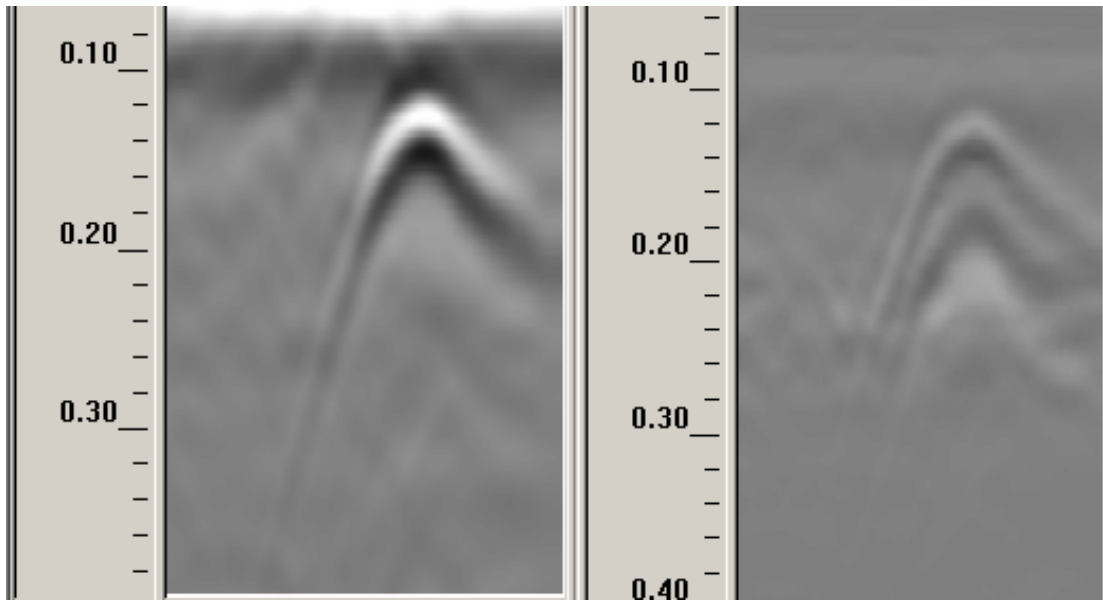


Figura 17. Deconvolución predictiva aplicadas a la tubería de 1"

3.5.2 Aplicación de la Transformada de Hilbert para evidenciar anomalías

Este procesado está basado en un procedimiento matemático que expresa la relación entre la parte real y la parte imaginaria de una señal, con el que puede obtenerse una envolvente de las amplitudes de los registros, la fase y la frecuencia instantánea. Estas últimas pueden utilizarse como indicadores del tipo de filtrado que sufre la señal durante su propagación por el medio, es decir, que proporciona información del comportamiento del medio frente a la señal electromagnética. La obtención de la envolvente de una traza proporciona información acerca de la amplitud instantánea de la señal y, por lo tanto, acerca de la energía implicada en cada evento. Con este procesado podemos mejorar la definición de la imagen de la anomalía.

Las amplitudes reflejadas y la geometría son las primeras informaciones utilizadas con el georadar para sacar informaciones interesantes. Los datos del radar en el dominio del tiempo están definidos en pulsos recibidos en el espacio tiempo-amplitud. Otra manera de definir los datos es transformar las señales en el dominio del tiempo en informaciones de frecuencias y fases. Las informaciones acerca de las fases son en general más sensibles a los cambios dieléctricos del subsuelo. La transformada de Hilbert descompone la señal radar representada como una serie temporal en su magnitud, fase instantánea o componentes instantáneos de frecuencia (*Eyuboglu, Mahdi y Al Shukri, 2004*). El uso de la transformada de Hilbert se debe a su capacidad de ofrecernos un registro más detallado.

Como hemos dicho, hay tres maneras diferentes de aplicar la transformada de Hilbert. En función de la magnitud nos proporciona una resolución mejor de la anomalía. En función de la fase podemos evidenciar la posición de inicio de cada anomalía identificando la forma y los cambios discretos de fase. Considerando la frecuencia podemos alcanzar nuevas informaciones con respecto a los distintos cambios en la frecuencia misma (*Patterson and Cook, 2002*).

Todas las tres tipologías de la transformada fueron aplicadas a los registros obtenidos con arena en la playa de la Malvarrosa y los resultados más significativos se ven en las figuras siguientes.

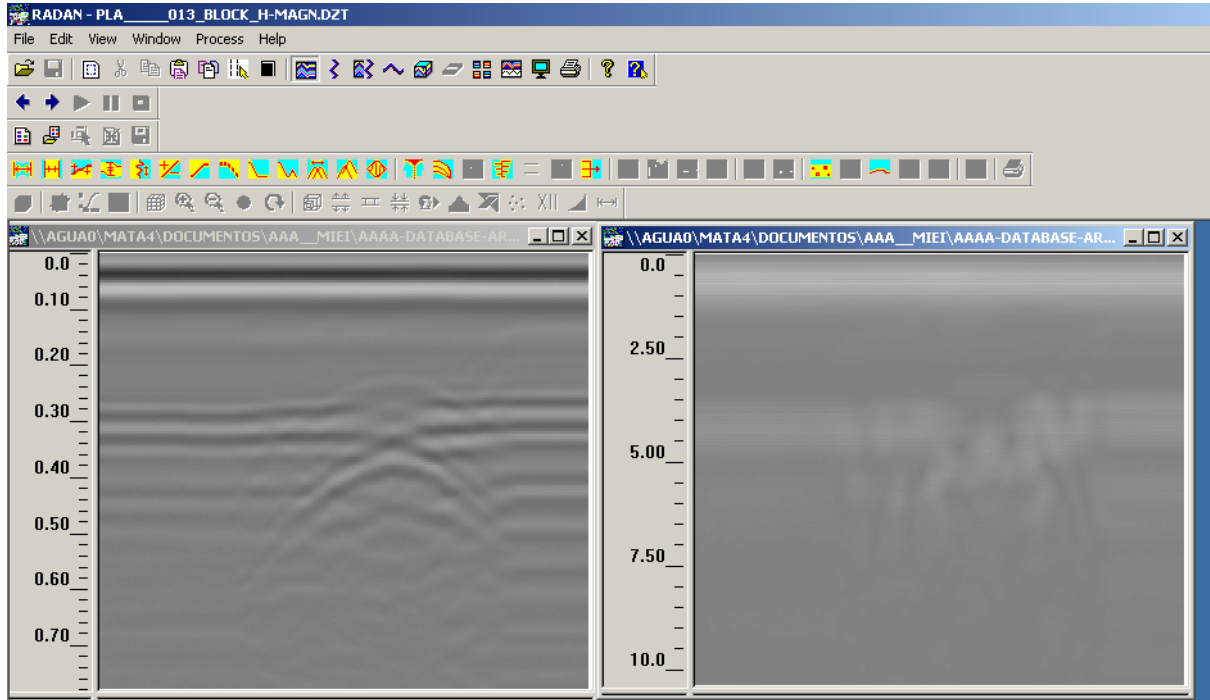


Figura 18. Transformada de Hilbert en función de la magnitud aplicada al ensayo con arena

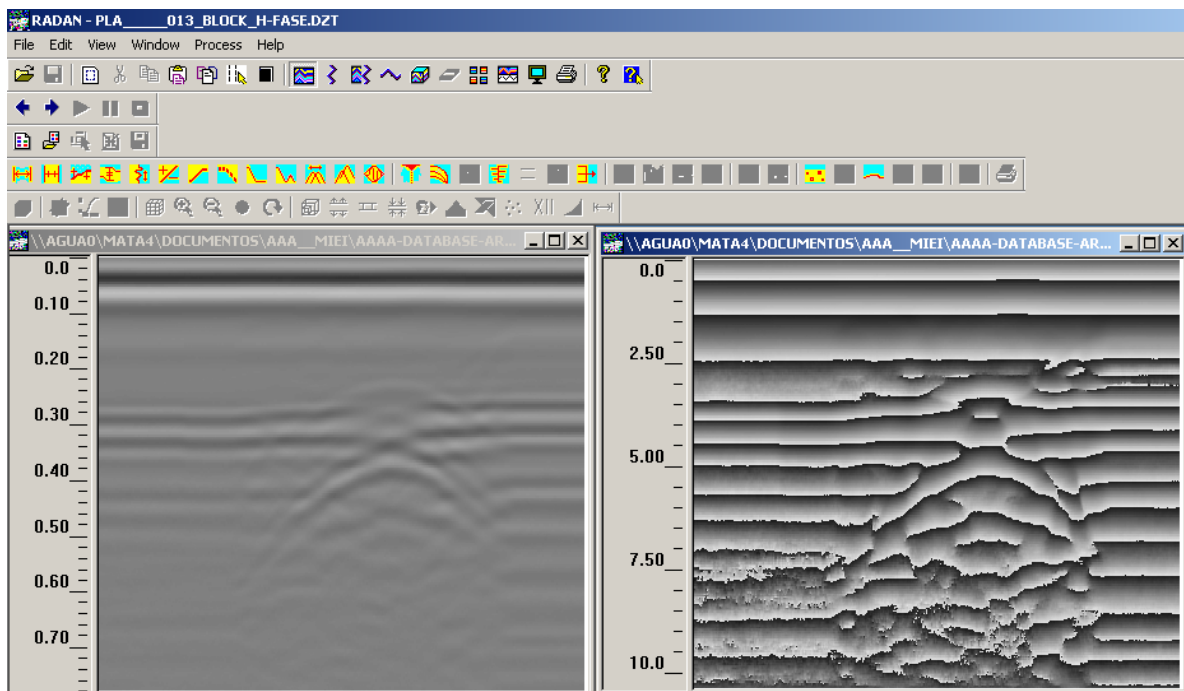


Figura 19. Transformada de Hilbert en función de la fase aplicada al ensayo con arena

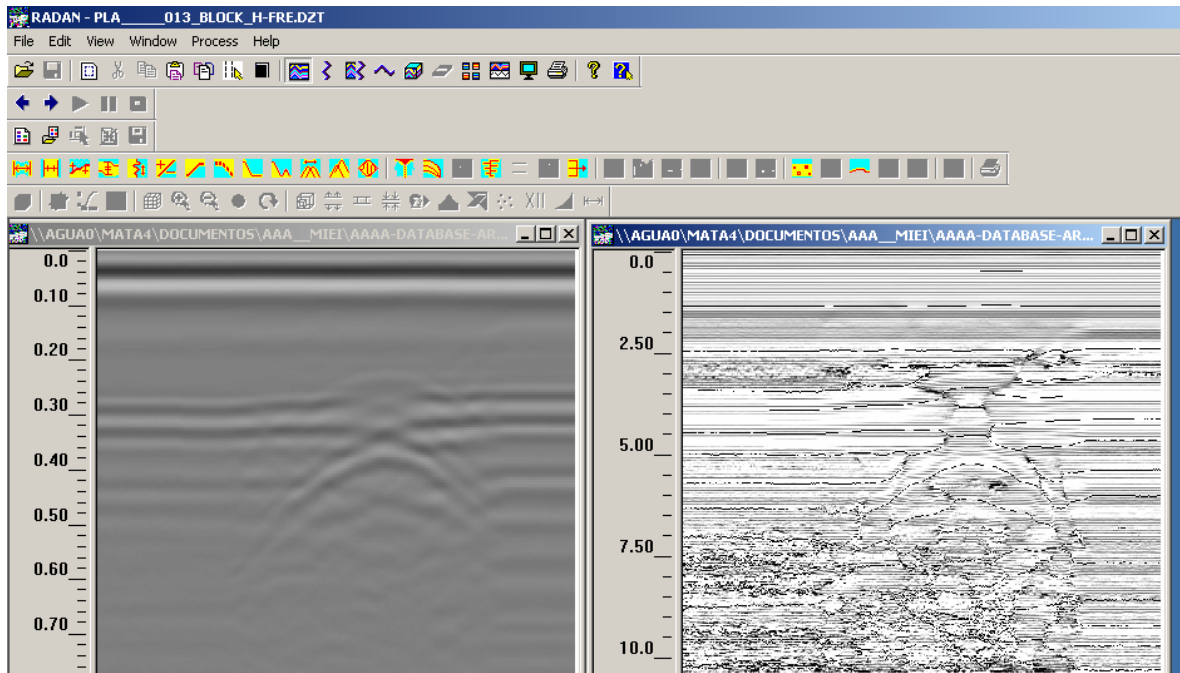


Figura 20. Transformada de Hilbert en función de la frecuencia aplicada al ensayo con arena

3.5.3 Otros tipos de tratamientos.

El RADAN 6.5 es un software muy manejable y fácil de utilizar. Además de los tratamientos explicados antes son varias las posibilidades que ofrece para mejorar la interpretación de los registros.

- Filtros frecuenciales horizontales o espaciales.

Se trata de un tratamiento que se aplica horizontalmente en el registro, es decir, en la dirección espacial. El objetivo que se persigue cuando se aplican estos filtros es la eliminación del ruido de fondo de un radargrama. Este ruido puede ser de alta frecuencia (se registra en pocas trazas seguidas), generado por ejemplo al deslizar la antena por un terreno irregular. También puede ser de baja frecuencia (que aparece en bastantes trazas consecutivas), ocasionado quizás por un reflector externo. Los filtros podrán ser pasa bajo o pasa alto. Los primeros consisten en un promediado de varias trazas consecutivas. La salida del filtro es la traza promedio resultante. Los segundos consisten también en un promediado de varias trazas consecutivas, pero la salida del filtro es el resultado de restar la traza promedio obtenida a la traza central.

- Filtros frecuenciales verticales o temporales. Son tratamientos que se aplican en la dirección vertical o temporal de los registros, sobre cada una de las trazas. Pueden utilizarse para realizar correcciones de línea base o para eliminar parte del ruido electrónico inherente a cada traza. Pueden ser también pasa alto o pasa bajo. Consisten en multiplicar

cada señal por un operador que vale la unidad en la banda de frecuencias que interesa conservar, y que tiende a cero en la banda de frecuencias que no interesa. Cuando se aplican estos filtros es conveniente realizar un estudio de frecuencias antes de la aplicación y después de la misma, para comprobar que se ha realizado correctamente y para evitar perder información que podría ser útil.

- Transformada de Fourier. Este tratamiento de datos, conocido ampliamente, consiste en un análisis frecuencial que permite el estudio de la evolución de los parámetros de la señal en función de la frecuencia. A menudo se utiliza para obtener los espectros de frecuencia de las trazas, para poder seleccionar mejor los filtros frecuenciales que se pueden aplicar o para comprobar los efectos que sobre las frecuencias ha tenido la aplicación de alguno de los mencionados filtros.
- Correcciones estáticas. Este tratamiento tiene como objetivo corregir los efectos que se producen sobre un registro a consecuencia de la topografía de la superficie o debido a variaciones bruscas de la velocidad en el medio.
- Ganancia. Ya hemos tenido ocasiones en este trabajo de hablar de la ganancia: se trata de la amplificación que se introduce a la señal en función del tiempo y de la profundidad. Esta amplificación no tiene por qué ser constante durante toda la longitud de la traza, pudiendo variar con el tiempo de propagación. Tiene por objeto amplificar eventos asociados con reflexiones profundas o poco energéticas, aumentando las amplitudes que, por su pequeño tamaño, no serían tenidas en cuenta durante la interpretación de los registros. Se utiliza para corregir, por así decirlo, los efectos de disminución de la energía producidos durante la propagación de la señal por el medio.
- Migración. Este procedimiento, que también llega al campo del radar de subsuelo a partir de los estudios sísmicos, tiene un doble alcance. Por un lado se utiliza para trasladar a su posición real los efectos de inclinación de las reflexiones registradas y por otro para colapsar las difracciones que se producen. Para utilizar este tratamiento se necesita estimar la velocidad promedio de propagación por el medio, pero puede conocerse a partir de las hipérbolas generadas en las difracciones. Consiste básicamente en calcular la ecuación de cada una de estas hipérbolas desplazando el reflector al vértice de la hipérbola. Como la ecuación de la hipérbola depende de la velocidad de propagación en el medio, un error en la determinación de este parámetro puede ocasionar que no se llegue a colapsar totalmente dicha hipérbola (la velocidad estimada es inferior a la real) o bien que se produzca el efecto conocido como sobremigrado (la velocidad estimada es superior a la real). Uno de los objetivos de este trabajo ha sido desarrollar una técnica sencilla pero robusta de localización de fugas. La idea ha sido proporcionar a los técnicos encargados una metodología con el menor número de tratamientos posteriores. En el caso de la migración

hay un problema adicional. Uno de los objetivos principales que nos proponemos es localizar puntualmente la fuga, y en un posible seguimiento de este trabajo, observar los movimientos de la mancha de agua. Cuando el perfil viene migrado, la forma de la anomalía viene cambiada, la señal se colapsa y solamente la posición del agua acumulada viene determinada. Pero, para nosotros resulta además importante averiguar los cambios en la superficie, así como ya hemos dicho su dirección de propagación.

En el caso del primer ensayo en laboratorio, con la tubería de 1", los registros nos han permitido desde el principio una fácil lectura. Con el RADAN-NT 6.5 ha sido suficiente aplicar un rango de ganancia adecuado para amplificar las discontinuidades detectadas; y en algunas ocasiones filtros pasa bajo de respuesta finita (FIR). De todas formas a título de ejemplo se ha aplicado una migración de la misma manera que hicieron *Eyuboglu-Mahdi-Al Shukri* en el 2004.

Como explicado antes, la propagación de la onda se irradia de forma cónica de manera tal que los objetos enterrados son detectados antes de pasar sobre su vertical. Como consecuencia de esto, los objetos de dimensiones finitas aparecen con una forma hiperbólica. En caso de registros complicados, por ejemplo donde los objetos detectados son numerosos, las reflexiones hiperbólicas superficiales pueden ocultar objetos situados más abajo, con el riesgo de perder información importante.

La migración es un tratamiento utilizado históricamente en los datos sísmicos y lo que hace es prácticamente colapsar las formas hiperbólicas de los objetos y mover las reflexiones profundas a su posición real. Esto es posible mediante el RADAN, especificando la velocidad de la onda a lo largo del registro y la dimensión de las hipérbolas interesadas. Hay dos tipos de migración que podemos aplicar: la suma hiperbólica y la migración de Kirchoff. La migración de suma hiperbólica es la tipología más sencilla y rápida. Se basa en considerar las hipérbolas que aparecen en los registros para desplazar el reflector al vértice de la hipérbola. Los datos requeridos son el número de trazas que se involucrarán en el proceso, y la velocidad promedio de propagación. Este último parámetro necesitaría de un cálculo matemático de regresión mediante el cual se obtendría la ecuación de la hipérbola y de allí poder estimar la velocidad promedio. En nuestro caso, visto las limitadas magnitudes del ensayo se han efectuado varias iteraciones cambiando los dos parámetros hasta encontrar las imágenes más satisfactorias. La migración de Kirkhoff es un método más preciso y se aplica cuando la suma hiperbólica no nos facilita los resultados esperados.

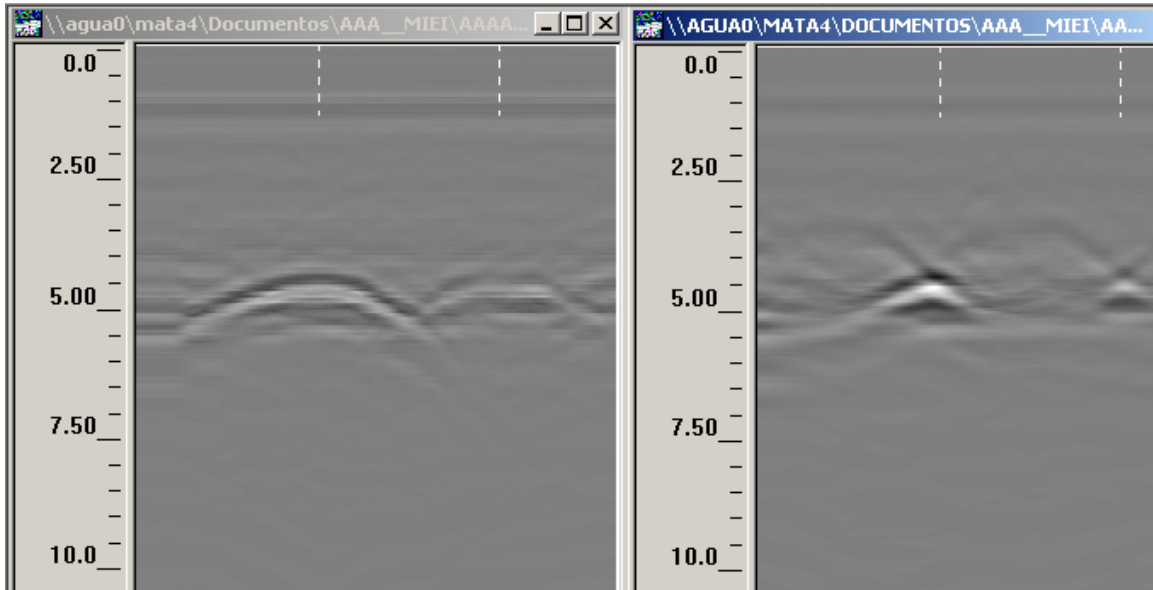


Figura 21. Migración de suma hiperbólica aplicadas a un perfil transversal. Las formas de las tuberías se acercan a su forma real

Se suele aplicar la migración como tratamiento previo a la transformada de Hilbert. Se recuerda que el uso de la transformada de Hilbert se debe a su capacidad de ofrecernos un registro más detallado. En la figura siguiente se evidencian los dos pasos efectuados a partir del registro sin tratamiento. En la figura central se ha aplicado la migración de suma hiperbólica y a la derecha la transformada de Hilbert.

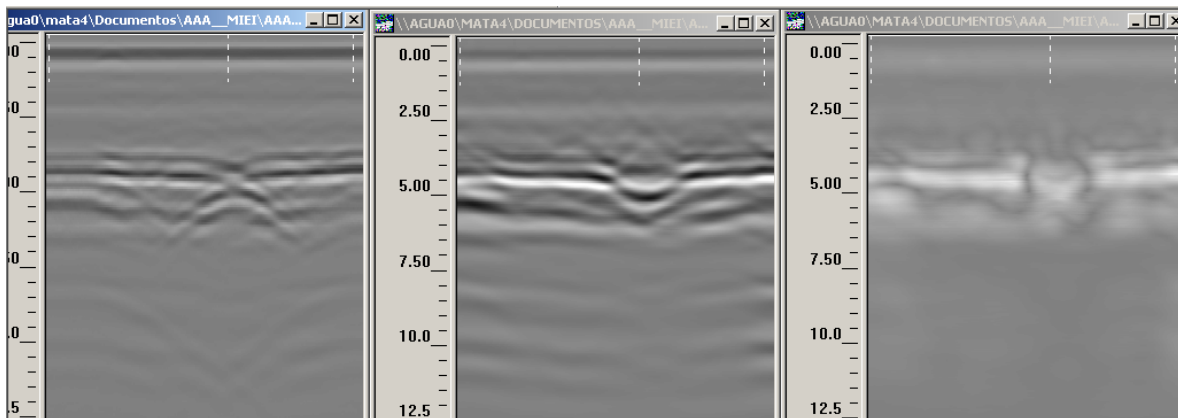


Figura 22. Perfil longitudinal de la tubería de 1" en caso de fuga (a la izquierda); el mismo perfil "migrado" (en el centro); y finalmente la aplicación de la transformada de Hilbert

3.5.4 Visualización en 3-D del subsuelo.

El estudio y el análisis de varios perfiles espacio-tiempo nos permite una visualización cómoda e intuitiva. La desventaja es que para el análisis de una superficie tenemos que analizarlas individualmente una a una para poder encontrar las informaciones requeridas. En algunos casos, una visualización en tres dimensiones puede ayudarnos a acelerar el trabajo y obtener una visión de conjunto en un tiempo limitado. El RADAN 6.5 nos permite la creación de vistas de planos en varias profundidades así como en diferentes perspectivas. Eventos pequeños difícilmente distinguibles en 2-D podrían ser encontrados y detectados mediante esta herramienta. Por ejemplo uno de los posibles futuros desarrollos podría ser la propagación de la mancha de agua fugada en función del tiempo. A continuación se muestran las figuras, relativas al primer ensayo en laboratorio, elaboradas con el RADAN para poder obtener imágenes en 3-D.

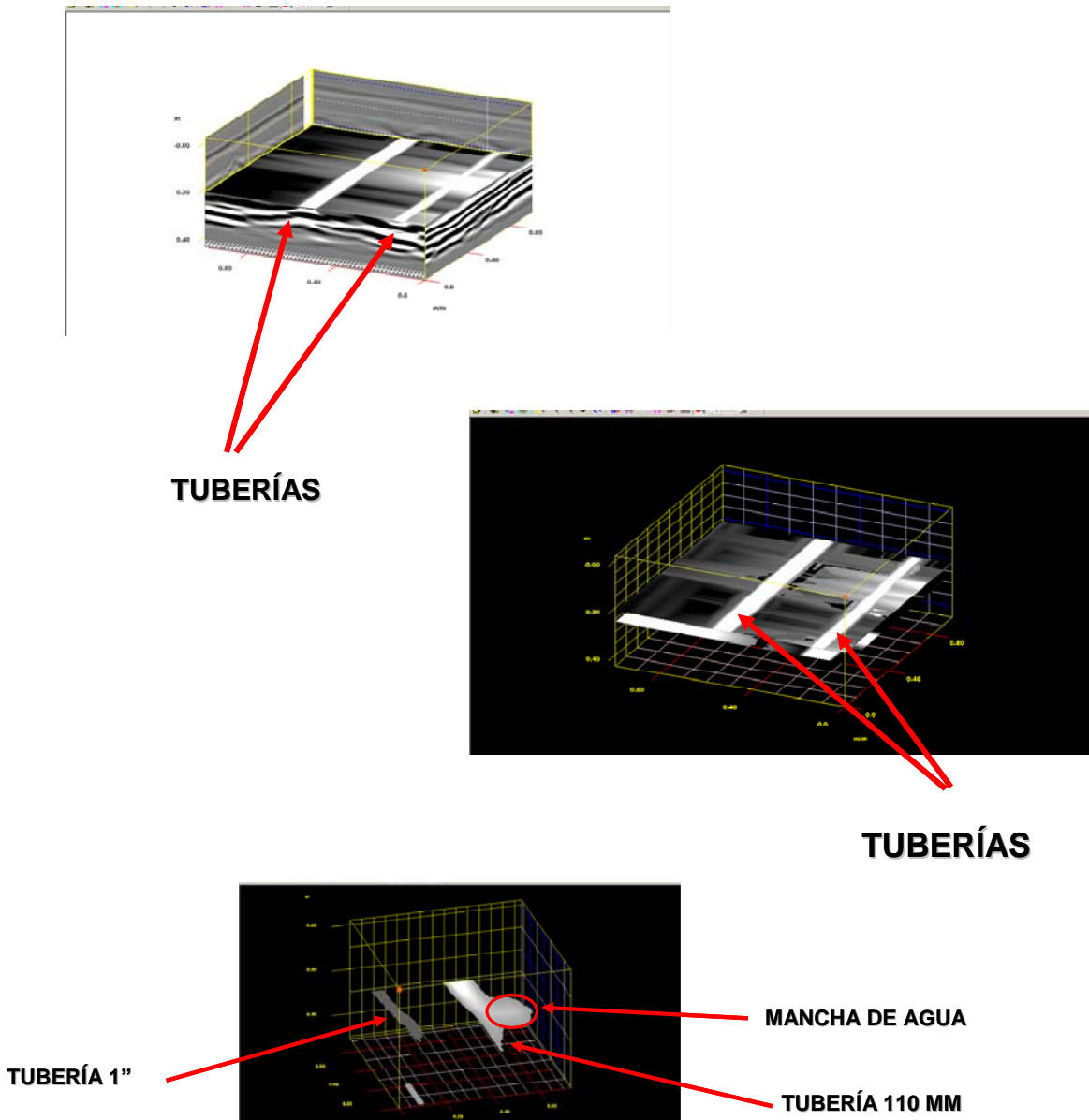


Figura 23. Ejemplos de las posibilidades del RADAN 6.5 en 3-D

3.6 Aplicación a un caso de estudio

Para finalizar este capítulo se presenta la descripción de un caso concreto de localización de fugas que se realizó por el equipo del CMMF de la UPV.

3.6.1 Introducción

El trabajo explicado a continuación cabe dentro de ensayos útiles a la comprobación que una tubería de la red general de abastecimiento de agua potable de una ciudad de la Comunidad Valenciana, correspondiente a una tubería de diámetro 500 mm de material de fundición dúctil, cumpla las exigencias funcionales para que haya sido diseñada y instalada.

Para ello se ha realizado una prueba de “presión interior” y una “prueba de estanqueidad”, desarrolladas en el Pliego de Inscripciones Técnicas generales para tuberías de abastecimiento de agua del Ministerio de Obras Publicas de 1974.

Las dos pruebas han dado resultados negativos por lo tanto se piensa que exista una posible fuga de agua. El tramo interesado es largo, de poco menos de 340 metros a lo largo de una calle céntrica, en una ciudad de la Comunidad Valenciana.

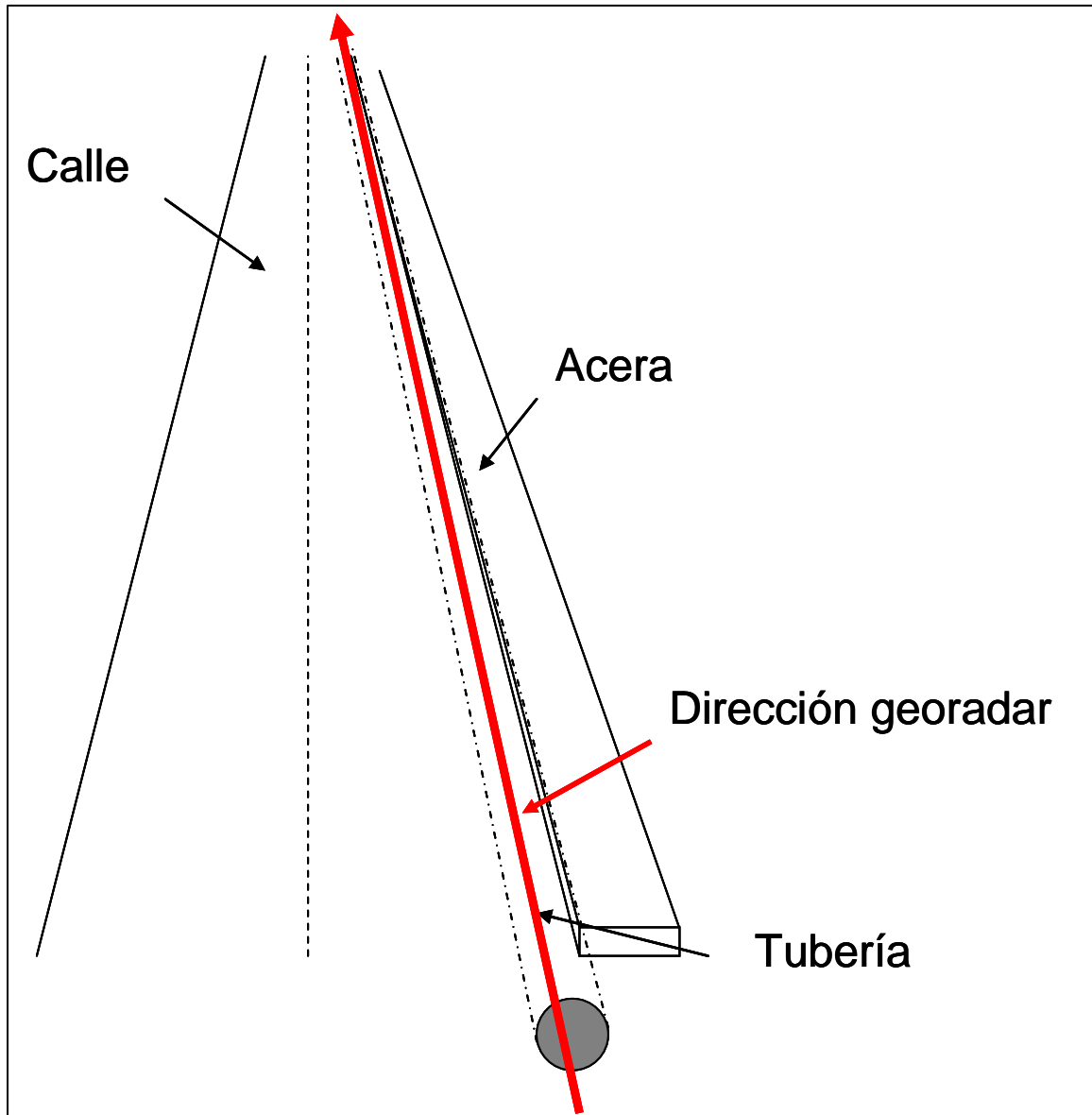


Figura 24. Esquema grafico de la aplicación de la técnica radar a un caso de estudio

El uso de prelocalizadores y correladores no lograron localizar con precisión un punto exacto de fuga. Los *spreads* de los aparatos acústicos prelocalizadores resultaron ser bastante amplios para poder ubicar con certidumbre el punto (o los puntos) de fuga. El pico proporcionado por el

correlador tampoco permitió restringir la zona de búsqueda aunque se identificaron los primeros 20 metros como la zona más probable.

Con esta premisa se ha decidido proceder a la prospección del subsuelo mediante georadar, con el objetivo de detectar las anomalías producidas por la mezcla suelo-agua debido a la fuga (o fugas). Además, se ha realizado un estudio más detallado en el tramo identificado mediante el correlador.

Se han realizado dos distintas campañas de campo dirigidas a restringir el número de las singularidades electromagnéticas detectadas.

3.6.2 Primera campaña de mediciones: descripción y metodología de trabajo

Objeto del estudio es una tubería de fundición de 500 mm. La tubería está rodeada por una cama de gravas de unos 10 cm. Por encima de este recubrimiento hay una capa de hormigón H-200 de 40 cm. Tras la primera capa de hormigón hay una segunda capa de hormigón H-300 con fibra metálica de 25 cm. Por encima hay unos 4 cm de arena y en cota de acabado hay adoquín de 12 cm. La sección está compuesta por drenaje, tubería Fdc 500 mm, un tritubo y 6 tubos pasa cables en dos filas de tres.

Para las mediciones efectuadas se ha dividido el recorrido de 336 m de la tubería de FDC en 14 tramos de 24 metros cada uno, con algunas excepciones debidas a obstáculos físicos (ver anexo 1). Los perfiles longitudinales se han realizado en la parte central de la calle (al borde derecho cerca de la acera) y en la acera misma (borde izquierdo). Se han tomado algunos perfiles transversales y en alguna ocasión se ha procedido a crear mallas para la simulación en 3D.

Las condiciones del entorno físico no han sido precisamente las mejores desde el punto de vista del georadar, sobre todo por la presencia de un mallazo metálico en la segunda capa de hormigón. Los elementos metálicos provocan una atenuación fuerte de la señal, y la mezcla con el hormigón nos proporciona una serie de hipérbolas una al lado de otra que son bien visibles en el radargrama siguiente.

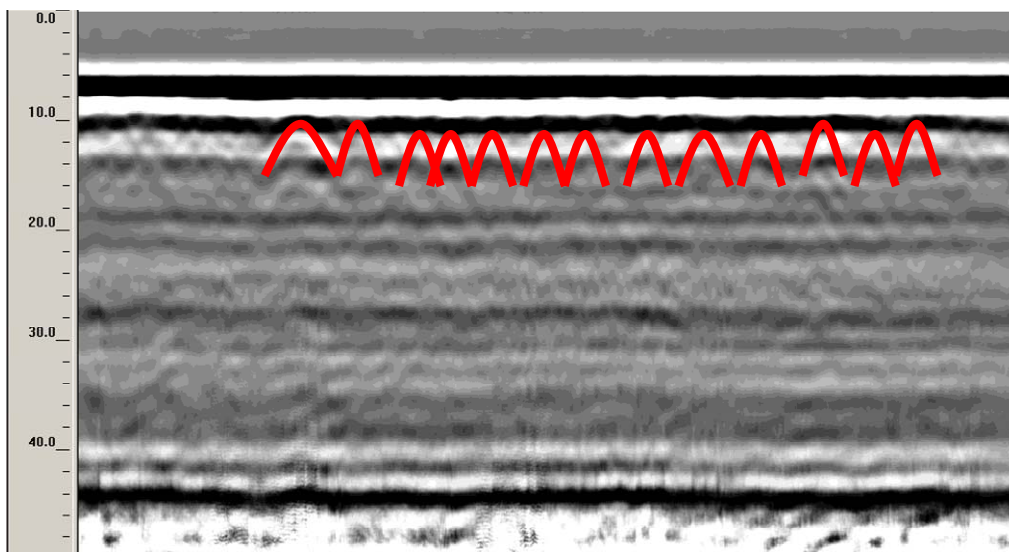


Figura 25. Efecto de la fibra metálica en la segunda capa de hormigón en la señal

Durante las mediciones en campo se ha anotado cuidadosamente cualquier anomalía o discontinuidad electromagnética visualizada en los radargramas. Para cada tramo se ha obtenido un fichero que ha sido elaborado, tratado y analizado con el ordenador, utilizando un programa útil para evidenciar todas las informaciones que nos pudieran ser útiles para nuestro fin. En el párrafo siguiente vamos a analizar cada singularidad detectada.

Puntos singulares detectados

- Borde de la calle.

La primera anomalía detectada, y de todas la más evidente y nítida ya directamente en esta primera campaña, se ha encontrado en el tramo #2. Las reflexiones producidas han sido muy energéticas. Recordamos que más grande es el contraste dieléctrico entre dos elementos o dos capas adyacentes en el subsuelo, más grande será la cantidad de energía reflejada. La energía reflejada se suele medir en amplitudes relativas (con respecto a la primera reflexión obtenida, llamada onda directa), y se suele asignar a cada rango de amplitud un color diferente o una diferente gradación de gris.

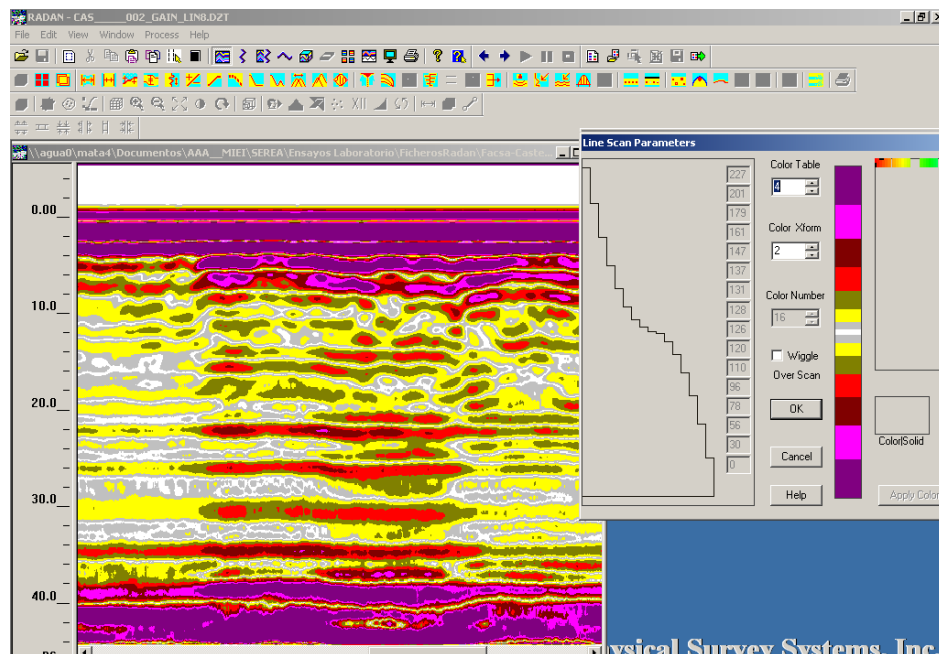


Figura 26. Anomalía en el tramo #2 relativa a la primera campaña de mediciones

En el radargrama anterior se aprecian las capas en rojo que han provocado las reflexiones más energéticas. Esta anomalía es muy evidente aunque no podemos decir que tiene las características típicas de una anomalía provocada por una fuga. Llama la atención la regularidad de la anomalía que se compone de varias capas una encima de la otra. A una primera vista es más probable que sea ocasionada por una diferente compactación del terreno.

En el tramo #4 tras aplicar una ganancia lineal a todo el registro utilizando el software RADAN 6.5, se ha evidenciado otra anomalía que esta vez utilizando trabajos anteriores sí se puede asociar a la firma digital propia de una fuga, aunque las dimensiones en juego no son muy grandes.

En las figuras siguientes se muestra antes la parte del registro que contiene la anomalía en el tramo #4, y luego una comparación entre la misma anomalía y un radargrama correspondiente a un trabajo de laboratorio, donde se simularon fugas, llevado a cabo por el “*Department of Applied Science University of Arkansas at Little Rock*”, en el 2004.

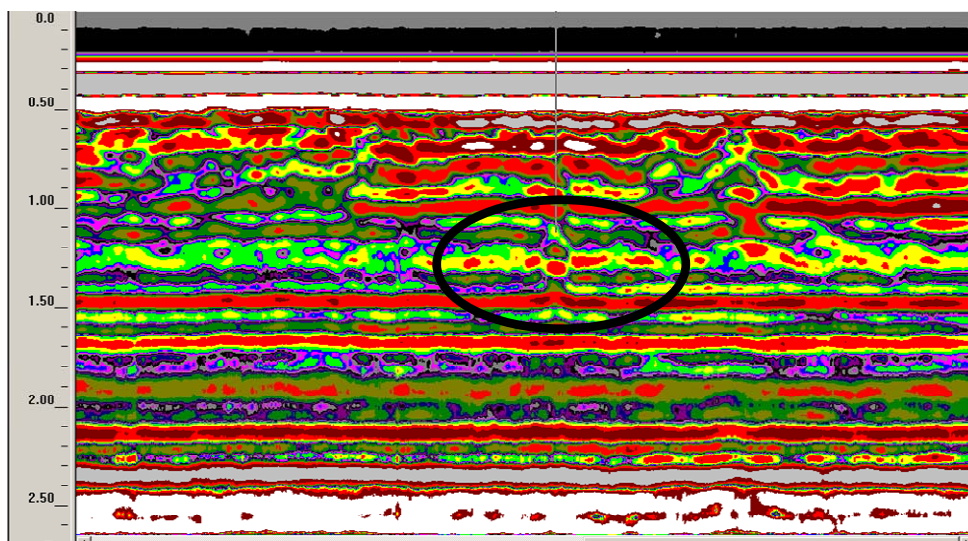


Figura 27. Anomalía en el tramo #4 relativa a la primera campaña de mediciones

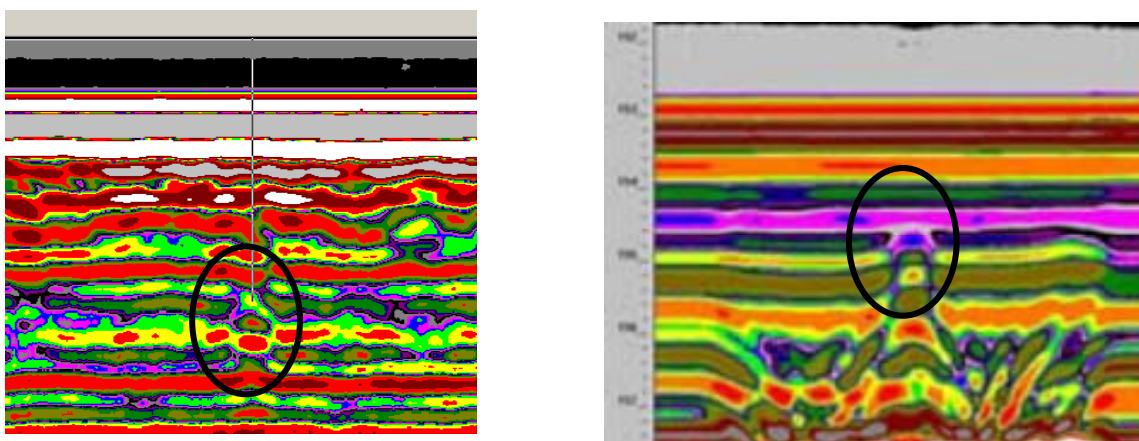


Figura 28. Comparación entre la anomalía en el tramo 4 y otro ensayo de laboratorio realizado por Eyugoblu et al

Por otra parte se ha querido focalizar nuestra atención en el punto indicado por el correlador como posible lugar de la pérdida, y con el aparato radar no se detectó nada de

verdaderamente destacable. Pero, en el mismo tramo se detectó una anomalía de dimensiones reducidas que mostramos en la figura siguiente.

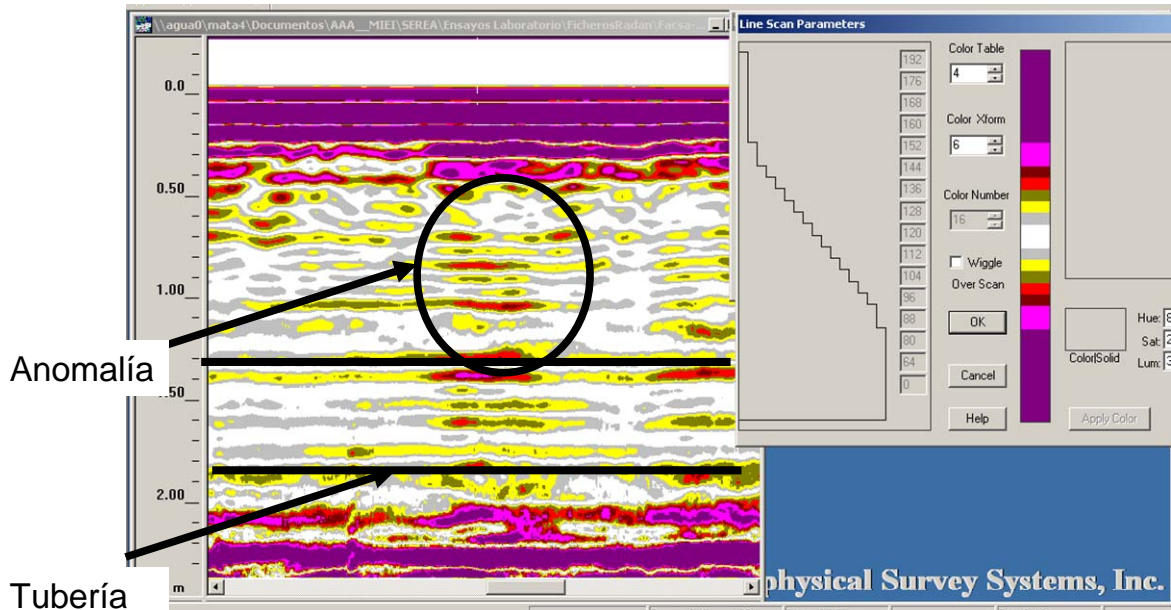


Figura 29. Anomalía en el tramo #1 relativa a la primera campaña de mediciones, cerca del punto localizado por el correlador

- Acera.

La primera anomalía detectada en la acera se muestra en el radargrama siguiente y se encuentra en el tramo #5. La forma de la misma parece ser debida a un cambio brusco de las velocidades de propagación de la onda. Esto podría ser entonces bien una fuga bien una diferente compactación del terreno. Se sugieren en este caso más ensayos.

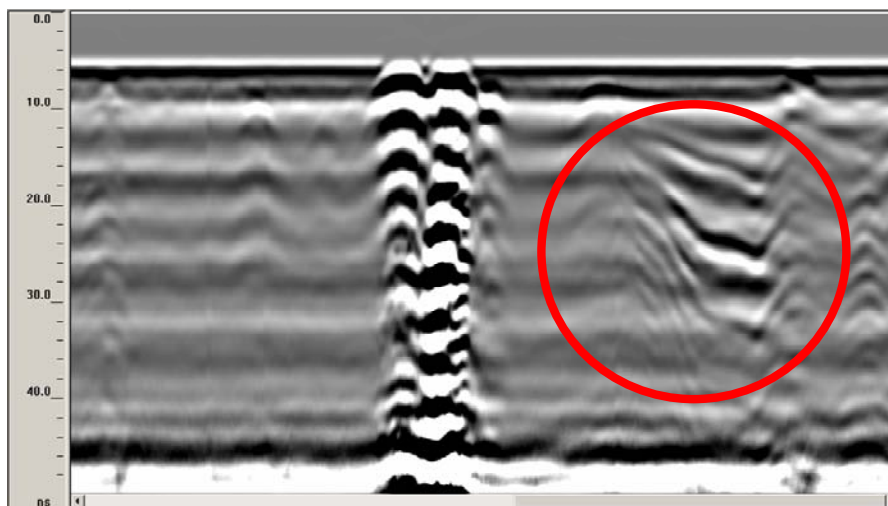


Figura 30. Anomalía en el tramo #5 (acera) relativa a la primera campaña de mediciones

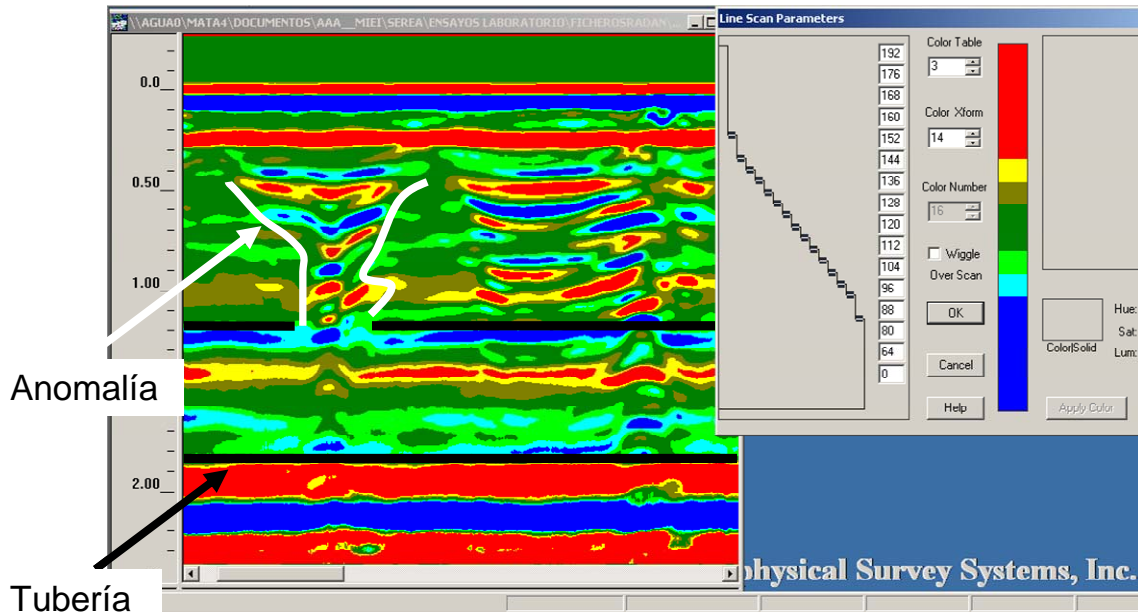


Figura 31. Primera anomalía en el tramo #7 (acera) en la primera campaña de mediciones

En la figura 31 se muestra el análisis de la anomalía detectada en el tramo #7, que presenta unas analogías con la anomalía del tramo #4. La discontinuidad se expande conforme nos alejamos de la tubería y esto deja pensar a un flujo de agua que se expande hacia la superficie.

A lado de esta anomalía se tiene otra discontinuidad muy parecida a la del tramo #2 (fig. 32), donde varias capas de características electromagnéticas diferentes del otro material alrededor se sobrepone el una con la otra.

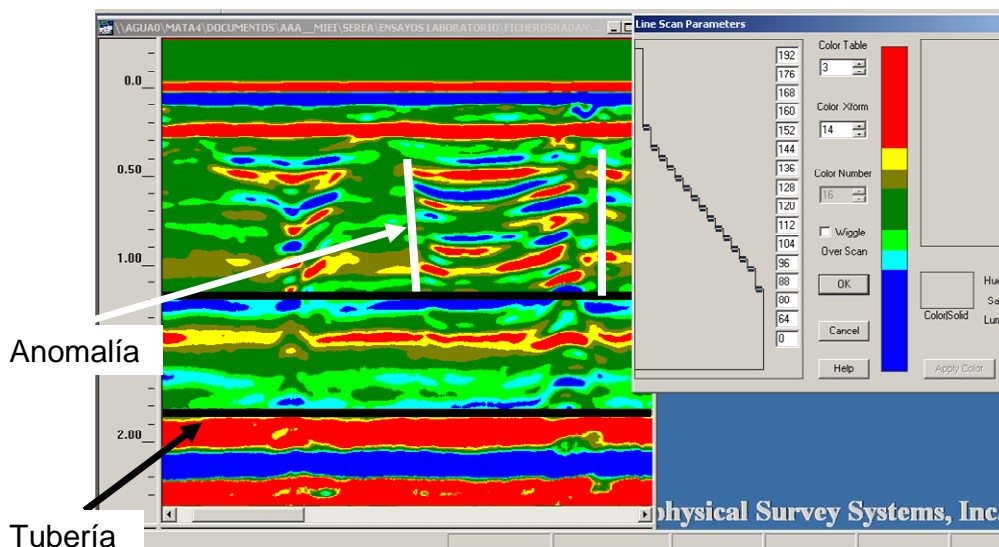


Figura 32. Segunda anomalía en el tramo #7 (acera) en la primera campaña de mediciones

La última discontinuidad detectada en las mediciones del recorrido a lo largo del acera se ha encontrado en el tramo #8 (fig. 33).

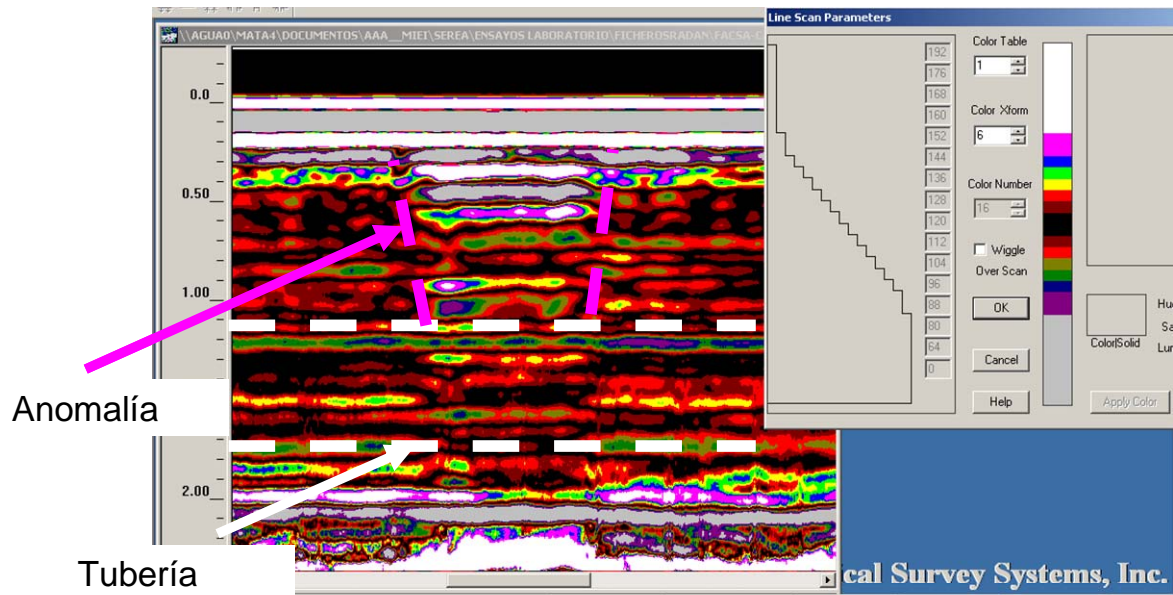


Figura 33. Anomalía en el tramo #8 (acera) relativa a la primera campaña de mediciones

Se ha observado un caso parecido a las anomalías del tramo #2 y la segunda del tramo #7, con una forma más o menos regular y presente en varias capas. En este caso, consideradas también las observaciones directamente en campo (es presente una arqueta de la red de saneamiento a la misma altura), se piensa que sea algo relacionado con la red de evacuación de aguas.

3.6.3 Resultados y conclusiones de la primera campaña

Resumiendo se ponen en una tabla las discontinuidades detectadas con sus características principales. Es importante evidenciar otra vez que las condiciones del entorno de trabajo no han sido las mejores desde el punto de vista del georadar. La presencia ya mencionada de mallazo metálico en la segunda capa ha contribuido a atenuar la señal de manera evidente. Además todos los registros han resultado ser muy ruidosos (la mayoría de las veces ha sido ruido de alta frecuencia). También considerando el hecho de que la calle interesada es una calle céntrica muy frecuentada, se han encontrado con varios obstáculos físicos que hay que considerar a la hora de la interpretación de los datos.

Tramo	Dist. en el tramo	Tipo de anomalía	Observaciones
1	12-14 m	Anomalía débil no muy energética. Forma irregular	Podría representar una fuga. Necesario postprocesamiento
2	15 m	Capas regulares una encima de la otra	No muy típica de fugas de agua. Detectada en campo.
4	19 m	Anomalía no muy fuerte. Forma irregular que es expande hacia la superficie	Típica discontinuidad que representa una fuga. Necesario post procesamiento
5	21 m	Cambio brusco lateral de la velocidad de la onda.	Puede ser una diferente compactación del terreno. También una tubería encontrada mediante un perfil desviado (no transversal). Detectada en campo.
7	2 m	Parecida a la anomalía del tramo #4.	Necesario postratamiento para su detección.
7'	4 m	Forma similar a la del tramo #2.	Detectada directamente en campo.
8	10.5 m	Igual que el tramo #2 y 7'	Detectada directamente en campo. Probablemente directamente relacionada con el sistema de abastecimiento.

Tabla 7. Resumen de las anomalías detectadas en la primera campaña de mediciones de la aplicación a un caso real de la técnica del georadar

Finalmente el tramo total objeto de mediciones ha sido demasiado largo por el uso que se suele hacer habitualmente con el georadar.

No obstante se han identificado varias discontinuidades en el subsuelo, y en diferente medidas podemos asociarle una cierta probabilidad de que representen una fuga de agua. En el trozo del tramo #1, el lugar indicado por el correlador, el georadar no ha detectado en la primera campaña ninguna discontinuidad significativa.

De todos modos, como conclusión, se pueden indicar como puntos más probables de fuga, según lo que ha proporcionado el nuestro georadar, el punto en el tramo #4, y en el tramo #7

antes de todos; a seguir en el punto en el tramo #2 se ha encontrado la discontinuidad más vistosa aunque no tiene las características de la típica firma digital de una fuga. De todos modos en este caso se recomiendan más ensayos. Se puede comentar lo mismo para el tramo #5, que también ha proporcionado una discontinuidad muy nítida directamente en campo. El punto en el tramo #1 aunque resulta poco energético merecería también de más ensayos. Se pueden calificar como puntos menos interesantes, la segunda anomalía en el tramo #7 y la única del tramo #8.

Para un trabajo más completo se ha pensado oportuno llevar a cabo ensayos más detallados, sobre todo en las anomalías individuadas como más energéticas, o que tengan una forma sospechosa. Otra posibilidad habría podido ser la de utilizar una antena a mayor resolución (frecuencia más alta), por ejemplo con una frecuencia central de 900 MHz frente a la de 400 MHz que se ha utilizado en este primer ciclo de mediciones. Pero al final se decidió de utilizar la misma antena de la primera campaña.

3.6.4 Segunda campaña de mediciones

En la primera campaña con los resultados proporcionados por el georadar se han obtenido en un primer momento nueve anomalías en total (siete en un primer ciclo de procesamiento y otras dos en un segundo ciclo, ver tabla siguiente). A título de ulterior comprobación y estudios de las anomalías se ha procedido a otras mediciones de campo miradas específicamente a profundizar estos puntos críticos.

Hay que evidenciar la importancia de los estudios posteriores al primer ciclo de mediciones que se han efectuado con el ordenador. Mediante el software RADAN ha sido posible trabajar los ficheros y analizar con más precisión la tubería, obteniendo un valor más cercano al real de la constante dieléctrica (igual a 12), de la cual dependen en los radargramas las diferentes profundidades de los objetos detectados. Hay que considerar que en estos radargramas se trabaja en un campo espacio-tiempo, y el tiempo depende de las velocidades que las ondas electromagnéticas tardan en ir y volver desde las anomalías. A su vez la velocidad y la constante dieléctrica ϵ son relacionados mediante la expresión (4).

Además, mediante una correcta obtención de la constante dieléctrica se ha podido regular una ganancia (amplificación de la señal en función de la profundidad) más apta para el trabajo en cuestión. Los resultados visualizados han sido consecuentemente más satisfactorios para los objetivos propuestos.

A seguir se muestran dos tablas que resumen las discontinuidades electromagnéticas detectadas a lo largo de la tubería de FDC.

TRAMO	DISTANCIA	CALLE/ACERA	NOTAS
4	19 m	calle	Típica anomalía de fuga
7 y 7'	Entre 2 - 4 m	acera	Dos anomalías muy cerca
2	15 m	calle	Anomalía muy energética
5	21 m	acera	Anomalía muy energética
1	Primeros metros	calle	Anomalía poco energética
8	Entre 10 y 11 m	acera	Probable tubería de evacuación

TRAMO	DISTANCIA	CALLE/ACERA	NOTAS
11	16 m	calle	Típica anomalía de fuga, más energética que la del tramo 4
9	6 - 7 m	acera	Bastante vistosa

Tabla 8. Resumen de las anomalías detectadas en la segunda campaña de mediciones de la aplicación a un caso real de la técnica del georadar

La segunda campaña de mediciones, a distancia de un mes de la primera, ha sido dirigida a profundizar y analizar con más detalle las anomalías detectadas anteriormente. Se ha focalizado la atención principalmente en tres tramos “críticos” a partir de los 14 totales que componen la tubería de FDC objeto del estudio: el tramo 1; el tramo 4; y el tramo 2 (en orden de preferencia). En otro momento y en el caso de que la fuga no se encuentre en los tramos citados se indicaran las otras singularidades que podrían ser relacionadas con la fuga (o fugas, en el caso de que sean presentes más que una, ver conclusiones).

a. Tramo #1

El tramo #1 por el número de irregularidades detectadas y por sus características representa el tramo más probable donde se pueda encontrar la pérdida de líquido. En efecto son 3 los puntos a lo largo de la tubería donde el georadar ha proporcionado una respuesta a los pulsos electromagnéticos que se puede definir “sospechosa”.

El punto más evidente y con los contornos más definidos se sitúa al inicio del tramo mismo (unos 2 metros).

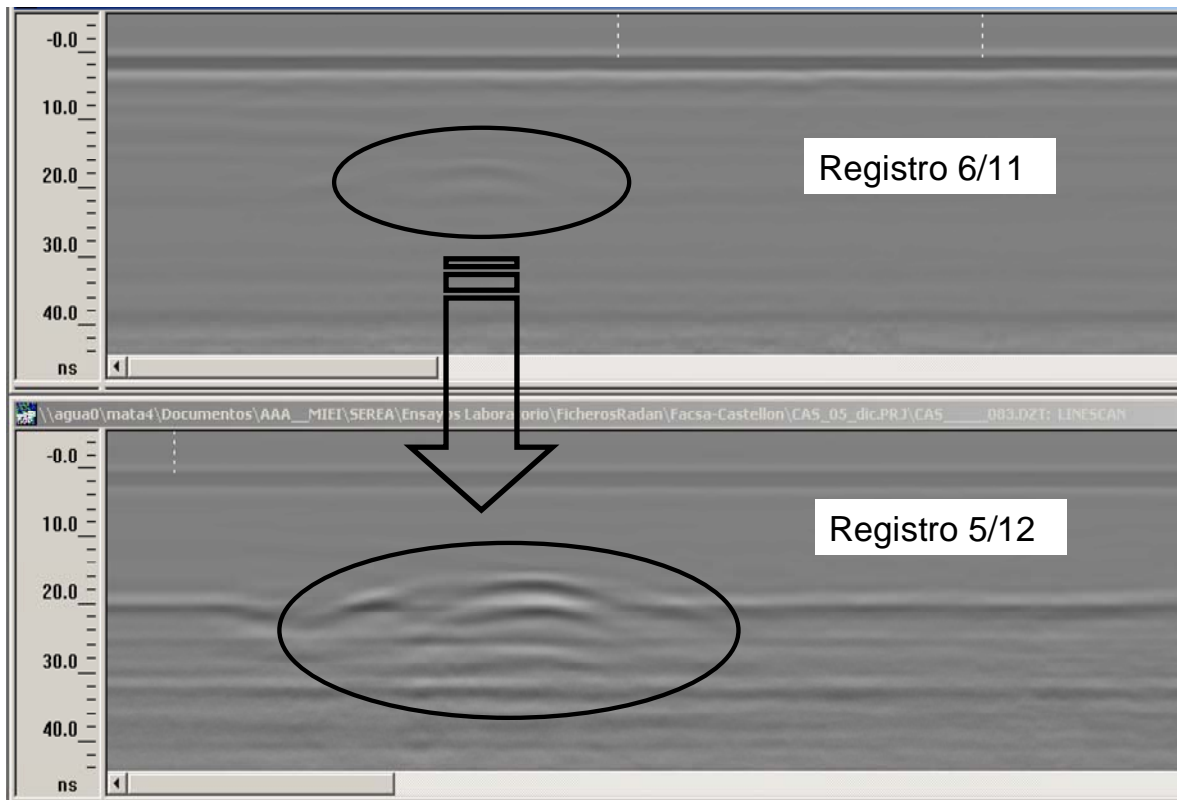


Figura 34. Anomalía en el tramo #1 (calle): comparación entre los registros relativos a las dos campañas de mediciones.

En el registro relativo a la primera campaña la anomalía, probablemente por el mal ajuste de la ganancia, resulta ser poco visible. Por otro lado en el registro sucesivo la anomalía aparece de manera evidente con todas las características de una posible fuga. Su posición, al inicio de la calle, hace pensar que pueda ser en correspondencia del codo (o de la junta) mediante la cual la tubería se conecta a un pequeño tramo en diagonal.

Se ha analizado con más detalle la situación en el punto indicado por el correlador como posible punto de la fuga. En el primero y en el segundo ciclo de mediciones no se ha detectado nada de destacable en el momento mismo del ensayo (en vivo). Por otra parte a la hora de procesar el segundo ciclo de registros se ha evidenciado una anomalía que deja abierta esta posibilidad.

El interés no radica tanto en la entidad de energía que presenta la anomalía en sí misma, sino en los elementos detectados en los alrededores, como se puede notar en las figuras siguientes.

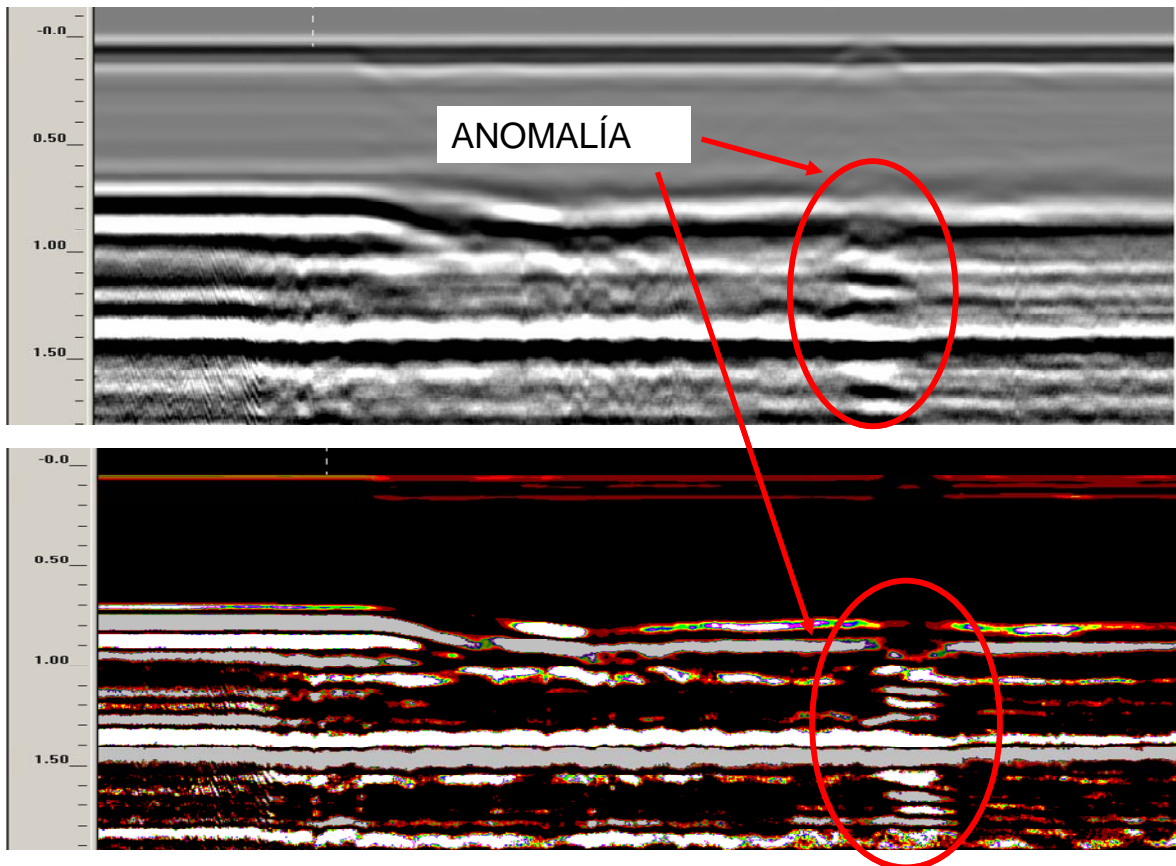


Figura 35. Anomalía en el tramo #1 (calle) en correspondencia del punto localizado por el correlador: comparación entre los registros relativos a las dos campañas de mediciones.

Estos elementos son parecidos a hipérbolas irregulares que se encuentran en una profundidad superior a la tubería. Esto, en varias ocasiones, es una prueba de la presencia de una fuga como se puede comprobar en la figura siguiente, donde se compara nuestro registro con otro encontrado en la literatura específica.

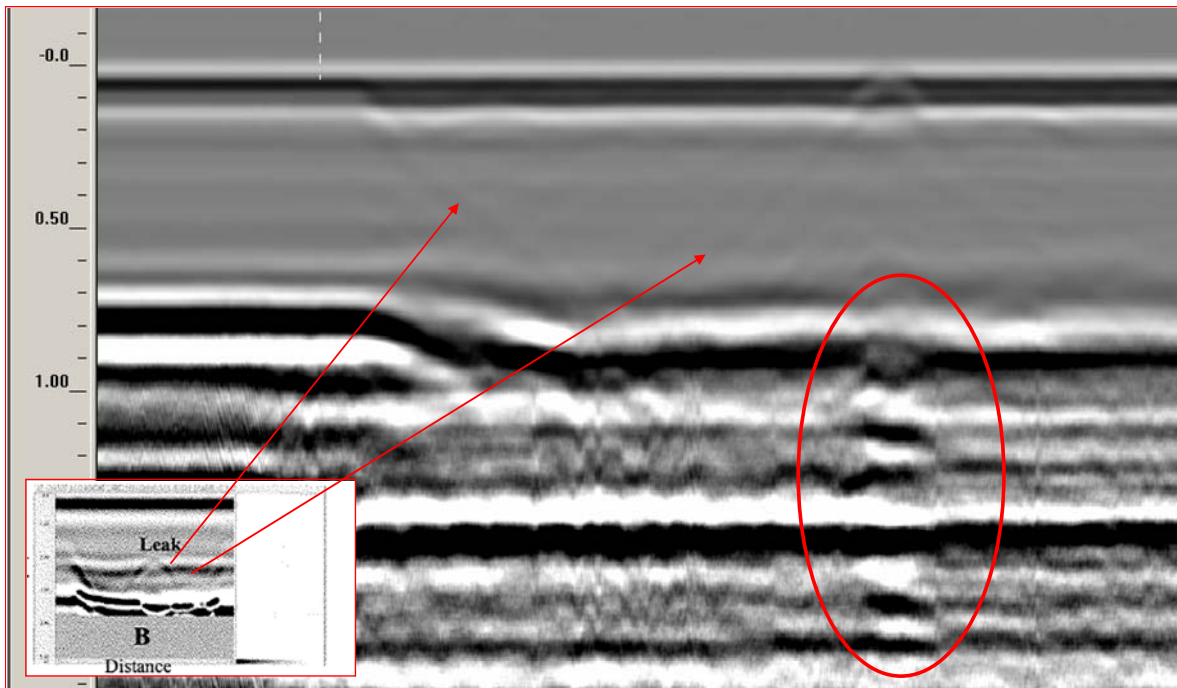


Figura 36. Fenómeno de hipérbolas características en el registro de laboratorio realizado por Eyuboglu et al. y comparación con registro relativo a la anomalía en el tramo #1.

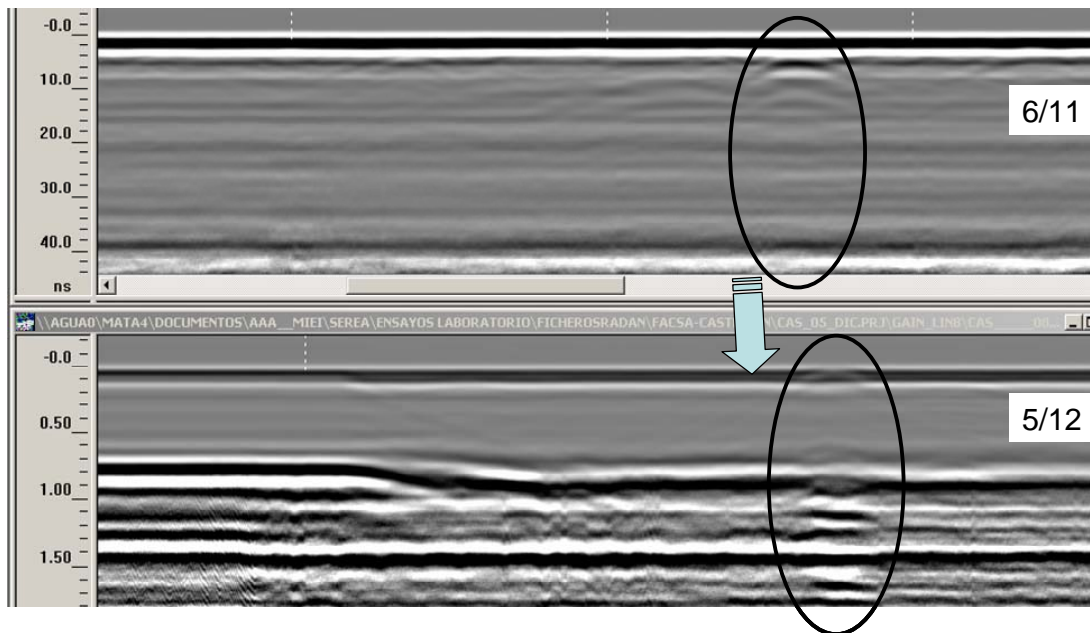


Figura 37. Otra anomalía en el tramo #1 relativa a la segunda campaña de mediciones

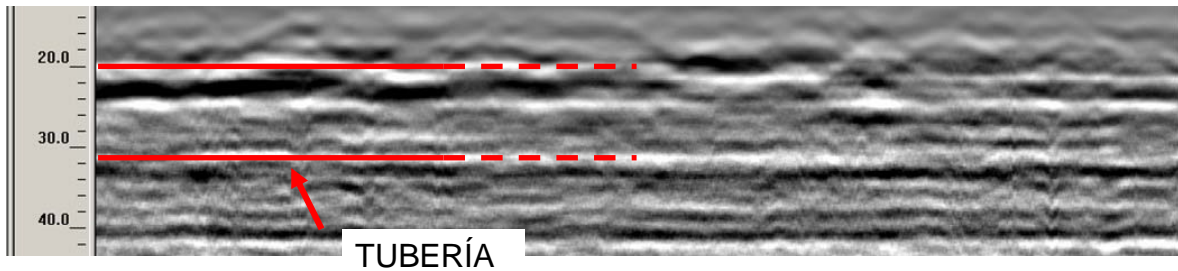


Figura 38. Fuertes efectos distorsionantes en correspondencia de la visualización de la tubería

En el mismo tramo hay algo más que merece la pena evidenciar, y que deja constancia del hecho que este sea el más indicado en contener en su interior una fuga (o fugas): son las fuertes distorsiones que impiden desde un cierto punto la visualización de los espesores inferior y superior (sobre todo) de la tubería que hasta entonces habían sido muy claras (*Fig. 38*). Estas, pueden ser debidas a la presencia difusa de agua que provoca disturbios a la señal en todo el espesor interesado. Estas distorsiones empiezan poco después del punto detectado por el correlador, y representan una prueba más hacia ese punto a la hora de decidir donde hacer catas.

b. Tramo #2

La tubería en el tramo #2 ha sido visualizada con una cierta regularidad por el georadar excepto por una fuerte anomalía que ya había sido detectada en la primera campaña de mediciones. Ha sido entonces la anomalía más energética, mientras en la última campaña ha sido a un nivel comparable con las otras dos. Merecería tenerla en cuenta en el caso de que la fuga no sea localizada ni en el primer tramo ni en el cuarto. A seguir se muestra una comparación de los dos registros a distancia de un mes el uno del otro y relativos a la anomalía, donde se puede ver como ha evolucionado la misma y una imagen en 3-D que nos ofrece una visualización más completa.

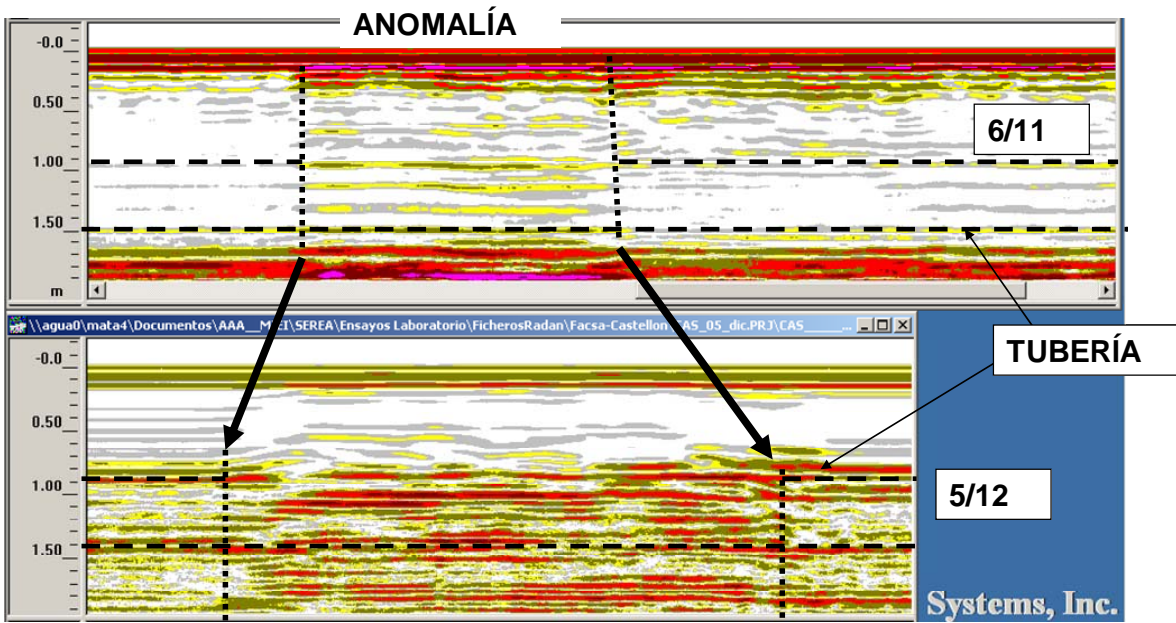


Figura 39. Anomalía en el tramo #2 relativa a la segunda campaña de mediciones.

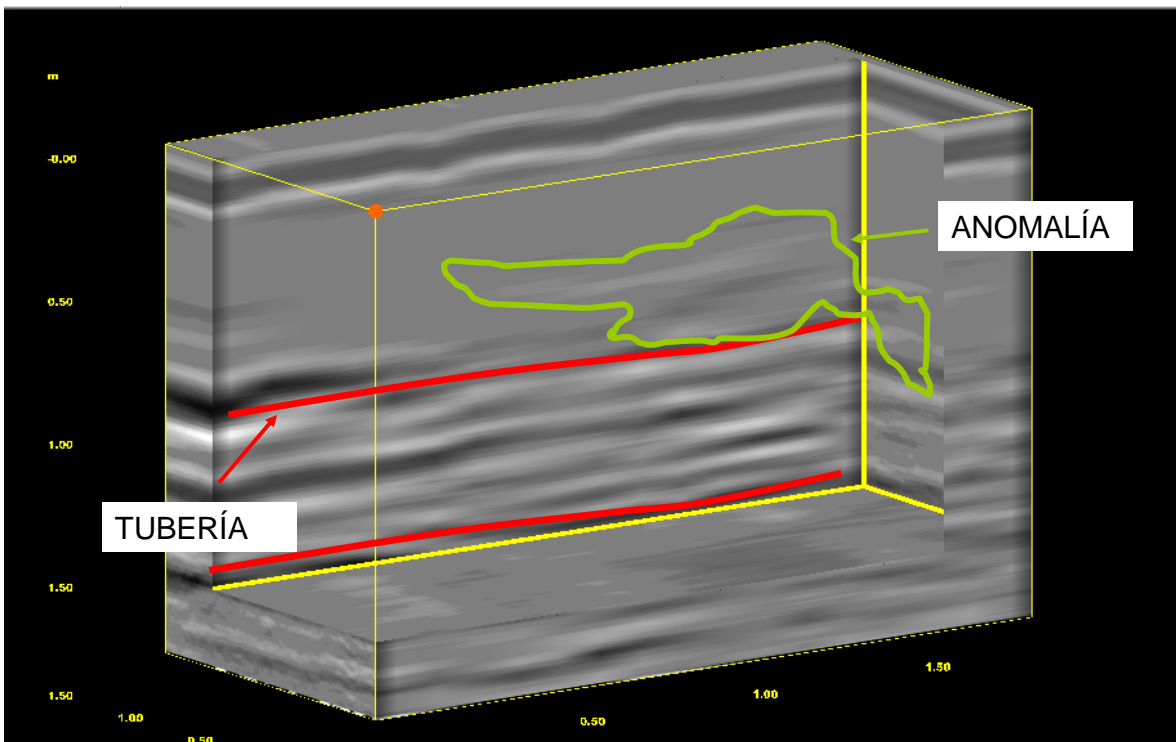


Figura 40. Visualización en 3-D de la anomalía en el tramo #2

c. Tramo #4

En este tramo se ha encontrado la anomalía más fuerte y más energética de la segunda campaña de mediciones. Su regularidad es muy marcada y solo eso impide poder

afirmar que estamos con total seguridad en presencia de una fuga. La entidad de energía en juego haría pensar más en un accesorio metálico enterrado (algún cable por ejemplo) y encontrada transversalmente (Fig. 41). De todos modos si la comparamos con un trabajo en laboratorio donde se simularon fugas se pueden apreciar unas correspondencias entre las dos (Fig. 42).

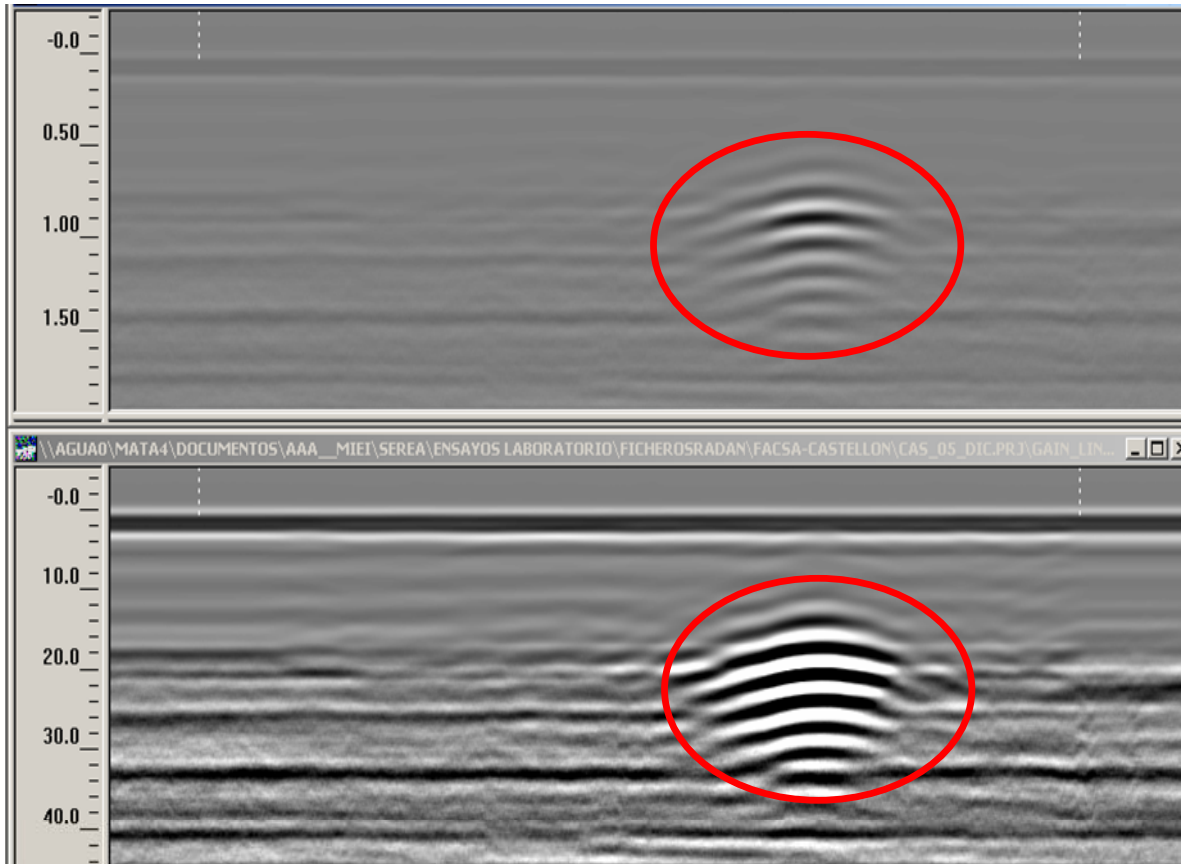


Figura 41. Anomalía en el tramo #4 relativa a la segunda campaña de mediciones con diferentes ganancias

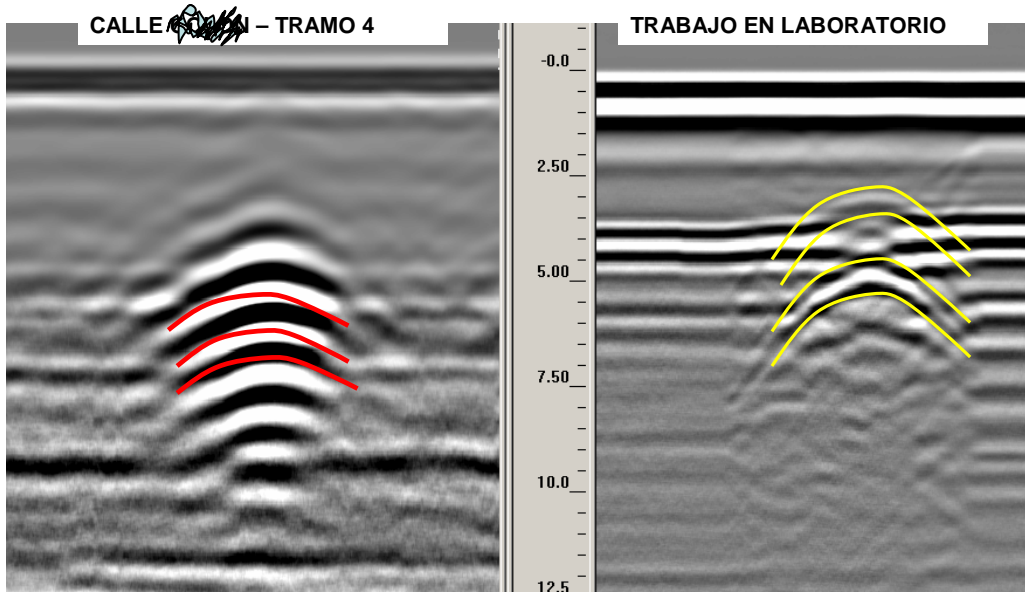


Figura 42. Anomalia en el tramo #4 relativa a la segunda campaña: comparación con un registro obtenido en el laboratorio del CMMF.

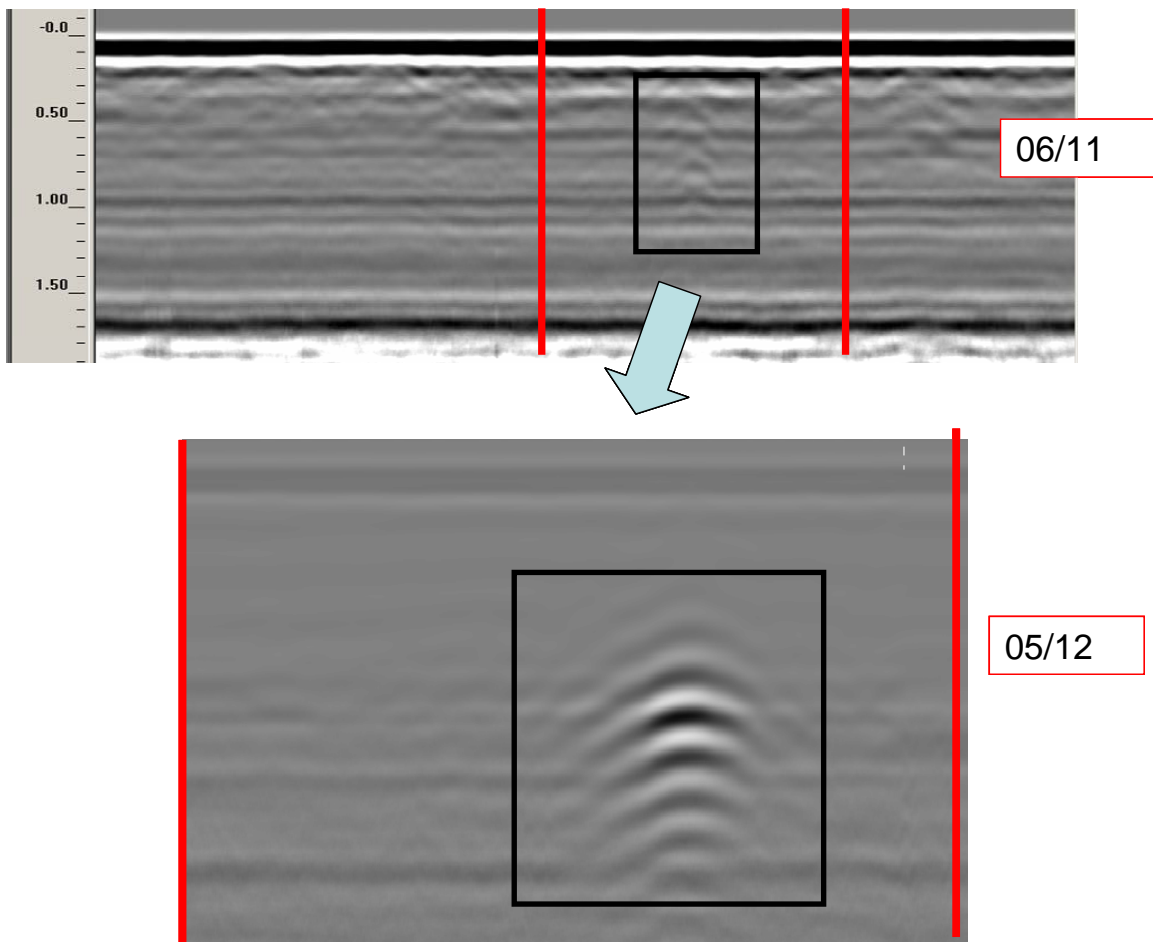


Figura 43. Anomalia en el tramo #4: comparación entre los radargramas de las dos campañas. Este tramo es el más indicado, después del tramo 1, en tener en su interior una pérdida de agua.

d. Otras anomalías detectadas.

En este apartado comentamos brevemente y en general las otras 5 anomalías detectadas. Estas se encuentran respectivamente en los tramos 5, 7, 8, 9, 11. Las primeras tres se detectaron ya en la primera campaña de estudios y han resultado en la segunda igual de significativas por la cantidad de energía implicada. En el tramo 7 y 8 con toda probabilidad las anomalías son relacionadas al sistema de saneamiento que se encuentra en las cercanías. Aquellas encontradas en los tramos 9 y 11 se han detectado en estudios de post tratamiento, y al comprobar sus entidades en la segunda campaña nos sentimos de asociar a las mismas solo una muy pequeña probabilidad de que representen una fuga. A seguir mostramos las figuras correspondientes a dichas singularidades electromagnéticas.

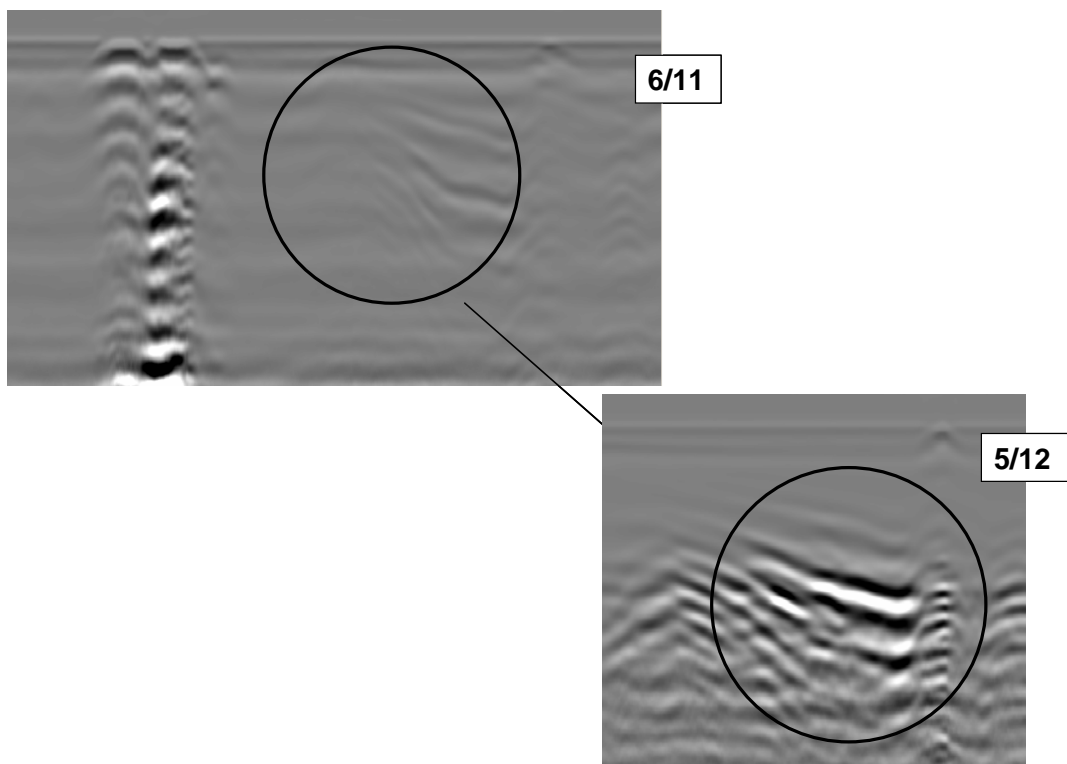


Figura 44. Anomalia en el tramo #5 relativa a la segunda campaña de mediciones

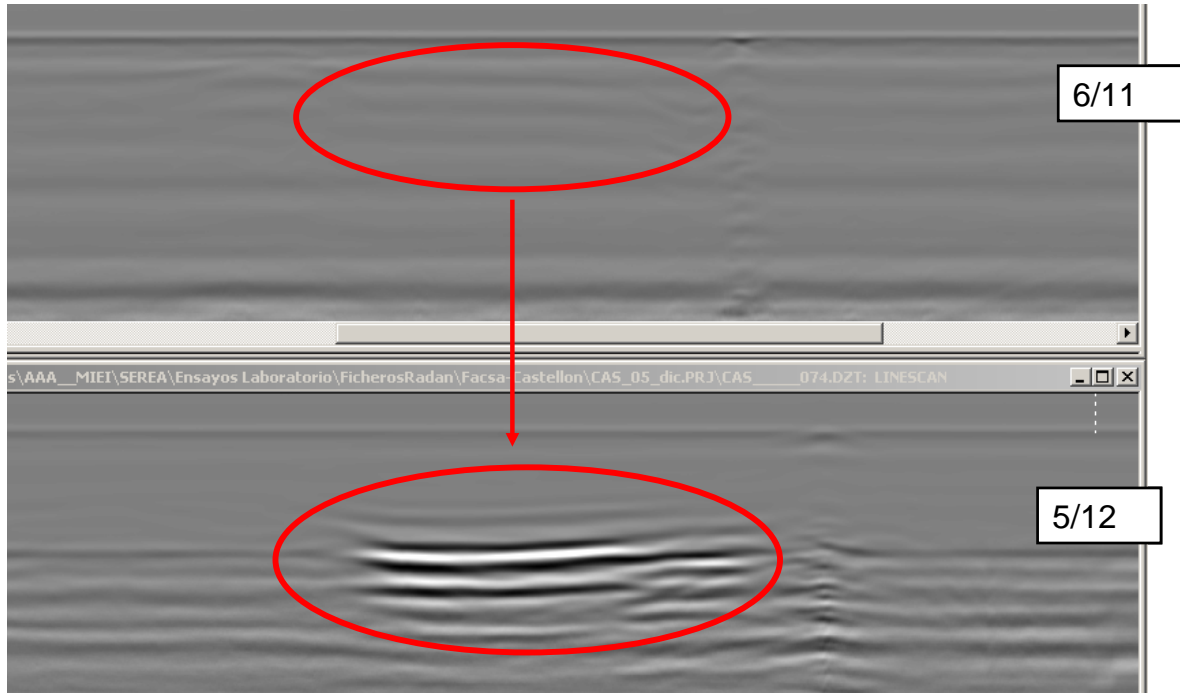


Figura 45. Otra anomalía en el tramo #7 relativa a la segunda campaña de mediciones

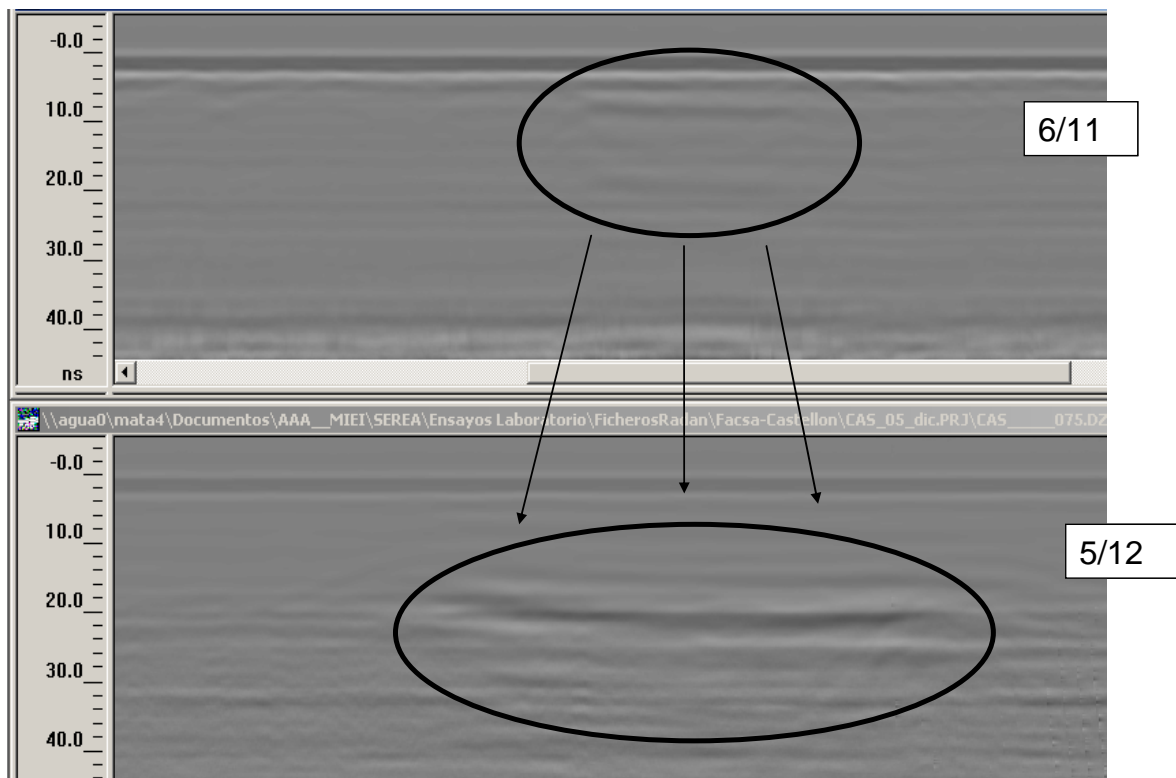


Figura 46. Anomalía en el tramo #8 relativa a la segunda campaña de mediciones

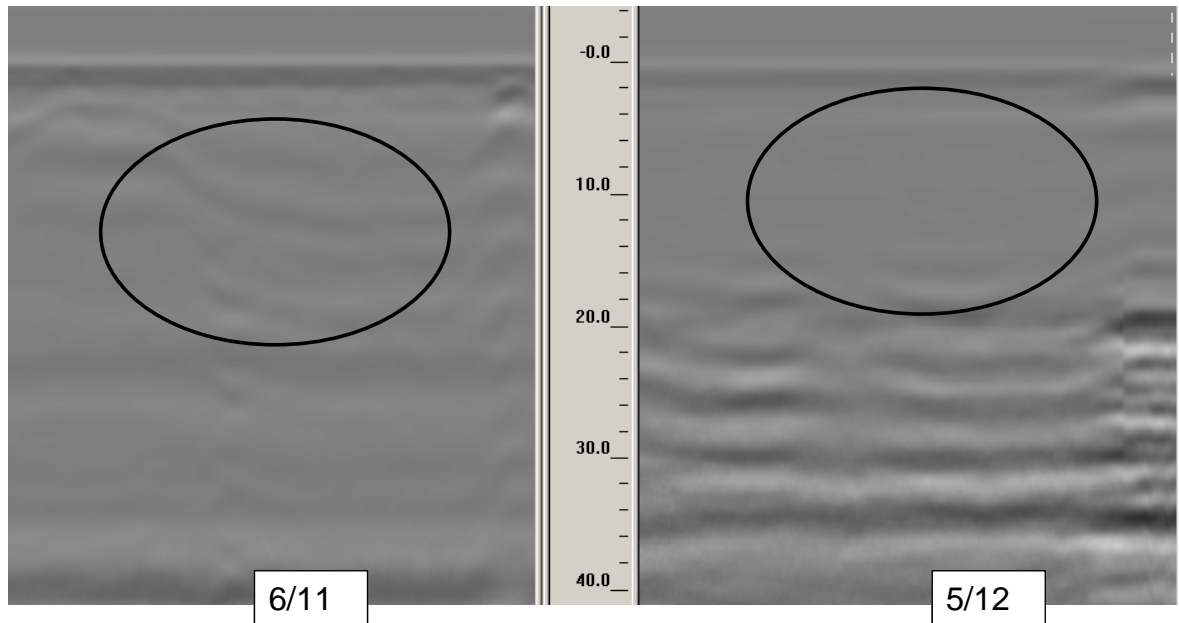


Figura 47. Anomalia en el tramo #9 relativa a la segunda campaña de mediciones

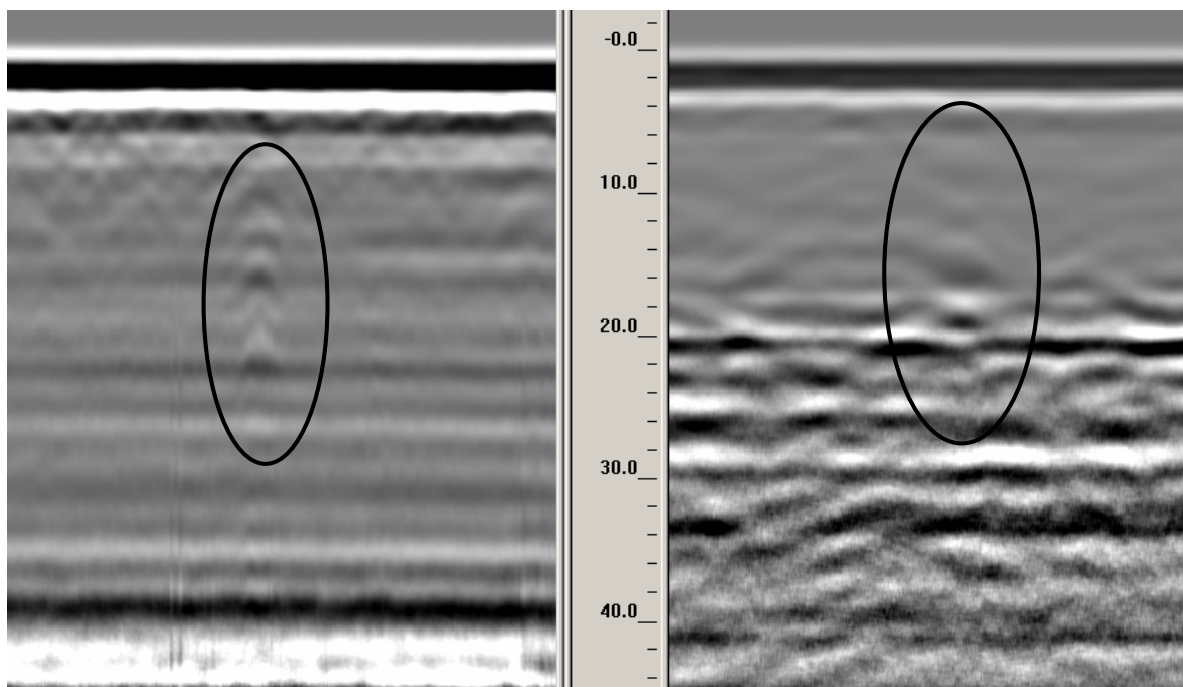


Figura 48. Anomalia en el tramo #11 relativa a la segunda campaña de mediciones: comparación entre los dos registros

Como se puede comprobar de las imágenes anteriores las anomalías en los tramos 9 y 11 no son significativas así que se pueden descartar de nuestro trabajo. Por otro lado, ya hemos comentado antes que las anomalías que se encuentran en los tramos 7 y 8 parecen ser relacionadas con el sistema de evacuación/saneamiento. En este caso sería mejor obtener y analizar el plan de la red de saneamiento para tener una información

más completa. Podemos seguir teniendo en cuenta la anomalía en el tramo 5 para nuestro objetivo (ver último apartado relativo a las conclusiones).

3.6.5 Conclusiones

Al momento de la redacción de este trabajo estamos todavía en espera de la finalización de las obras (catas y zanjas) que serán muy útiles para una calibración real del equipo y una evaluación de la efectividad del georadar en este sentido.

Entonces nuestras conclusiones serán parciales y sin una verdadera comprobación con la realidad. De todos modos, tenemos material suficiente para llegar a algunas conclusiones aunque estas mismas serán próximamente sujetas a la verificación real.

Concluyendo, y considerando que cabe la posibilidad de que exista más de una fuga, resumimos ahora lo que se ha explicado a lo largo de todo el informe.

El tramo #1 representa la zona en que sea más probable la presencia de la fuga. La anomalía en los primeros dos metros, bajo la forma de hipérbola, y las distorsiones presentes, bajo diferentes formas, alrededor del punto detectado por el correlador, apuntan a los primeros metros de dicho tramo como los más críticos de todo el recorrido. A este propósito se ha puesto una marca para cada anomalía detectada directamente en la calle.

La singularidad más clara y más interesante, desde el punto de vista del georadar, se ha encontrado en el tramo #4. Aunque a primera vista es tanta la energía en juego que parecería ser debida a un cable metálico, podemos indicar ese punto como el segundo en la lista de los posibles puntos de fuga. Su forma no es la típica *firma digital* buscada, pero la imagen es tan clara y contrastante que merece toda la atención necesaria.

El tramo #2 contiene una discontinuidad que ha sido detectada en las dos campañas y que podría ser tomada en cuenta en caso de que la fuga no se encuentre ni en el tramo #1 ni en el tramo #4.

De los tramos menos significativos, explicados en un apartado anterior, podemos indicar el tramo #5 como el más probable de los menos probables. Para una información más completa de los restantes casos (y también para el mismo tramo 4!) se sugiere un estudio detallado de la red de saneamiento, dado que algunas anomalías parecen ser relacionadas con conducciones no presentes en los mapas de la red de abastecimiento disponibles.

Para concluir nos referimos otra vez a las conclusiones alcanzadas en la primera campaña, refiriéndonos a las dificultades no dependientes de nosotros en el trabajo de campo, y que impidieron un uso más provechoso del georadar.

CAPITULO 4 – Conclusiones y desarrollos futuros

4.1 Conclusiones

El objetivo de este trabajo ha sido básicamente evaluar las respuestas y la eficacia del georadar como técnica no destructiva de localización de fugas y de tuberías, dentro del marco más general de los programas de rehabilitación de las redes de abastecimiento urbanas de agua.

Con respecto a la localización de las fugas, estas representan un fenómeno complejo. Son varios los investigadores que han propuesto soluciones y clasificaciones diferentes según su punto de vista. El Georadar es solamente una de estas metodologías. Tal vez la manera mejor de pensar en esta herramienta cabe dentro en un conjunto de técnicas, que van desde la posibilidad de detectarlas mediante modelos teóricos y basados en mediciones, hasta otros equipos como los “inteligentes” acelerómetros prelocalizadores. Los entes gestores de los sistemas de abastecimiento deben de ser preparados en cada aspecto del problema para ser capaces de escoger los métodos adecuados y poder mejorar el rendimiento de la red objeto del estudio.

Como metodología de apoyo a los objetivos del presente trabajo se han realizado más de 300 registros experimentales, variando las condiciones de trabajo en diferentes maneras. Así hemos podido estudiar y profundizar las diferentes respuestas que el georadar nos proporcionaba. Hemos separado los alcances obtenidos en experimentales de una parte, y de postprocesamiento en la otra.

Los principales resultados y conclusiones experimentales alcanzadas han sido:

- Caracterización de las anomalías en función de tres suelos con tres constantes dieléctricas diferentes, ϵ_r : 2.4, 4 y 8. Ha sido evidente que la atenuación de la señal aumenta conforme aumenta la constante; de esta manera la localización de la fuga resulta más complicada.
- En los ensayos de laboratorio, o sea con casi todas las variables bajo nuestro control, la fuga se ha visualizado en los registros mediante una forma muy localizada, así que ha sido en todos los casos fácilmente identificable. En las mediciones relativas a una escala más grande, o en aplicaciones reales, las imágenes obtenidas en general presentan ruidos mayores, por la razón que no todas las variables en juego puedan ser controladas por el usuario, resultando así más difícil la localización de la anomalía provocada por la fuga.
- En este último caso, resulta fundamental un adecuado postprocesamiento de los registros, que tiene que ser llevado a cabo teniendo en cuenta todas las características observadas en campo.

Desde el punto de vista informático se han investigado las potencialidades del RADAN 6.5 para el tratamiento y post procesamiento de las señales.

- La deconvolución predictiva representa un tratamiento útil en presencia de fuertes

reflectores (metales), que pueden ocultar elementos más profundos. Pero, resulta proporcionar mejor efectividad en presencia de rangos pequeños y registros no muy complicados.

- La transformada de Hilbert representa una posibilidad para evidenciar la anomalía según su magnitud, su fase y su frecuencia. Aunque en nuestro caso no ha sido fundamental, se piensa que pueda ser más útil in cuanto se pase a casos reales más complicados.
- Los filtros frecuenciales y la ganancia son muy importantes bien en el preprocesamiento, y bien en el post procesamiento para eliminar el ruido de alta y baja frecuencia, y contrastar la atenuación relativa a elementos más profundos.

Con respecto a la aplicación al caso real, aunque nos ha proporcionado varios resultados interesantes, estamos en espera de la comprobación de las conclusiones adquiridas, fundamental para una correcta calibración del equipo.

La detección y la localización de tuberías enterradas mediante georadar tienen un desarrollo consolidado ya que son varios y diferentes los estudios de investigación y prácticos llevados a cabo a lo largo de los últimos 20-30 años. Como ampliamente dicho, el georadar nos puede ser útil más en general para actualizar los mapas catastrales cuando se desconozca por ejemplo la ubicación exacta de las tuberías en un dado sistema hídrico; o cuando existan acometidas ilegales, las cuales producen una pérdida económica relevante considerada la característica de bien escaso que tiene el agua. En este trabajo hemos averiguado una vez más la bondad de esta técnica, aprovechándonos de los avances tecnológicos de la última década que han producido mejoras impresionantes en la resolución de los radargramas y consecuentemente en su interpretación. Por el otro lado ya hemos tenido la oportunidad de apreciar las grandes posibilidades ofrecidas en ámbito de post procesamiento, algo que sin la potencia de los actuales ordenadores no hubiera sido posible.

Más en general, se ha intentado proporcionar idealmente el mayor número posible de herramientas útiles a los técnicos para facilitar un uso del georadar lo más simple posible, minimizando al máximo los tratamientos posteriores de los registros.

Por otra parte, queda todavía mucho trabajo adelante; estamos lejos del nivel alcanzado de los prelocalizadores acústicos por ejemplo, donde un algoritmo es capaz de decidir si en una dada tubería, y con el análisis del ruido, es presente una fuga o menos. Tal vez nunca se alcanzará este nivel, el georadar ha nacido como una tecnología “imperfecta” y sigue siendo utilizado dependiendo mucho de la experiencia de quien lo maneja. La definición de “tecnología imperfecta” no tiene por que tener un significado totalmente negativo. Solo pone en evidencia como para cada registro son muchas las interpretaciones que se pueden sacar. Cabe en la

sensibilidad del técnico o ingeniero encontrar aquella que está más cerca de la realidad. Es muy importante por eso no omitir ningún particular en el momento de la medición en campo y de su interpretación, anotando cuidadosamente todos los elementos que pueden afectar el registro o provocar ruido. Y solo si no hay manera de sacar provecho de los datos originarios aplicar algunos de los tratamientos explicados antes.

4.2 Desarrollos futuros

En los ensayos de laboratorio y experimentales, se han utilizado básicamente tres tipologías de suelos con diferentes características (ϵ_r igual a 2.4, 4 y 8). En futuro nos proponemos variar la casuística de los suelos (variando la ϵ_r), también aumentando la escala de los experimentos.

Además, como ampliamente explicado, se ha hecho la simplificación de caracterizar un suelo electromagnéticamente según la sola ϵ_r . Esta simplificación ha sido justificada, visto que muchos autores la han utilizado. Pero, a veces este parámetro no es suficiente a describir electromagnéticamente el medio. Sería útil intentar buscar las relaciones que la capacidad de la onda a transmitirse en el terreno tiene también con otros parámetros, como la saturación y la porosidad. Estudios geotécnicos están pensados con este fin.

Estudios anteriores han demostrado la dependencia de la velocidad (y entonces de la ϵ_r) con la frecuencia. Estos mismos estudios han evidenciado que para conductividades por encima de los 0.1 S/m la dependencia de la velocidad con la frecuencia es importante dentro del rango de trabajo del georadar. Para conductividades menores a 0.002 S/m no hay dependencia apreciable para frecuencias por encima de los 10 MHz. En futuro se podrán calcular expresiones gráficas que permitan estimar, para cada frecuencia y para distintos valores de la conductividad, la velocidad de propagación.

Nos proponemos también analizar con más detalle el comportamiento de las frecuencias, también dependiendo de las características del medio, para intentar encontrar un modelo que permita predecir el filtrado que se producirá y el espectro que se ha de obtener.

Otra línea de investigación posible es profundizar la capacidad del software RADAN. Aprovechar de sus aplicaciones en 3-D para evaluar el movimiento de la mancha de agua fugada a varios intervalos de tiempo.

Finalmente, con respecto a la detección de tuberías enterradas nos proponemos también de realizar un algoritmo, basado en métodos de inteligencia artificial que sea capaz de localizarla automáticamente.

Reseña bibliográfica.

- Al Shukri H., Miller B., Al Rizzo H., Al Kadi O.: *Finite difference time domain modeling of an RF-Based technology for the detection of buried pipes: the Ground Penetrating Radar*. Fifth IASTED International Conference COMMUNICATION SYSTEMS AND NETWORKS, August 2006, Mallorca (Spain). Department of applied Science, College of Information Science and Systems Engineering, Univ. of Arkansas at Little Rock (USA).
- Berenger, J. P., "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," J. Computational Phys. 114, 185-200, 1994.
- Bergmann, T., Robertsson, J.O.A., Holliger, K., 1998. *Finite difference modeling of electromagnetic wave propagation in dispersive and attenuating media*. Geophysics 63 (3), 856–867.
- Bevan, B. (1991). *The Search for Graves*. Geophysics 56:1310-1319.
- Cabrera E., Almandoz J., Arregui F., García-Serra J., 1999, *Auditoría de Redes de Distribución de Agua, Artículo publicado en Ingeniería del Agua*, Vol.6 Num.4 (diciembre 1999), páginas 291-303.
- Cook, 1975. J.C. Cook , *Radar transparencies of mine and tunnel rocks*. *Geophysics* **40** (1975), pp. 865–885.
- D. L. Moffatt and R. J. Puskar, "A Subsurface Electromagnetic Pulse Radar," *Geophysics*, vol. 41, no. 3, pp. 506-518, June 1976.
- Davis J.L. and A.P. Annan, 1989. *Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy*, *Geophysical Prospecting*, **37**: 531-551.
- Eyuboglu S., Mahdi H., Al-Shukri A. (2004): *Detection of water leaks using Ground Penetrating Radar*. Department of Applied Science University of Arkansas at Little Rock, AR, 72204, U.S.A.
- Ferrando M. G., Conferencia "Rendimiento de una red versus Garantía de la calidad y precio a de la calidad y precio", Director técnico de Emivasa, Seminario SEREA, Valencia 2005.
- Hunaidi O., Giamou P. (1998): *Ground-Penetrating Radar for detection of leaks in buried plastic water distribution pipes*. Seventh International Conference on GPR.
- Hyun S.Y., Jo Y.S., Oh H.C., Kim S.Y. (2003): *An experimental study on a Ground-Penetrating Radar for detecting water-leaks in buried water transfer pipes*. Korea Institute of Science Technology, Seoul, Korea.
- Imai, T., T. Sakayama, and T. Kanemori (1987). *Use of Ground-Probing Radar and Soil Resistivity Surveys for Archaeological Investigations*. Geophysics 52: 137-150.
- Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Celaya (México), *Informe Técnico dentro del Programa de Recuperación de agua 2005*.
- Kim S.W., Kim S.Y.: *Comparison of FMCW and Pulse Type GPR for Water Leakage Detection*. School of Electrical Engineering Seoul National University and Imaging Media Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul (Korea).

- Kretzschmar, J.L., Kibbe, K.L., and Witterholt, E.J.: "Tomographic reconstruction techniques for reservoir monitoring". Report **10990**, Soc. Petrol. Eng., **1982**, pp. **1-11**.
- Lau, Chun Lok, Tom Scullion y Paul Chan, 1992(b). *Using ground penetrating radar technologies for pavement evaluations in Texas*, U.S.A., 1992. IV Int. Conf. on GPR. Geological Survey of Finland, special paper 16. Pgs. 277-283.
- Liu G., Jia Y., Liu H., Qiu H., Qiu D., Shan H. (2002): *A case study to detect the leakage of underground pressureless cement sewage water pipe using GPR, electrical and chemical data*. Environ. Sci. Technol. 2002, 36, 1077-1085. Department of Environmental Engineering. College of Geoscience, Univ. of Qingdao (China).
- Lorenzo E., Cuellar V. (1995): *Geofísica de alta resolución en Ingeniería Civil. Estudios en estructuras de hormigón utilizando Georadar*. Física de la Tierra n°7, 243-257, CEDEX (MOPTMA), Universidad de La Coruña.
- Lymperopoulos D.G., Bimpas M., Stratakos Y. Paraskevopoulos N., Kaklamani D.I., Uzunoglu N.K.: *Detection of water leaks in supply pipes with active microwave GPR sensors and electromagnetic modelling*. URSI EMTS 2004. School of Electrical & Computer engineering, National Technical Univ. of Athens (Greece).
- Maksim Bano, Yves Bernabe: "*Imagerie de la proche surface par georadar*", para la obtención de "l'Habilitation à diriger des recherches" de Université Louis Pasteur - Strasbourg I, especialidad en Geofísica Aplicada, diciembre 2000.
- Maser K.R., Zarghamee M.S. (1999): *Leak and condition evaluation of a buried aqueduct*. Nondestructive Evaluation of utilities and Pipelines, SPIE, Volume 3398, pp 200-208. Infrasense Inc., 14 Kensington Rd, Arlington (USA).
- Nakhkash M., Mahmood-Zadeh M.R. (2004): *Water Leak Detection Using Ground Penetrating Radar*. Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, 21-24 June 2004. Department of Electrical Engineering, Univ. of Yazd (Iran).
- Loeffler Olivier, Maksim Bano: *Modélisation géoradar de la proche surface, estimation de la teneur en eau et influence d'un polluant*, Tesis Doctoral l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I, febrero 2005.
- Patterson, J.E., and Cook, F.A., 2002, *Successful application of ground-penetrating radar in the exploration of gem tourmaline pegmatites of southern California*, Geophysical Prospecting, 50, 2, 107-117. (<http://www.pegmatite.com/Gem-Star-GPR.pdf>).
- Peacock K. L. and S. Treitel, "*Predictive deconvolution: theory and practice*," Geophys., vol, 34, pp. 155-169, 1969.
- Pérez Gracia, Vega (2001): *Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico*. Dep. de Ingeniería de Terreno, Cartográfica y Geofísica, Univ. Politécnica de Cataluña.
- Pérez R., *Informe Proyecto SIBA*, Proyecto de Investigación Interdisciplinar nº 5706 (UPV), Proyecto SIBA (Ref. DPI2004-04430) financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (España) y los fondos europeos FEDER.

- Robinson E. A. and S. Treitel, "*The spectral function of a layered system and the determination of waveforms at depth*," Geophys. Prospecting, vol. 25, pp. 434-459, 1977.
- Roden J. A. and S. D. Gedney, "*Convolutional PML (CPML): An Efficient FDTD Implementation of the CFS-PML for Arbitrary Media*," Microwave and Optical Technology Letters, vol. 27, n. December 5, pp. 334-339, 2000.
- Sang-Wook Kim et al., "*Comparison of FMCW and Pulse Type GPR for Water Leakage Detection*," Fourth International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances, 2005
- Stampolidis A., Soupios P., Vallianatos F. (2003): "*Detection of leaks in buried plastic water distribution pipes in urban places – A case study*." 2nd International Workshop on Advanced GPR, 14-16 may of 2003 (Delft). Technological Educational Institute of Crete (Greece).
- Tavera, M. dirigido por Rafael Pérez G.: "*Estudio de las pérdidas de agua en tuberías mediante georadar. Caracterización de su firma digital*." Diploma de Estudios Avanzados, Universidad Politécnica de Valencia, octubre 2007.
- Tavera, M., Pérez, R. Belda, N., Herrera, M., Montalvo, I. "*Aplicación del radar de subsuelo en la mejora del rendimiento de redes de distribución de agua: caracterización de la firma digital de las pérdidas de agua en tuberías*." VII SEREA, Seminario Ibero-americano: Planificación, proyecto y operación de sistemas de abastecimiento de agua, Proceedings, Morelia (México), 2007.
- Tavera, M., Pérez, R., Belda, N., Herrera, M. "*Uso del georadar per un migliore rendimento delle reti idriche: verifica in laboratorio della sua efficacia come tecnica di prospezione per la ricerca perdite*." III° Seminario La ricerca delle perdite e la gestione delle reti di acquedotto, Facoltà di Ingegneria di Perugia (Italia), 2007.
- Ulriksen, C.P. (1982): "*Application of Impulse Radar to Civil Engineering*." Ph. D. Thesis, Department of Engineering Geology, Lund University of Technology.
- Unterberger, R.R., 1978. "*Radar propagation in rock salt*." Geophysical Prospecting 26. Pgs: 312-328.
- Zeng X., McMechan G. A. (1996): "*GPR characterization of buried tanks and pipes*." Geophysics, Vol. 62, N°3, Univ. of Texas at Dallas (USA).

Anexo 1 – Aplicación a un caso de estudio: tabla de los registros

<u>Tramo</u>	<u>Fichero</u>	<u>Distancia</u>	<u>Características</u>	<u>Notas</u>
1	CAS_001	0-24 m	Del comienzo de calle, longitudinal a la tubería, en el acabado de adoquín a lado derecho, cerca de la acera	
2	CAS_002	24-48 m	Longitudinal a la tubería	Anomalía bien visible a circa 39 m del punto 0.
3	CAS_003	48-72 m	Longitudinal a la tubería	
4	CAS_004	72-96 m	Longitudinal a la tubería	
5	CAS_005	96-120 m	Longitudinal a la tubería	
6	CAS_006	120-144 m	Longitudinal a la tubería	
7	CAS_007	144-168 m	Longitudinal a la tubería	
8	CAS_008	168-192 m	Longitudinal a la tubería	
9	CAS_009	192-216 m	Longitudinal a la tubería	
10	CAS_010	216-237 m	Longitudinal a la tubería (tramo de 21 m)	
11	CAS_011	237-264 m	Longitudinal a la tubería (tramo de 27 m)	
12	CAS_012	264-288 m	Longitudinal a la tubería	
13	CAS_013	288-312 m	Longitudinal a la tubería	
14	CAS_014	312-336 m	Longitudinal a la tubería	
2	CAS_015	24-48 m	Longitudinal a la tubería	Se ha repetido el tramo 2, la anomalía sigue bien visible.
1	CAS_016	0-24 m	Longitudinal a la tubería	Se ha repetido el tramo 1, donde mediciones con el correlador evidenciaron una posible fuga. El GPR no ha detectado nada de significativo.
1	CAS_017	0-24 m	Longitudinal a la tubería. Acera derecha (donde se localiza la tubería), borde izquierdo.	En la acera es presente una cantidad relevante de arquetas, que son bien visibles en todos los radargramas siguientes.
2	CAS_018	24-48 m	Longitudinal, en la acera	
3	CAS_019	48-72 m	Longitudinal, en la acera	
5	CAS_020	96-120 m	Longitudinal, en la acera	Se ha detectado una anomalía. No se ha tomado nota de la distancia.
5	CAS_021	96-120 m	Longitudinal, en la acera	Se ha repetido el mismo recorrido.
6	CAS_022	120-144 m	Longitudinal, en la acera	

7	CAS_023	144-168 m	Longitudinal, en la acera	Se ha detectado anomalía a 4-5 m del inicio del tramo.
7	CAS_024	168-192 m	Longitudinal, en la acera	Repetición del tramo. La anomalía sigue visible.
8	CAS_025	192-216 m	Longitudinal, en la acera	
9	CAS_026	216-240 m	Longitudinal, en la acera	
10'	CAS_027	240-260.5 m	Longitudinal, en la acera	Obstáculo en la acera, por la presencia de obras de arqueología. No se ha podido seguir más adelante
8	CAS_028	192-216 m	Longitudinal, en la acera	A 10,5 m del inicio del tramo se ha presentado una anomalía, probablemente relacionada con el sistema de saneamiento.
2	CAS_029	39 m del inicio de calle Colon	Malla cuadrada (2m x 2m) para simulación 3-D. Distancia entre ejes a 50 cm, en dirección longitudinal, del centro de la calle hacia el bordillo	Ver fichero anejo malla#1.ppt
	CAS_030			
	CAS_031			
	CAS_032			
	CAS_033			
2	CAS_034	39 m del inicio de calle Colon	Malla cuadrada (2m x 2m) para simulación 3-D. Distancia entre ejes a 50 cm, en dirección transversal a la tubería, del punto hacia más lejos a el otro más cerca del punto 0.	Ver fichero anejo malla#1.ppt
	CAS_035			
	CAS_036			
	CAS_037			
	CAS_038			
4	CAS_039	72-96 m	Longitudinal, en la acera	Anteriormente no se había podido obtener este registro por una camioneta puesta en la acera de dicho tramo que no permitía el paso del georadar.
5	CAS_040	21 m del inicio del tramo	Malla (2m x 2m) para simulación 3-D. Distancia entre ejes a 1 m, en dirección longitudinal positivo, del centro de la calle hacia la acera	Ver fichero anejo malla#2.ppt
	CAS_041			
	CAS_042			
7	CAS_043	4 metros del inicio del tramo	Malla (1m x 1m) para 3D. En la acera, distancia entre ejes de 50 cm. Longitudinal.	Ver fichero anejo malla#3.ppt
	CAS_044			
	CAS_045			

Anexo 2 - Filtro inverso Q para minimizar el efecto de atenuación, que se realiza por absorción y dispersión, de las señales radar

La atenuación de las ondas electromagnéticas al propagarse en el subsuelo pueden ser vistas como una perturbación de la señal que tiene que ser eliminada aplicando unos tratamientos, los mas adecuados posibles. Con respecto a la propagación de las señales del radar en un medio determinado con una respuesta dieléctrica compleja y dependiente de la frecuencia se observan normalmente dos fenómenos: la amplitud de la señal va a disminuir (absorción) y su forma va a cambiar (dispersión); esto quiere decir que la señal radar no es estacionario (cambia con el tiempo). Consecuentemente, las técnicas clásicas de la convolución o de la migración tienen algunas limitaciones y en algunos casos pueden resultar ineficaces.

Por esta razón han surgido otras posibilidades que intentan modelizar el fenómeno en una manera más realista: es esto el caso del **filtro inverso-Q**.

La atenuación del georadar está fuertemente relacionada con la permitividad dieléctrica ϵ_r del medio determinado, que es en general una cantidad compleja y que tiene también una dependencia de la frecuencia. Una medida de la energía acumulada con respecto a la energía disipada, que puede ser también estimada como la relación entre la parte real y la parte imaginaria de la permitividad, se suele indicar en la literatura específica como **factor-Q**. El así dicho **factor de calidad Q** resulta dependiente a su vez de la frecuencia, ya que las dos partes, real e imaginaria no siguen la misma ley en frecuencia.

Como dijimos antes, la atenuación puede ser vista como una perturbación de la señal, la cual puede ser “medida” mediante una correcta estimación del factor-Q. Aplicando un filtro, basado en una adecuada estimación del factor-Q anterior, se pueden eliminar estas perturbaciones.

Atenuación y factor de calidad

Ahora vamos entonces a definir el factor de calidad Q . Los fenómenos de polarización y de conductividad no son instantáneos y descomponemos la permitividad y la conductividad, consideradas como magnitudes complejas, en un componente en fase y un componente en cuadratura de fase:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon' - i \epsilon''$$

$$\sigma(\omega) = \sigma' + i \sigma''$$

La corriente eléctrica total en el medio es la suma de las corrientes de conducción y de las

corrientes de desplazamiento, vistos anteriormente. Tenemos un campo eléctrico \vec{E} (solución de la ecuación de Helmholtz) y considerado como una onda armónica. Esto nos da dos maneras de escribir la corriente total:

$$\vec{J}_{tot} = [(\sigma' + \varepsilon'' \omega) + i(\sigma'' + \varepsilon' \omega)] \vec{E}$$

$$\vec{J}_{tot} = \left[\left(\varepsilon' + \frac{\sigma''}{\omega} \right) - i \left(\varepsilon'' + \frac{\sigma'}{\omega} \right) \right] \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Estas dos maneras de definir la corriente total nos permiten mostrar que realmente, no podemos separar las contribuciones de las partes imaginarias y reales de cada parámetro. Las contribuciones son cruzadas: la parte real de la permitividad interviene en la parte imaginaria de una conductividad y a la inversa. Por consiguiente podemos definir dos parámetros efectivos complejos y, parámetros que serán realmente medidos:

$$\vec{J}_{tot} = [\sigma_e' + i\sigma_e''] \vec{E} = \sigma_e \vec{E}$$

$$\vec{J}_{tot} = [\varepsilon_e' - i\varepsilon_e''] \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \varepsilon_e \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

A partir de esas definiciones se puede definir el ángulo de pérdidas de la siguiente manera:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_e''}{\varepsilon_e'} = \frac{\sigma_e'}{\sigma_e''} = \frac{1}{Q}$$

Las pérdidas dieléctricas están vinculadas con este ángulo. Q es el factor de calidad del medio. Este ángulo representa la relación entre la energía disipada por ciclo sobre la energía almacenada. Así, el ángulo de pérdida da una medida de la disipación de las ondas electromagnéticas, esta disipación está causada por la conducción σ y los diferentes mecanismos de la relajación dieléctrica (como atómico, electrónico, iónico y dipolar) que pueden producir una parte imaginaria de la permitividad bastante importante (Gueguen y Palciauskas, 1992). Cuando el ángulo de pérdida es nulo (ninguna pérdida de energía), la densidad de corriente está en cuadratura de fase con el campo eléctrico. En este caso, el factor de calidad tiene un valor infinito.

Un ángulo importante de pérdida está vinculado a una parte imaginaria ε_e'' de la permitividad efectiva importante. Sabiendo que $\varepsilon_e'' = \varepsilon'' + \sigma'/\omega$ (comparando las relaciones precedentes), la

permitividad efectiva del medio es debida a la parte imaginaria ε'' de la permitividad del medio (consecuencia de los fenómenos de polarización) y a la parte efectiva de la conductividad. Un medio muy dispersivo o un medio muy conductor pues no estará favorable a la utilización del georadar, porque atenuará muy rápidamente la energía de las ondas electromagnéticas transmitidas en el medio.

Modelo dieléctrico con Q constante

Un modelo con pérdidas constantes o modelo con un factor de calidad Q independiente de la frecuencia (modelo dieléctrico con Q constante) implica que las partes reales e imaginarias de la permitividad deban seguir la misma ley en frecuencia (ver la definición del factor de calidad). Parece entonces razonable suponer un material con una respuesta dieléctrica cuyas partes real e imaginaria son representadas por dos rectas paralelas en un sistema con escala logarítmica ($\log[\varepsilon]$ en función de $\log[\omega]$) sobre un rango de frecuencias superior a la frecuencia crítica ($\omega > \omega_p$). Por consiguiente, con el fin de modelar la atenuación de la señal radar, tomamos una respuesta dieléctrica de la siguiente forma:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_r \left(-i \frac{\omega}{\omega_r}\right)^{n-1} = \varepsilon_r \left|\frac{\omega}{\omega_r}\right|^{n-1} (-i \operatorname{sgn} \omega)^{n-1}$$

donde $0 \leq n < 1$ y ω_r, ε_r son dos constantes. ω_r es una frecuencia de referencia y ε_r tendrá la misma magnitud que la permitividad. Para $n = 1$, $\varepsilon_r = \varepsilon$. Una función similar para el módulo elástico ha sido utilizada por *Kjartansson (1979)*, en el caso de las pérdidas mecánicas para los sólidos. Nuestra elección (ecuación precedente) está basada en el hecho de que las respuestas dieléctricas y mecánicas, en la inmensa mayoría de los casos, muestran tendencias similares (*McCall, 1969; Jonscher, 1977*). Descomponiendo la ecuación precedente en su parte real e imaginaria y de allí considerando solo las frecuencias positivas se obtiene:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_r \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^{n-1} \left[\exp\left(-i \frac{\pi}{2}\right)\right]^{n-1}$$

o bien

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_r \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^{n-1} \left[\operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{2}\right) + i \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right)\right]$$

Esta última ecuación confirma que el argumento de la permitividad en la ecuación de la respuesta dieléctrica, o el ángulo de fase entre la corriente total y el campo eléctrico es independiente de la frecuencia. En consecuencia, se deduce de la ecuación que define Q (o el ángulo de pérdida) que Q no depende de la frecuencia:

$$\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \cot\left(\frac{n\pi}{2}\right) = \frac{1}{\tan\left(\frac{n\pi}{2}\right)} = \frac{1}{Q}$$

El número de onda complejo (o constante de propagación compleja) k es dado por:

$$k(\omega) = \omega \sqrt{\mu \varepsilon(\omega)}$$

Recordamos que para la mayoría de las rocas no magnéticas, el parámetro μ es igual a la permeabilidad magnética del vacío μ_0 . Sustituyendo la ecuación de $\varepsilon(\omega)$ en la de k , se obtiene:

$$k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon_r} \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^{\frac{n-1}{2}} \left\{ \cos\left[\frac{\pi}{4}(1-n)\right] + i \operatorname{sen}\left[\frac{\pi}{4}(1-n)\right] \right\}$$

Observamos que:

$$V_r = \frac{1}{\sqrt{\mu \varepsilon_r} \cos\left[\frac{\pi}{4}(1-n)\right]}$$

Y entonces, la fórmula de k llega a:

$$k = \frac{\omega}{V_r} \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^{\frac{n-1}{2}} \left\{ 1 + i \tan\left[\frac{\pi}{4}(1-n)\right] \right\}$$

Los términos de la dispersión y de la absorción son introducidos respectivamente por la parte real e imaginaria del número de onda k . Escribiendo el número de onda complejo de la forma $k = \beta + i \alpha$, donde $\beta = \omega / V(\omega)$, con $V(\omega)$ la velocidad de fase y α el coeficiente de absorción, y comparando esta definición de k con la ecuación anterior, obtenemos:

$$V(\omega) = V_r \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^{\frac{1-n}{2}}$$

y

$$\alpha(\omega) = \frac{\omega}{V(\omega)} \tan\left[\frac{\pi}{4}(1-n)\right] \approx \omega^{\frac{1+n}{2}} \tan\left[\frac{\pi}{4}(1-n)\right]$$

Aquí $0 \leq n < 1$, el caso $n = 1$ corresponde a un medio sin absorción y sin dispersión (velocidad independiente de la frecuencia) o dicho de otra manera, a un medio con un factor de calidad Q infinito ($\alpha = 0$), pues $k = \omega / V_r$ real. El resultado en la fórmula de $V(\omega)$ es la relación de dispersión propuesta la primera vez por Kjartansson (1979) en el caso de las pérdidas mecánicas en los sólidos. Esta ecuación nos indica que la velocidad de fase $V(\omega)$ aumenta cuando aumenta ω . Se trata en este caso de la dispersión "anormal". En el caso contrario cuando un aumento de ω conduce a una disminución de $V(\omega)$, se dice que la dispersión es "normal" (Stratton, 1941). De la fórmula de $V(\omega)$ también se deduce que V_r simplemente es la velocidad de fase para la frecuencia de referencia ω_r , y ya que V es ligeramente dependiente de la frecuencia ($n \approx 1$), el coeficiente de absorción α no es exactamente proporcional a la frecuencia. El modelo de la ley en potencia, expuesto más arriba, se basa sobre estudios empíricos de la respuesta dieléctrica y vale para un rango de frecuencias superior a ω_p y para un valor positivo cualquiera de Q .

En efecto, las partes reales e imaginarias del número de onda complejo ($k = \beta + i \alpha$) están vinculadas por la transformada de Hilbert (Papoulis, 1962). Así tenemos:

$$\frac{\omega}{V(\omega)} - \frac{\omega}{V_\infty} = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\alpha(\omega_0)}{\omega - \omega_0} d\omega_0 = H[\alpha(\omega)]$$

Donde V_∞ es el valor límite de la velocidad de fase $V(\omega)$ cuando $\omega \rightarrow \infty$, y $H[\alpha(\omega)]$ es la transformada de Hilbert de la atenuación $\alpha(\omega)$. Para que esta transformada exista, la atenuación tiene que cumplir la condición del teorema de Paley-Wiener (1934) y que su cuadrado sea sumable (Papoulis 1962) con el fin de que la Transformada de Fourier inversa de $\alpha(\omega)$ sea causal. Esas condiciones se cumplen para funciones $\alpha(\omega)$ del tipo $|\omega|^\gamma$ con $0 \leq \gamma < 1$ (Kalinin 1967, Azimi 1968, Weaver y Pao 1981, Brennan y Smylie 1981, Szabo 1994). Eso es el caso de la ecuación de $\alpha(\omega)$, ya que $0 \leq n < 1$. De hecho demostramos que la expresión de la velocidad de fase $V(\omega)$ dada por la relación de dispersión anterior es exactamente la misma que la encontrada en la expresión de $V(\omega)$ con la condición $V_\infty = 0$. Es la aproximación de un medio en el que se supone que no haya ninguna respuesta dieléctrica instantánea ($\epsilon_\infty = 0$). Esta hipótesis vale para un rango de frecuencias muy estrecha, lo que se cumple en el caso de las antenas utilizadas por el georadar. En la práctica, debemos aceptar el hecho de que para distintos rangos de frecuencias (o sea distintas antenas), tenemos que encontrar distintos valores de calidad Q . Powers & Olhoeft (1994), Hollender & Tillard (1998) y Grandjean (2000) observaron valores del factor de calidad que aumentan con la frecuencia.

Medio con Q constante poco absorbente

Para $n = 1$ (es decir con un gran valor de Q o una atenuación muy débil), la tangente en las ecuaciones anteriores puede ser sustituida por su argumento (es decir $1-n = 2/(\pi Q)$ y $\tan(\pi(1-n)/4) \approx \pi(1-n)/4 \approx 1/2 \cdot Q$) y en este caso, la relación de dispersión llega a:

$$\frac{1}{V(\omega)} = \frac{1}{V_r} \left[1 - \frac{1}{\pi Q} \ln \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right) \right]$$

y la atenuación α es exactamente proporcional a la frecuencia:

$$\alpha = \frac{\omega}{2V_r Q}$$

La primera ecuación es la misma que la relación de dispersión encontrada por *Futterman (1962)*, *Kanmori & Anderson (1977)*, *Kjartansson (1979)* y *Müller (1983)* en el caso de las pérdidas mecánicas para un medio a Q constante y poco absorbente. Este resultado es utilizado comúnmente en sismología en el caso de las ondas de volumen. *Turner y Siggins (1994)* encontraron empíricamente que el coeficiente de la absorción α se da a partir de la suma de un valor constante (α_0) y de un otro término proporcional a la frecuencia y que depende de un nuevo parámetro Q^* . Este último parámetro es igual a Q cuando $\alpha_0 = 0$. Otros estudios experimentales también confirmaron que una relación lineal existe entre la atenuación electromagnética y la frecuencia en el caso de un medio poco absorbente.

Las primeras ecuaciones expresadas en la parte "Modelos dieléctricos con Q constante", con la salvedad de la constante ϵ_∞ , son de buen acuerdo con la ley universal de Jonscher (1977). Tener en cuenta esta constante implica añadir ϵ_∞ en la parte real de la primera ecuación del mismo capítulo. *Hollender y Tillard (1998)* utilizaron este caso con el fin de modelar la propagación y los coeficientes de reflexión de las ondas radar. También se trata de este caso en el trabajo de *Bano (1996)* donde encontramos (para n será de 1, atenuación débil) la misma relación de dispersión pero con un factor de calidad efectivo proporcional al dado por la ecuación $\epsilon''/\epsilon' = 1/Q$:

$$\frac{1}{Q_{eff}} = \frac{\epsilon_r^0}{Q(\epsilon_r^0 + \epsilon_\infty)} = \frac{\epsilon_r^0}{\tan\left(\frac{n\pi}{2}\right)(\epsilon_r^0 + \epsilon_\infty)} \quad y \quad V_r = \frac{1}{\sqrt{\mu(\epsilon_r^0 + \epsilon_\infty)}}$$

Con $\epsilon_r^0 = \epsilon_r \cdot \cos[(1-n)\pi/2]$.

Compensación de las pérdidas dieléctricas (Filtro Inverso - Q)

Con el fin de compensar la atenuación de los datos radar, *Turner (1994)* propuso un método de deconvolución por propagación. Métodos de prolongación a una dimensión (1D) del campo de onda hacia abajo que describe el proceso físico de la deformación de la señal también han sido propuestos por *Hargreaves y Calvert (1992)* en el caso de los datos sísmicos.

Para mejorar las imágenes radar y teniendo en cuenta los resultados alentadores de la modelización 1D de las ondas electromagnéticas, también se han desarrollado métodos con

filtro inverso -Q a 1 y 2D en el caso de un medio absorbente y dispersivo (Bano, 2000). Este estudio ha sido inspirado por un estudio similar hecho antes en el caso de la puesta en imagen 1D de las ondas sísmicas (Bano, 1996). Estos métodos están basados en la prolongación del campo de ondas ponderado en el dominio de Fourier y son válidos para un medio homogéneo horizontalmente estratificado. Los resultados de estas técnicas son sometidos a un test e ilustrados sobre los datos sintéticos y efectivos.

Método de estimación del factor de calidad

El método de estimación del factor de calidad Q presentado aquí es equivalente a la modelización de la onda simple introducida por Jannsen (1985) en el caso de la sísmica. Blair y Spathis (1982, 1984) también utilizaron la aproximación de Kjartansson (1979) con el fin de modelizar las pérdidas mecánicas en los sólidos. Con el fin de obtener el valor del factor de calidad Q calculamos las ondas simples atenuadas para ciertos valores de Q y escogemos la solución óptima comparando la onda simple teórica con la onda simple efectiva observada $e_{obs}(t)$. Ya que la cantidad de la absorción depende también del tiempo de trayecto T (ver la ecuación de modelización de la onda simple), este parámetro puede ser determinado simultáneamente con Q , esto realizándose al variar T en un intervalo razonable del tiempo. La comparación entre las dos ondas simples (teórica y observada) se hace utilizando la norma L_2 . Por consiguiente el factor de calidad Q y el tiempo de trayecto T son determinados tomando el mínimo de la función siguiente:

$$S(T_j, n_j) = \sum_j [e(j, T_j, n_j) - e_{obs}(j)]^2$$

La suma (sobre el indicio j) en el tiempo de esta ecuación se efectúa sobre una longitud de la onda simple; $e(j, T_j, n_j)$ es el valor teórico de la onda simple en la muestra j en el tiempo y al conjunto de los parámetros (T_j, n_j) , y $e_{obs}(j)$ es el valor de la onda simple transmitida observado en la muestra j en el tiempo. En nuestro estudio la comparación entre dos ondas simples ha sido realizada utilizando las amplitudes normalizadas por sus valores máximos; es la razón por la cual la divergencia esférica y el diagrama de radiación no se toman en consideración en la ecuación de modelización de la onda simple.

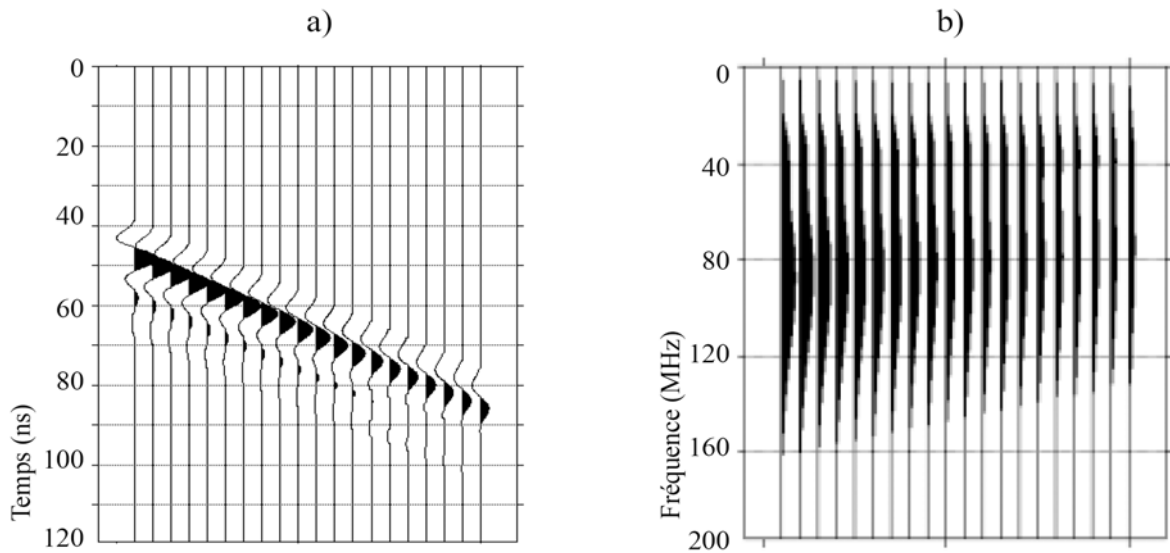


Fig. 1: a) Evolución de una onda simple radar (100 MHz) con el tiempo de trayecto en un medio absorbente y dispersivo ($Q=10$). b) Espectro de amplitud de a)

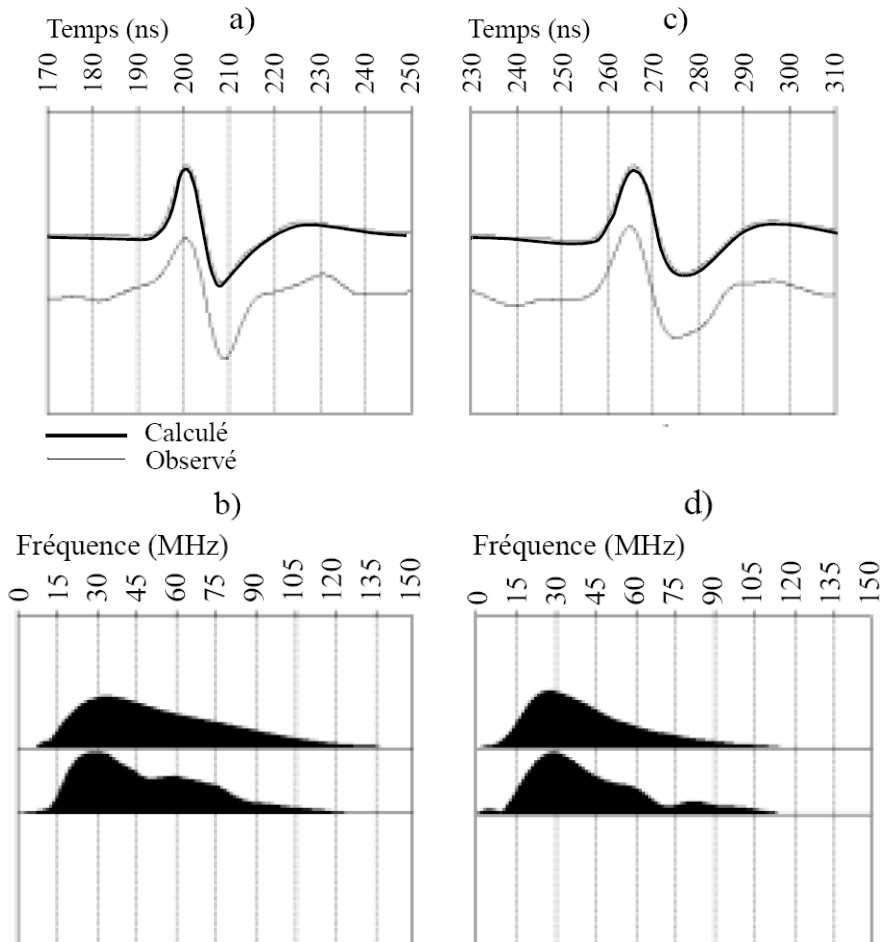


Fig. 2 Comparación entre ondas simples modeladas y observadas (100 MHz)

- a) onda simple modelada (trazo grueso) con $Q = 14$
- b) espectros de la onda simple modelada y observada respectivamente
- c) lo mismo que en a) con un tiempo de trayecto más elevado
- d) lo mismo que en b) con un tiempo de trayecto más elevado

La figura 2 presenta el método de propagación y la comparación de la onda simple radar modelada (trazo grueso) y de la onda simple efectiva transmitida (trazo fino) en un medio granítico alterado y fracturado (Bano, 1996). Los datos efectivos (trazo fino) de esta figura han sido adquiridos en una galería de mina granítica en modo de transmisión utilizando las antenas de 100 MHz (Tillard, 1991). La fuente radar intacta utilizada para la modelación es la misma que la utilizada en el caso de la figura 1(a). La frecuencia de referencia f_r ($\omega_r = 2\pi f_r$) para esta modelación ha sido escogida en el centro de la banda frecuencial, que en el caso de un granito alterado y fuertemente fracturado es más o menos de 40 MHz (Tillard, 1994). Utilizando la ecuación de la suma en j encontramos que la mejor semejanza entre las dos ondas simples (la modelada y la observada) aparece para un valor de $Q = 14$. Podemos ver que la señal que viajó más tiempo (2c) se volvió más ancha comparado tiene la de la figura 2a. Los espectros de amplitudes son presentados sobre las figuras 2b y 2d respectivamente, de donde se puede comprobar que el espectro de amplitud se desplazó hacia las frecuencias bajas cuando el tiempo de propagación aumentó. El pico de amplitud en el caso de la figura 2b aparece más o menos a la frecuencia de 30 MHz, mientras que en el caso de la figura 2d el pico se encuentra para una frecuencia inferior a 30 MHz (la señal se vuelve más ancha cuando el tiempo de propagación aumenta en un medio que absorbe).

Precisamos que la fiabilidad de la estimación del factor de calidad depende de la atenuación en si misma y del nivel del ruido presente sobre los datos efectivos. Así, el caso de un factor de calidad débil (atenuación elevada) será más fácil de calcular con una gran fiabilidad frente al caso de un factor de calidad elevado. Además, cuanto más elevado es el nivel del ruido, más problemático se hace el cálculo del factor de calidad. Para más detalles sobre los errores y la fiabilidad de cálculo del factor de calidad podemos referirnos a Jannsen (1985) y Tonn (1991).

Filtro inverso - Q en el caso de la propagación a 1D

Vimos anteriormente que tomando una función potencial compleja para la permitividad dieléctrica total, encontramos la expresión siguiente para la constante de propagación compleja k :

$$k = \frac{\omega}{V_r} \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right)^{\frac{n-1}{2}} \left\{ 1 + i \tan \left[\frac{\pi}{4} (1 - n) \right] \right\} = \beta(\omega) + i\alpha(\omega)$$

con

$$V(\omega) = V_r \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right)^{\frac{1-n}{2}}$$

donde $n = (2\pi)\text{atan}(Q)$, y $V(\omega)$ es la velocidad de fase de las ondas radar con V_r la velocidad de fase para la frecuencia de referencia arbitraria ω_r . Aquí $0 < n < 1$, donde el caso $n=1$

corresponde a un medio sin absorción no dispersión ($Q = \infty$, k real).

Supongamos que el campo eléctrico $E(x,z,\omega)$ sea polarizado según la dirección y ($E = (0, E_y, 0)$), y considerando el caso de la propagación a una dimensión (1D), la ecuación de Helmholtz llega a:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} = -k^2 E_y(z, \omega) = (ik)^2 E_y(z, \omega) = [i(\beta + i\alpha)]^2 E_y(z, \omega)$$

Esta ecuación tiene dos soluciones: $e^{ikz} = e^{i(\beta+i\alpha)z}$ y $e^{-ikz} = e^{-i(\beta+i\alpha)z}$, con k dado por la ecuación precedente. La primera solución es una onda que se propaga hacia abajo (z creciendo) y la segunda es una onda que se propaga subiendo hacia arriba (z decreciendo). Con el fin de compensar la atenuación (filtro inverso Q) de las ondas radar vamos a utilizar la segunda solución. La primera solución puede ser utilizada en el caso de la modelación directa del factor de calidad (ver párrafo anterior).

Por consiguiente, utilizando el número de onda k , proponemos un método de compensación para la atenuación (filtro inverso - Q) de los datos radar que es equivalente a una extrapolación (1D) hacia abajo del campo de onda ponderado en el dominio de frecuencia. El medio se supone de capas planas horizontalmente homogéneas. Pues el campo de onda $e_y(t=0, \Delta\tau)$ a una profundidad cualquiera Δz (o tiempo de trayecto $\Delta\tau = \Delta z/V_r$) compensado para la atenuación es dado por:

$$e_y(t=0, \Delta\tau) = \frac{1}{2\pi} \int E_y(\omega, \Delta\tau) G(\omega - \omega_r) d\omega$$

con

$$E_y(\omega, \Delta\tau) = E_y(\omega, 0) \exp(-ik\Delta z) = E_y(\omega, 0) \exp(-ikV_r \Delta\tau)$$

Donde $E_y(\omega, 0)$ representa la Transformada de Fourier (TF) en tiempo del campo de onda observado $e_y(t, z=0)$, y $G(\omega - \omega_r)$ es una función Gaussiana de ponderación que deja intactas las bajas frecuencias (inferiores a ω_r), pero que modifica las altas frecuencias (superiores a ω_r), y es dada por:

$$G(\omega - \omega_r) = \begin{cases} 1 & \text{para } |\omega| < \omega_r \\ \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_r)^2}{2s^2}\right] & \text{en otras partes} \end{cases}$$

Con s la anchura de la banda concurrencia frecuencial de los datos radar, y ω_r es escogido como igual a la frecuencia central de esta banda. La anchura de la banda s disminuye cuando el tiempo de trayecto aumenta, pues la frecuencia de referencia ω_r va a desplazarse hacia las frecuencias bajas y por consiguiente la función de ponderación será un filtro pasa bajo cuya banda frecuencial varía (disminuye) en el tiempo. Esta función de ponderación es necesaria a causa de las pérdidas de las frecuencias más elevadas que se atenuaron debajo del nivel de ruido. Por consiguiente, no podemos restituir esta parte de la banda frecuencial que es completamente destruida.

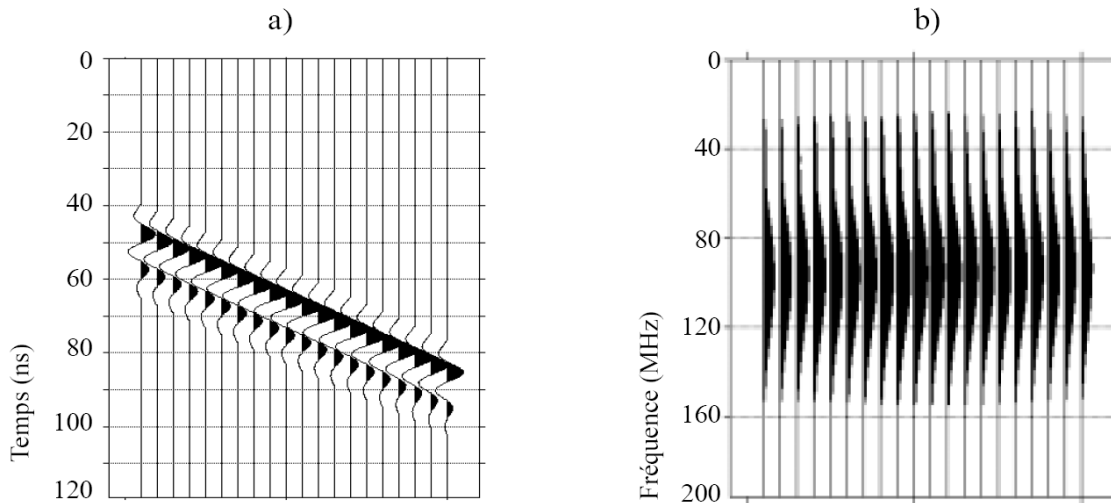


Fig. 3: a) Filtro inverso- Q de la figura 9, la señal radar es la misma para todos los rastros

b) Espectro de amplitud de a), la frecuencia central es más o menos de 95 MHz

La figura 3a muestra el resultado de la aplicación del filtro inverso Q a los datos sintéticos de la figura 1a. A partir de esta figura comprobamos que la amplitud y la forma de la señal radar son los mismos para todos los rastros y que el pico del espectro de amplitud se encuentra en una frecuencia central de 95 MHz (figura b), que es ligeramente inferior a 100 MHz (frecuencia central intacta de la señal).

Filtro inverso - Q en el caso de la propagación a 2D

Consideremos ahora el caso de la propagación a dos dimensiones (2D), la ecuación de Helmholtz se escribe:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} = -k^2 E_y(x, z, \omega) = (ik)^2 E_y(z, \omega) = [i(\beta + i\alpha)]^2 E_y(z, \omega)$$

Efectuando la TF de esta ecuación con respecto a x , podemos llegar fácilmente a:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} = (k_x^2 - k^2) E_y(k_x, z, \omega) = -k_z^2 E_y(k_x, z, \omega)$$

Donde $k_z = (k^2 - k_x^2)^{1/2}$, con $k = \beta + i\alpha$. Como en el caso 1D, esta ecuación tiene dos soluciones: $e^{ik_z z}$ y $e^{-ik_z z}$ (ver Claerbout, 1976). Para la puesta en imagen con el filtro inverso-Q en el caso de la propagación 2D (o migración con el filtro inverso-Q) vamos a utilizar la segunda solución.

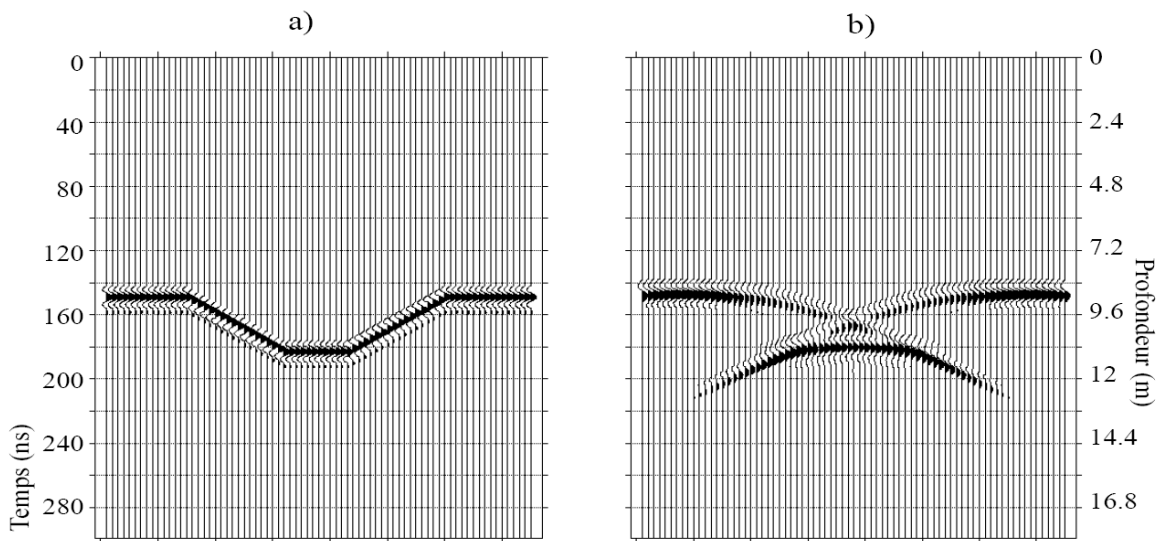
El método de migración con el filtro inverso-Q desarrollado aquí es semejante a la migración por fase-shift para un campo de ondas ponderado. Pues, el campo de ondas $E_y(k_x, \Delta\tau)$ a una profundidad cualquiera Δz (o tiempo de trayecto $\Delta\tau = \Delta z/V_r$) puesto en imagen con este filtro es dado por:

$$E_y(k_x, \Delta\tau) = \frac{1}{2\pi} \int E_y(k_x, \Delta\tau, \omega) G(\omega - \omega_r) d\omega$$

con

$$E_y(k_x, \Delta\tau, \omega) = E_y(k_x, 0, \omega) \exp(-ik_z \Delta z) = E_y(k_x, 0, \omega) \exp(-ik_z V_r \Delta\tau)$$

$G(\omega - \omega_r)$ es la misma función de ponderación que en el caso 1D, y $E_y(k_x, 0, \omega)$ representa la TF 2D del campo observado de ondas $e_y(x, z=0, t)$ en $z=0$. Por consiguiente, repitiendo la solución de estas dos ecuaciones para cada paso en tiempo $\Delta\tau$, podemos calcular el campo de ondas $E_y(k_x, \tau)$ migrado con el filtro inverso-Q. Una TF inversa de $E_y(k_x, \tau)$ con respecto a k_x nos da la imagen del campo de ondas $e_y(x, \tau)$ obtenida con el filtro inverso-Q. Sin embargo, como lo explico Berkhout (1981), este método no es estable para altas frecuencias y para ángulos de pendiente elevados. Pues, en este caso, los datos van a ser sobre amplificados por la multiplicación con las funciones exponenciales $e^{-ik_z \Delta z}$, lo que puede dar imágenes erróneas en el caso de los datos con ruido.



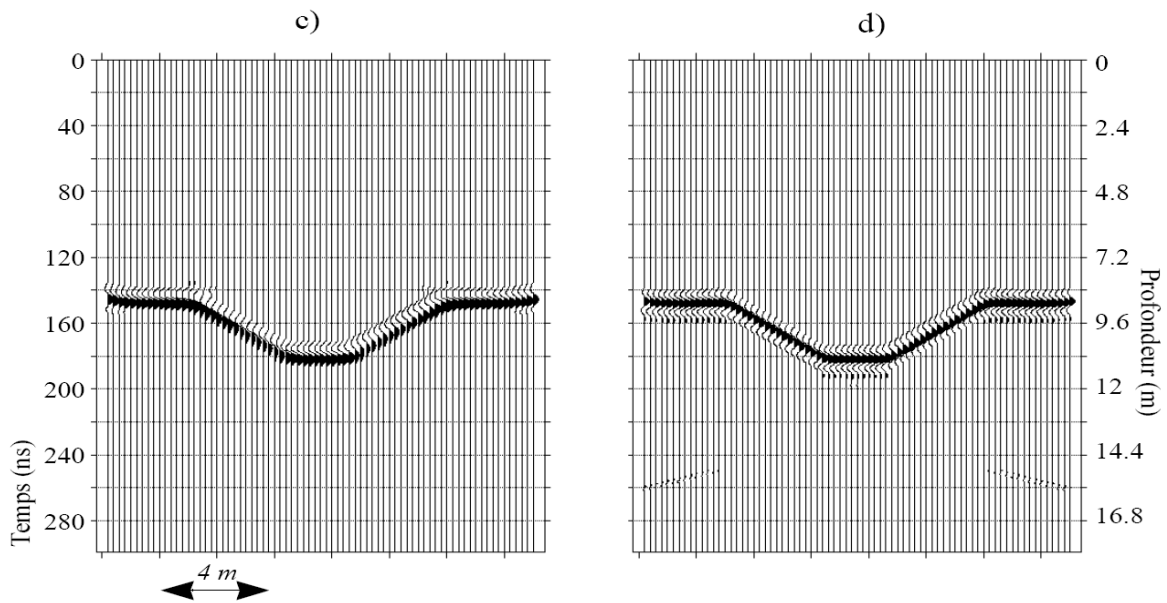


Fig. 4: a) Modelo geológico (en tiempo) en convolución con una impulsión radar de frecuencia 100 MHz. b) Modelización del modelo anterior con $Q = 20$ y $V_r = 0.12$ m/ns. c) Migración mediante el método de Stolt de b) con una velocidad constante igual a V_r . d) Migración con el filtro inverso- Q de b) con $Q=20$ y V_r igual.

En la práctica, una alternativa para eliminar esta inestabilidad es utilizar un filtro espacial pasa bajo (referirse a *Berkhout, 1981*). Por consiguiente, con el fin de que este método se haga estable utilizamos un filtro espacial pasa bajo en el cual el ángulo de pendiente varía de $\pi/2$ para $z = 0$ a 0 para $z = z_{máx}$ (*Levin, 1984 ; Claerbout, 1985*). La ausencia de función de ponderación $G(\omega-\omega_r)$ y un valor real del número de onda ($k = \omega/V_r$) en las ecuaciones anteriores nos lleva exactamente al método de migración por fase-shift (*Gazdag 1978, Claerbout 1985*).

Un ejemplo numérico de la migración con filtro inverso- Q aparece en la figura precedente. La figura a) representa un modelo sintético en el tiempo con convolución con una señal radar de frecuencia central de 100 MHz. La modelización directa con los valores dados de Q y V_r esta presentado en la figura b). Esta figura representa un perfil radar sintético a zero-offset (monástico) obtenido supuestamente mediante una pareja fuentes-receptores confundida (a la misma posición), desplazándose sobre la superficie de la tierra. La figura c) muestra la migración de los datos b) utilizando un método clásico (*Stolt, 1978*) con una velocidad constante de 0.12 m / ns. La migración con filtro inverso- Q con un valor de $Q = 20$ y $V_r = 0.12$ m/ns esta presentado en la figura d). A partir de esta figura comprobamos que la forma de la señal casi es la misma que la de la señal intacta de la figura a).

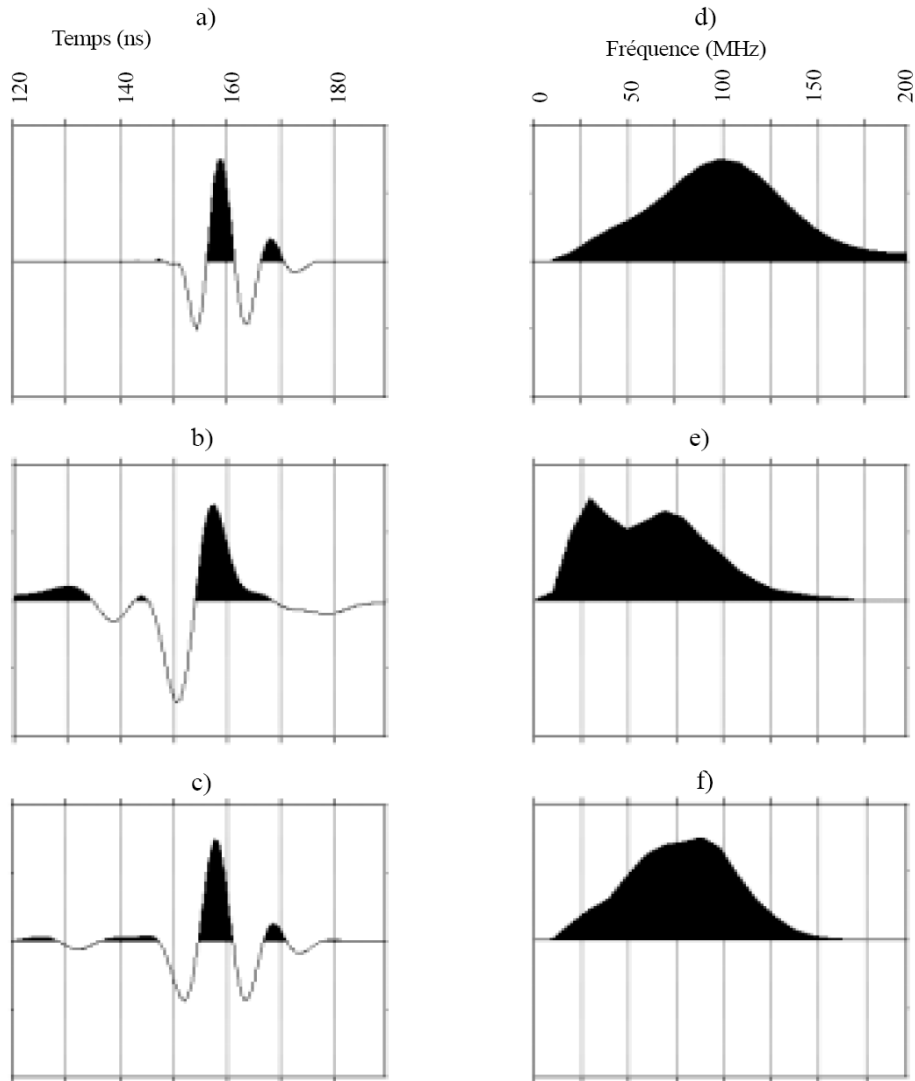


Fig. 5: a) Señal radar intacto del 20º rastro de la figura 12a con una frecuencia central de 100 MHz. b) Señal radar del 20º rastro de la figura 12c (tras migración de Stolt). c) Señal radar del 20avo rastro de la figura 12d (tras migración con filtro inverso- Q). d), e) et f) representan el espectro de amplitud respectivamente de a), b) y c).

El método de migración con filtro inverso- Q presentado más arriba tiene en cuenta no sólo de un modelo a velocidad variable con la profundidad (como para la migración clásica por fase-shift) sino también de un modelo horizontalmente estratificado a Q variable en profundidad (modelo horizontalmente homogéneo). Así como anteriormente, la frecuencia de referencia ω_r se escoge al centro de la banda concurrida de los datos radar. Ya que la anchura de esta banda disminuye cuando el tiempo de trayecto aumenta, la frecuencia de referencia se desplaza hacia las frecuencias bajas.

La figura 5 representa la comparación entre la señal radar obtenida después de la aplicación de la migración de Stolt (5b) y la migración con filtro inverso - Q (5c) respectivamente. La señal radar intacta del veinteavo rastro de la figura 4a esta presentada en la figura 5a. Los espectros de amplitud de cada onda simple respectivamente son presentados sobre las figuras 5d, 5e y 5f. La

amplitud de la onda simple 5b es normalizada por su valor máximo, y su espectro de amplitud está calculado a partir de la onda simple normalizada (figura 5a). A partir de la figura 5b está claro que después de la migración de Stolt, la forma de la señal ha sido cambiada, y que la señal ha sido transformada en una señal a fase mixta cuya frecuencia dominante es inferior a 70 MHz (5e); lo que implica un desplazamiento del espectro de amplitud hacia las frecuencias bajas. Después de la migración con filtro inverso- Q podemos observar que la forma de la señal (5c) casi es la misma que la de la señal intacta (5a), pero su banda frecuencial es más pequeña y la frecuencia dominante es de 90 MHz (inferior a los 100 MHz). Tal efecto se explica por la aplicación de la función de ponderación cuya anchura de la banda frecuencial disminuye en el tiempo (filtro pasa bajo variable en el tiempo).

Anexo 3: Parámetros de configuración por defecto de las antenas utilizadas

- **1.5 GHz (Modelo 5100)**

Antenas acopladas de 1.5 GHz. La profundidad de visualización de las imágenes es aproximadamente de 50 cm en el hormigón.

Range: 12 ns

Samples per Scan: 512

Resolution: 16 bits

Number of gain points: 5

Vertical High Pass Filter: 250 MHz

Vertical Low Pass Filter: 3000 MHz

Scans per second: 100

Vertical IIR High Pass $N=2F=10$ MHz

Transmit Rate: 100 KHz

- **900 MHz (Modelo 3101D)**

Antenas acopladas de 900 MHz. La profundidad de visualización de las imágenes es aproximadamente de 1 m asumiendo una constante dieléctrica de 5.

Range: 15 ns

Samples per Scan: 512

Resolution: 16 bits

Number of gain points: 2

Vertical High Pass Filter: 225 MHz

Vertical Low Pass Filter: 2500 MHz

Scans per second: 120

Transmit Rate: 100 KHz

- **400 MHz (Modelo 5103)**

Antenas acopladas de 400 MHz. La profundidad de visualización de las imágenes es aproximadamente de 3 m asumiendo una constante dieléctrica de 5.

Range: 50 ns

Samples per Scan: 512

Resolution: 16 bits

Number of gain points: 3

Vertical High Pass Filter: 100 MHz

Vertical Low Pass Filter: 800 MHz

Scans per second: 120

Transmit Rate: 100 KHz

Anexo 4: Especificaciones de la Unidad Central SIR-3000

Antenas: Compatible con todas las antenas GSSI

Numero de canales: 1

Almacenamiento de datos:

- Memoria Interna 1 GB Compact Flash Memory Card
- Compact Flash puerto: Accepts industry standard Compact Flash memory or IBM Microdrive up to 2 GB (user provided)

Procesador: 32-bit Intel StrongArm RISC processor, 206 MHz

Pantalla: Mejorada 8.4" TFT, 800 × 600 resolución, 64K colors
Linescan and O-scope display modes.

Input/Output:

- Antenna input (control cable)
- DC power
- Ethernet I/O
- RS232 Serial I/O (GPS port)
- Compact Flash memory
- USB master
- USB slave

Tamaño:

- Dimensiones: 31.5 cm × 22 cm × 10.5 cm (2.4" × 8.7" × 4.1")
- Peso: 4.1 kg (9 lbs) incluyendo baterías

Sistema operativo:

- Temperatura: -10°C to 40°C
- Requerimientos de carga: 15 V DC, 4 amps
- Batería: 10.8 V DC, internal
- Tasa de transferencia: hasta 100 KHz

Nota: El SIR-3000 no funciona con el cable de control corto atenuado (color naranja) que se suministraba con el SIR-2000. El SIR-3000 solo funcionará con cables no atenuados (colores azul o negro).