

# Aplicación del Geo-Radar 3D Multifrecuencia como Herramienta de Alto Rendimiento para la Detección de Zonas de Acumulación de Humedad en Obras Lineales.



Application of Multifrequency Georadar 3D as a High-performance Tool to Detect Areas of Humidity Concentration in Linear Projects

**Raúl Mínguez Maturana**  
Geofísica Aplicada Consultores, S.L.

## Resumen

**D**urante la última década se ha producido un notable crecimiento en el número de infraestructuras lineales, tanto carreteras como líneas férreas, en funcionamiento en nuestro país. Este aumento del número de kilómetros de carreteras y vías férreas consecuentemente conlleva un aumento en los costes de mantenimiento y por tanto necesitan de herramientas que permitan, de forma rápida y continua, evaluar las condiciones de deterioro de la vía con el objeto de reducir los costes de mantenimiento y aumentar las condiciones de seguridad. Las acumulaciones de humedad suelen aumentar la velocidad de deterioro de la infraestructura. En esta ponencia se propone el Geo-radar 3D multifrecuencia como una herramienta de apoyo a las auscultaciones de la vía que permite la detección de zonas de acumulación de humedad en las capas que conforman la vía hasta profundidades de entre 1 y 2 metros. El GPR 3D permite determinar zonas de acumulación de humedad a velocidades de trabajo de hasta 100 Km/h recolectando datos cada pocos centímetros. La utilización de esta tecnología de detección durante los trabajos de construcción de la carretera permitiría reducir los costes mantenimiento asociado a zonas de mal drenaje del terreno reduciendo significativamente los costes a su detección y remediación cuando la infraestructura ya está en funcionamiento.

**PALABRAS CLAVES:** Geo-radar, Auscultación, Drenaje

## Abstract

**D**uring the last decade there has been a remarkable growth in the number of linear infrastructures, both roads and railway lines, operating in our country.

This increase in the number of kilometers of roads and railways consequently leads to an increase in maintenance costs and therefore some tools are required to measure roadway deterioration, in a quickly and continuous way, in order to reduce maintenance costs and to increase safety conditions.

Humidity concentration usually increases the rate of infrastructures damage. This paper proposes the multifrequency Georadar 3D as a tool to support roads auscultations to determine humidity concentration areas in the layers of roads at depths of up to 1 to 2 meters.

The Ground Penetrating Radar (GPR) 3D allows us to determine areas of humidity at speeds of up to 100 km / h, collecting data every few centimeters. The use of this detection technology for the construction of roads would reduce the maintenance costs in badly drained areas, reducing significantly the costs when it is detected and resolving the problem when the infrastructure is already operational.

**KEY WORDS:** Geo-radar, Auscultation, Drainage

## 1. Metodología: El Geo-radar

El geo-radar es una técnica geofísica somera capaz de generar una pseudo-imagen 2D y 3D de alta resolución de la estructura del subsuelo. La ventaja, respecto a otras técnicas convencionales de evaluación que se utilizan en la actualidad, como sondeos, calicatas, etc., es que se trata de un método de investigación no invasivo, versátil y rápido en su ejecución lo que permite un barrido continuo de la carretera a velocidades de adquisición de hasta 100 km/h.

Su funcionamiento consiste en la irradiación al terreno de un pulso electromagnético, entorno a una frecuencia predominante, que determina la resolución y la máxima profundidad de investigación. Cuando la onda encuentra un cambio en las propiedades del medio, por ejemplo, en la interfase capa intermedia - sub-base, parte de la energía se refleja a la superficie y parte se transmite hacia profundidades mayores.

La velocidad de propagación de la onda depende de una serie de propiedades que producen pérdidas por absorción y dispersión de la señal, lo cual puede traducirse en variaciones en las condiciones de la infraestructura. Los parámetros más habituales que se pueden investigar con geo-radar en aplicaciones de carreteras son:

- Espesores de las diferentes capas que conforman la carretera (rodadura, intermedia, sub-base, etc.)
- Defectos en las capas de aglomerado (despegues, roderas, etc.)
- Huecos
- Posibles zonas de asentamiento
- Acumulaciones de humedad

La humedad es uno de los parámetros que más afecta al pulso de geo-radar (Huisman et al., 2003), provocando una disminución considerable de la velocidad de propagación del pulso. Se traduce en la aparición de reflectores de mayor amplitud y en una atenuación de las altas frecuencias. Mediante el análisis de estos parámetros de la señal de geo-radar se pueden detectar variaciones en la humedad.

Tabla 1

| MATERIAL       | CONSTANTE DIELECTRICA | VELOCIDAD m/ns | ATENUACIÓN db/M |
|----------------|-----------------------|----------------|-----------------|
| Aire           | 1                     | 0,30           | 0               |
| Agua destilada | 80                    | 0,033          | 0,002           |
| Agua dulce     | 80                    | 0,033          | 0,1             |
| Agua salada    | 80                    | 0,01           | 1000            |
| Arena seca     | 3-5                   | 0,15           | 0,01            |
| Arena húmeda   | 20-30                 | 0,06           | 0,03-0,3        |
| Caliza         | 4-8                   | 0,12           | 0,4-1           |
| Pizarra        | 5-15                  | 0,09           | 1-100           |
| Limo           | 5-30                  | 0,07           | 1-100           |
| Arcilla        | 5-40                  | 0,06           | 1-300           |
| Granito        | 4-6                   | 0,13           | 0,01-1          |
| Sal seca       | 5-6                   | 0,13           | 0,001-1         |
| Hielo          | 3-4                   | 0,16           | 0,001           |

A continuación se muestra una tabla con diferentes parámetros que afectan al pulso del georadar para distintos medios y materiales (Davis et al., 1989).

Si nos centramos en los valores de la constante dieléctrica y la velocidad de propagación, se observa que el aire y el agua representan los valores extremos de la tabla y, entre ellos, aparece un amplio abanico de materiales con valores de constante dieléctrica entre 3 y 20, y velocidades entre 0,6 y 0,15 m/ns.

## 2. Antenas de Geo-radar tridimensional multifrecuencia

Este tipo de antenas de geo-radar, en comparación con las antenas convencionales, en lugar de emitir un único pulso de geo-radar centrado en una frecuencia determinada (dominio de tiempos), emite una radiación continua a diferentes frecuencias, estudiando la amplitud de señal recibida para cada frecuencia emitida (dominio de frecuencias). Convirtiendo la información del dominio de frecuencias al dominio de tiempos mediante la transformada inversa de Fourier, se obtienen radargramas en 3D de alta resolución. Esta forma de medir permite la adquisición de datos en un rango de profundidades de investigación que abarca desde unos pocos centímetros a varios metros,

manteniendo en cada caso una óptima resolución del modelo a cada nivel de profundidad.

En los trabajos que se describen en esta ponencia se ha utilizado un equipo del fabricante noruego 3D-Radar que consiste en una antena de 29 sensores con un rango de muestreo desde 100 MHz a 3 GHz. A ella se conecta un GPS de precisión centimétrica

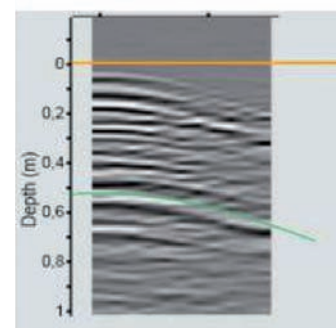
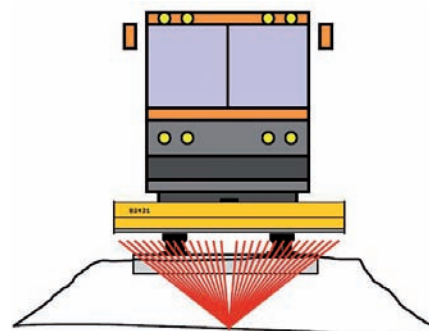


Figura1: Arriba, diagrama de trayectorias de disparo de los pulsos de geo-radar en un ensayo CMP iluminando el mismo punto desde diferentes ángulos (posición de cada uno de los sensores). Abajo, radargrama correspondiente a un ensayo CMP. La línea verde marca la hipérbola del reflector de la capa sub-base. La forma de esta hipérbola determina la velocidad de transmisión del pulso.

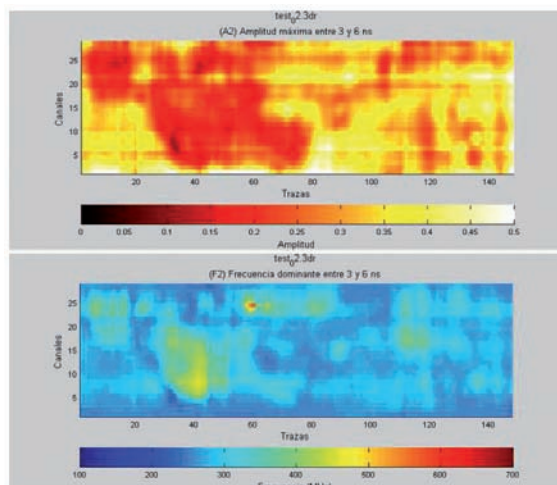


Figura 2 : Arriba, sección en planta correspondiente a la amplitud máxima para una ventana de tiempo de 3 a 6 ns. Abajo, sección en planta correspondiente a la distribución de la frecuencia dominante en la misma ventana de tiempo.

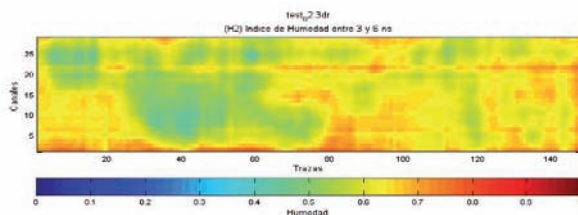


Figura 3 : Índice de humedad. Resulta de la integración de la información de la amplitud y la frecuencia. En las zonas húmedas concurren las zonas de baja frecuencia y alta amplitud, marcadas por colores verdes y azules.

la amplitud de los reflectores.

En la figura 2 se muestra un análisis de amplitudes y frecuencias para un tramo de calle asfaltada en la que una parte fue saturada con agua. La figura superior corresponde al cálculo de la amplitud máxima para una ventana de tiempo de entre 3 y 6 ns, equivalente a una profundidad de entre 0 y 15 cm aproximadamente. Las zonas rojas indican una menor reflectividad y representarían las zonas más secas. La figura inferior representa el espectro de frecuencias dominante para la misma ventana de tiempo. En este caso, los tonos azules (frecuencias más bajas) corresponderían con un mayor grado de humedad.

Combinando la información de las amplitudes y de las frecuencias se obtiene un índice que nos aporta información sobre las variaciones de humedad de la capa de asfalto y capas infrayacentes. Así, por ejemplo, las zonas que presentan baja amplitud y alta frecuencia corresponderían con las zonas más secas y, en cambio, las zonas de baja frecuencia y alta reflectividad representarían zonas de mayor humedad. (Figura 3).

### 3. Casos prácticos

A modo de ejemplo se van a describir tres casos prácticos de aplicaciones del geo-radar 3D en carreteras, donde se ilustra la capacidad de esta herramienta para la detección de zonas de acumulación de humedad.

1) El primer ejemplo muestra la capacidad del geo-radar para detectar acumulaciones de humedad en las diferentes capas que componen la estructura de un firme. El tramo investigado corresponde a un tramo de pruebas en el que la estructura del firme consiste en capa de rodadura de 5 cm de espesor, capa intermedia de 15 cm, suelo cemento de 40 cm y explanada mejorada a una profundidad de 60 cm. En este tramo de pruebas se utilizaron tres tipos de sub-bases: La primera de ellas corresponde a una mezcla de suelo cemento de baja rigidez, la segunda corresponde a un

para la referenciación de los datos de geo-radar. Cada sensor se encuentra separado del adyacente a 7,5 cm, por lo que en una única pasada es capaz de muestrear un ancho efectivo de 2,1 metros. La información de cada uno de los perfiles de geo-radar se integra en un modelo tridimensional que se genera, en tiempo real, conforme se produce la adquisición de datos. Estos modelos 3D facilitan la identificación de estructuras y de las posibles patologías que le afecten, su posición, dimensiones, etc.

Utilizando los sensores de la antena para iluminar el mismo punto, desde diferentes ángulos (ensayo CMP), se puede determinar la velocidad de transmisión del pulso de geo-radar a lo largo de un perfil. En la figura 1 se muestra un ejemplo de un ensayo

CMP realizado con la antena Geo-radar 3D aplicado a la auscultación de una carretera.

Las limitaciones de los ensayos de CMP residen en la necesidad de que existan buenos reflectores para poder identificar las hipérbolas y, por tanto, poder estimar la velocidad a partir de ellas. Conocer con precisión este parámetro permite detectar de forma precisa los espesores de capas, estimar variaciones de humedad, etc.

Una de las consecuencias del aumento de la humedad en la señal de geo-radar, es una atenuación de las altas frecuencias. Por lo tanto, para estudiar este fenómeno es conveniente disponer de una señal con un espectro de frecuencias lo más amplio posible. Un efecto que se solapa a la pérdida de altas frecuencias es el aumento de

suelo cemento de alta rigidez y la tercera consiste en unas arenas sin suelo cemento.

En la figura 4 se muestra el radargrama correspondiente al canal central de la antena y la sección en planta correspondiente a la zona de contacto entre la capa intermedia y la sub-base. Analizando la morfología y la reflectividad del reflector correspondiente a la base de la capa intermedia, se observa como:

- El primer tramo de suelo cemento de baja rigidez presenta una morfología ondulada y una alta reflectividad, lo cual indica que, a favor de este contacto, se acumula humedad.
- El segundo tramo, correspondiente al suelo cemento rígido, también se observa una alta reflectividad, pero en este caso se aprecia como la deformación que soporta esta capa se libera de forma frágil mediante roturas.
- En el último tramo, correspondiente a las arenas, se aprecia una fuerte pérdida de reflectividad, lo que indica que el contacto entre la capa intermedia y las arenas presenta poca humedad. En este caso la permeabilidad de las arenas hace que la humedad se acumule en la explanada mejorada.
- La zona de suelo cemento, debido a su carácter impermeable, impide que la humedad llegue a la explanada mejorada, haciendo que el reflector que marca el techo de la misma sea muy tenue.

La figura 5A presenta un radargrama de amplitudes en valor absoluto en el que los colores rojos y anaranjados se corresponden con bajas reflectividades, y los colores azules con altas reflectividades. La figura 5B corresponde a una sección en planta en la que se muestra la amplitud correspondiente al reflector de la base de la capa intermedia. La alta reflectividad de las zonas de suelo cemento (colores azules) marcan la acumulación de humedad. La figura 5C trata de una sección en planta que muestra la amplitud del reflector de la capa de

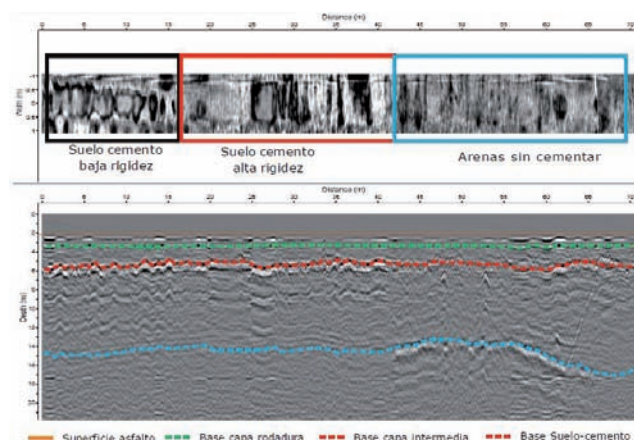


Figura 4 : Arriba. Sección en planta correspondiente a la zona de contacto entre la capa intermedia y la sub-base. Abajo. Radargrama correspondiente al canal central de la antena e interpretación de la estructura.

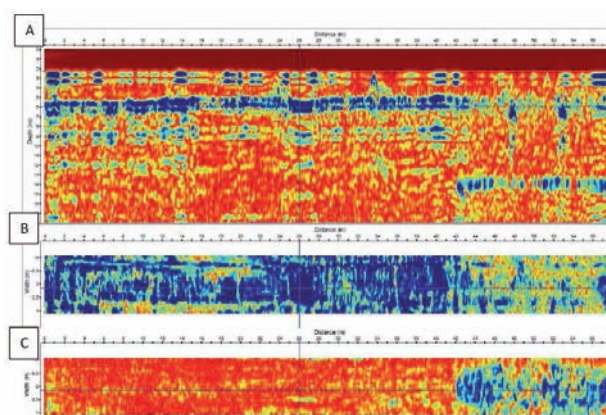


Figura 5 : A. Radargrama de amplitudes absolutas correspondiente al canal central de la antena. Los colores rojos y anaranjados se corresponden con bajas reflectividades y los colores azules con altas reflectividades. B. Sección en planta correspondiente a la profundidad a la que se encuentra el reflector de la base de la capa intermedia. C. Sección en planta correspondiente a la profundidad a la que se encuentra el reflector de la explanada mejorada.

explanada mejorada, donde los tonos azules indican una mayor amplitud, lo que coincide con las zonas de acumulación de humedad.

2) El segundo ejemplo corresponde a un tramo de autopista donde se vienen produciendo procesos de asentamiento (figura 6). El modelo 3D de geo-radar muestra como en la zona de asentamiento existe un antiguo parche de una reparación previa. Además se observa como las diferentes campañas de asfaltado, realizadas para nivelar la zona hundida, han provocado que el espesor de asfalto se haya incrementado en 20 cm, desde los 15 cm iniciales a los 35 cm finales. Analizando la morfología del reflector

de la base de la capa intermedia, se aprecia como la máxima deformación se concentra en la parte superior del modelo tridimensional.

Si extraemos una sección de la zona en la que se hace más intensa la deformación, se aprecia como aparece una zona de alta reflectividad y en su entorno, una fuerte atenuación de las altas frecuencias. Esta intensa atenuación de las altas frecuencias indica que la zona presenta un alto grado de humedad. En cambio, los reflectores caóticos de altas frecuencias y amplitudes indican la presencia de una zona de huecos (lavado de finos). Es este el proceso que está produciendo los

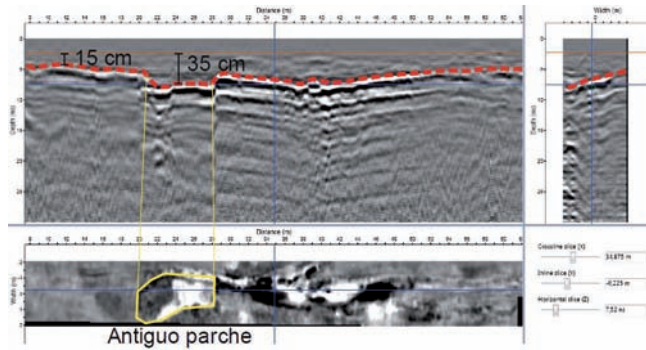


Figura 6 : Modelo tridimensional de geo-radar correspondiente a un tramo de autopista que ha sufrido asentamientos. La línea roja discontinua marca la base de la capa intermedia, que presenta un espesor que varía entre 15 y 35 cm. En la sección en planta (abajo) se aprecia el contorno de una antigua reparación en el firme. En la sección transversal (arriba derecha) se puede observar la dirección de máxima deformación.

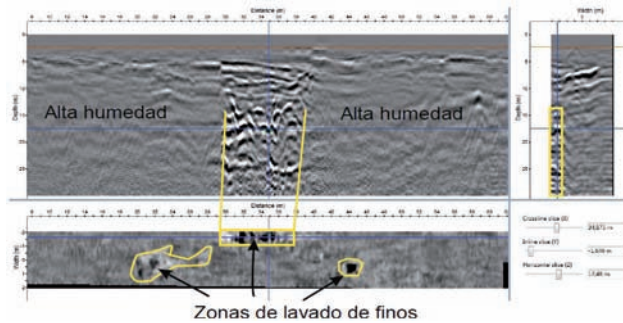


Figura 7 : Vista diferente del modelo tridimensional de la figura 6 en el que se observa una zona de lavado de finos con presencia de huecos, coincidiendo con la zona de mayor espesor de aglomerado.

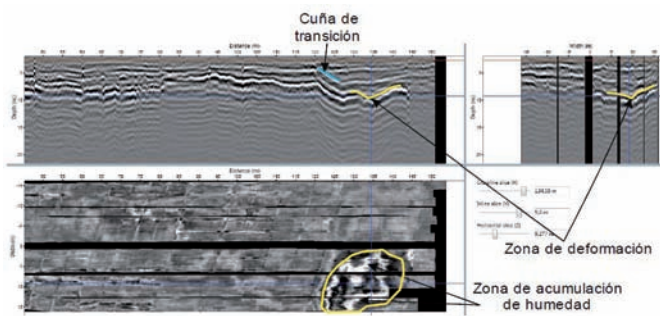


Figura 8 : Modelo tridimensional de geo-radar correspondiente a un puente de dos tableros y los estribos. En la sección longitudinal y transversal (arriba) se marca con una línea amarilla la zona deformada. En la sección en planta (abajo) se marca con un contorno de color amarillo una zona de alta reflectividad y baja frecuencia que se corresponde con una acumulación de humedad.

- Analizando el estribo norte no se observan acumulaciones de humedad ni deformaciones de las capas inferiores.

#### 4. Conclusiones

1. El pulso de geo-radar es muy sensible al contenido de humedad de los materiales, lo cual afecta a las frecuencias del pulso, la reflectividad y su velocidad de propagación.

2. El geo-radar 3D multifrecuencia permite, frente a geo-radares 2D convencionales, analizar con mayor eficiencia el espectro de frecuencia y estimar la velocidad de tránsito del pulso de geo-radar en el medio. Montado en un vehículo con GPS, lo convierte en una herramienta muy eficiente capaz de detectar acumulaciones de humedad en las capas del firme hasta profundidades de investigación de 2 metros y a velocidades de adquisición de datos de hasta 100 km/h.

3. El análisis tridimensional de los modelos de geo-radar permite estudiar con mayor detalle la estructura del firme e identificar los procesos que generan las patologías.

4. Por último, un mejor conocimiento de la estructura y del estado del firme resulta crucial para comprender y predecir su evolución temporal. De este modo se puede planificar en el futuro, incluso antes de que una patología se manifieste, los trabajos de mantenimiento, reduciendo los costes y aumentando la operatividad y seguridad de las infraestructuras afectadas.

#### Referencias

- [1] Huisman, J.A., Hubbard, S.S., Redman, J.D. and Annan A.P. Measuring Soil water Content with Ground Penetrating Radar: A Review. Vadose Zone Journal, 2:476-491 (2003). Soil Science Society of America.
- [2] Davis, J. L., and Annan, A. P., 1989. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical prospecting, Vol. 37, p. 531-551. ♦

asentamientos del firme. Únicamente actuando sobre el origen del problema o patología se podrá reparar el tramo de autopista afectado de una forma eficaz y duradera.

3) En el último ejemplo (figura 8) se muestra la capacidad del geo-radar tridimensional para la detección de zonas de acumulación de humedad antes de que estas generen patologías de importancia. En este caso, se inves-

tigó un puente de dos tableros.

- Analizando la zona de los estribos se puede apreciar como en el estribo sur aparecen reflectores de alta reflectividad y baja frecuencia que indican la acumulación de humedad. Además, se observa como los reflectores de la subbase se encuentran deformados aunque la deformación no ha progresado aún hacia las capas superiores.