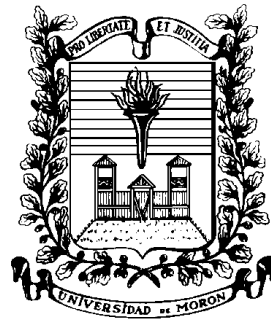


## UNIVERSIDAD DE MORON



*Facultad de Ingeniería*

### **Aplicaciones del Georadar en localización de estructuras Arquitectónicas enterradas**

Autor: Agrim. Mario Roberto Caccia  
Tutor: Ing. Joaquín R. Cardoso

## **Resumen**

El método de prospección con radar de subsuelo es relativamente reciente, aproximadamente comienza a aplicarse en los años 70 las más fecundas en cuanto a diversidad de aplicaciones y a desarrollarse el método de estudio, el tratamiento de datos y de los equipos.

El estudio se realiza en un medio sencillo y homogéneo, siendo la profundidad de estudio de un metro o más para casos de estudios someros, pudiendo alcanzarse profundidades de alrededor de 40 metros operando con frecuencias bajas, en el caso de estudios en glaciares y fondos de lagos de agua dulce su penetración puede alcanzar varias centenas de metros. Un caso de estudio consiste en la localización de muros enterrados en un terreno seco. Otros estudios inmediatamente posteriores se aplican también a la localización de estructuras arquitectónicas enterradas a poca profundidad, generalmente en suelos secos.

En los casos que describo en este trabajo las características del terreno hacen que los resultados de estas investigaciones sean satisfactorios. Se han podido localizar tumbas y elementos arquitectónicos. Se aplica a un terreno húmedo y no homogéneo, formado básicamente por depósitos de playa y bloques rocosos.

Es el primer estudio aplicado a arqueología que se realiza en un medio complejo. Las anomalías localizadas en este caso no superan los dos metros de profundidad. Las conclusiones a que se arriban son de cierto interés, como por ejemplo, que los elementos del interior de las tumbas (huesos y adornos metálicos) no presentan suficiente contraste con los materiales del medio para que se puedan identificar como anomalías.

Sin embargo, la alteración del terreno que produce un enterramiento sí que se observa claramente en los registros como una anomalía.

## **Abstract**

---

The methodology of radar prospection is relatively recent, it approximately begins in early 70s and since that time the diversity of applications are increasing as a non destructive methodology of study od soil and materials.

The study is simple, fast and it implies a non destructive study, being the depth of application within a range of distances ranging from few centimeters to several tenths of meters. In the study of lakes and glaciers the depth of study could range to several hundreds of meters. The case of study we will explain here mainly consists of the location of walls buried in a dry land. Other studies also apply to the location of architectonic structures buried within a little depth, generally in dry grounds.

The results we can expect from these studies are normally satisfactory. Using this methodology it has been possible to locate tombs and architectonic elements. It is applied to a humid and no homogenous land, formed basically by deposits of beach and rocky blocks.

As an example of the application of this geophysical tool we summarize the first archaeological study applied in our country to Fuerte Barragan and the Basílica de Lujan. The anomalies located in this study do not exceed a couple of meters of depth. The conclusions to what are arrived are of certain interest, like for example, that the elements of the interior of the tombs (bones and metallic objects) do not present/display enough contrast.

## **Prefacio:**

El presente trabajo tiene como objeto entregar al lector la descripción de las tareas de campo y de gabinete que se utilizan en la prospección con georadar. Técnica poco difundida y utilizada en nuestro país, pero que constituye una herramienta de trabajo muy importante. Debido que puede aportar información relevante del subsuelo, de interés no solo geofísico sino también histórico.

Para su confección, el autor consideró diversos trabajos realizados por Universidades, tanto nacionales como internacionales,.

Asimismo se integra en el presente trabajo las tareas efectuadas por la Empresa Area Geofisica en el Fuerte Barragán Ensenada y en la Basílica de Lujan de la Provincia de Buenos Aires.

Dedicado a mi querida esposa, mis hijas Romina Mariela y Nora Lis, quienes me brindaron el amor, el apoyo, el optimismo y la confianza necesarios para alcanzar los objetivos del presente desafío.

A mi nieta, Ana Belen, la estrella más hermosa del universo.

Agradecimientos:

En particular a mi gran amiga la Ing. Agrim. Palmira Adriana Russo que me apoyo permanentemente y me instó a seguir adelante, en general, agradezco a todas las personas de mi entorno, que me han ayudado y estimulado a emprender esta nueva etapa que he decidido iniciar, a pesar de la edad cronológica.

Por sobre todo mi agradecimiento y admiración al Ingeniero Geodesta Geofisico Joaquín Cardoso, quien nos motivó a introducirme en esta nueva disciplina, logrando en mí, un inesperado interés en ella. Esto es el resultado que logran los docentes, que merecen llamarse, grandes maestros de la docencia.

A la licenciada Andrea del Pino, por todo su apoyo y estímulo para continuar con mi proyecto.

A la Empresa Area Geofisica que me brindó su apoyo disponiendo de los informes de las tareas efectuadas en el Fuerte Barragán de Ensenada y en la Basílica de Luján de la Provincia de Buenos Aires.-

## 1.1 Diferentes designaciones de Georadar

Radar es el acrónimo de **R**adio – **D**etection - **A**nd – **R**anging, cuyo significado es radio detección y medición. El Georadar resulta entonces un instrumento para estudio del terreno u otros elementos materiales utilizando esta tecnología.

También recibe otras designaciones, a saber:

GPR ground penetrating radar

GEORADAR

Radar penetrante

Radar de terreno

## 1.2 Introducción

El radar de subsuelo es un método de prospección basado en la emisión y propagación de ondas electromagnéticas en un medio, con la posterior recepción de las reflexiones que se producen en sus discontinuidades. Estas discontinuidades son cambios bruscos de los parámetros electromagnéticos del subsuelo, es decir, de la conductividad, la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética. Los registros que se obtienen son similares a los obtenidos cuando se realizan estudios de 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 pulsos se puede realizar muy rápidamente.

Por este motivo, aunque se trata de registros puntuales (trazas), los radargramas pueden llegar a considerarse casi registros continuos. La información que estos radargramas aportan es variada, pero principalmente se trabaja con tiempos de llegada. El tipo de estudio de subsuelo más básico consiste en determinar velocidades de propagación promedio y, junto con los tiempos de propagación registrados para cada evento, localizar la discontinuidad en la que se ha producido la reflexión, determinando tanto su situación

horizontal como la profundidad a la se encuentra. La profundidad que se puede alcanzar depende tanto de las condiciones de medio analizado como del equipo utilizado. En los casos que se presentan en este trabajo no se superan los 10 m. de profundidad, tratándose en todos los casos de estudios superficiales del medio.

Los radargramas también pueden aportar información si analizamos las amplitudes de los distintos eventos. Este parámetro y la velocidad dependen del medio y permiten caracterizarlo.

Se trata, simplificando mucho, de una técnica no destructiva que utiliza ondas electromagnéticas para determinar superficies reflectoras en el interior de los medios. El equipo consiste en un sistema de control (computadora) conectado a unas antenas que se desplazan sobre la superficie del medio que se desea analizar.

Estas antenas son las encargadas de emitir energía hacia el interior del medio y de registrar las ondas que provienen de las reflexiones producidas en las discontinuidades interiores.

El desarrollo que han experimentado las técnicas de prospección con radar de subsuelo ha ampliado los campos de aplicación abriendo las puertas a nuevos estudios y posibilidades. Debido al gran interés en los estudios superficiales altamente resolutivos del subsuelo este desarrollo se está realizando muy rápidamente. Las cada vez más numerosas aportaciones que se realizan en este campo contribuyen a este espectacular avance. Son muchos los ejemplos de estos aportes que van desde estudios de casos concretos hasta simulaciones por ordenador, pasando por ensayos experimentales y desarrollo de programas informáticos y de equipos. En esta tesis se presentan distintas aplicaciones siempre dentro del campo de los estudios de patrimonio histórico-artístico,

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

Los parámetros que determinan estas características son: velocidades, atenuaciones, cero de los radargramas (situación sobre el registro de lo que sería la entrada de la señal en el medio a analizar), longitud de la onda inicial y resolución en diferentes medios:

- Determinación de coeficientes de atenuación.
- Relacionar la atenuación que se produce en la amplitud de las señales durante su propagación con las propiedades del medio: saturación, compactación y composición.

Presentar aplicaciones para determinar la validez de este método de análisis aplicado a patrimonio y arqueología. Concretamente se han analizado las aplicaciones en estudios de lesiones en edificios (en el caso de humedad y en el de fisuración), en el análisis de la influencia de construcciones modernas cercanas o sobre elementos de mayor antigüedad (como sería el caso de reconstrucciones de monumentos) y, en último lugar, en el apoyo a estudios arqueológicos y como fuente de información complementaria para situar elementos o zonas de interés en aquellos lugares donde no puede realizarse una excavación o bien donde es difícil y costoso hacerlo.

Enumerando brevemente los casos reales analizados (referidos a patrimonio y a arqueología) se pueden mencionar dos estudios diferentes: Fuerte Barragán y Basílica de Lujan un pulso simple (cuando no se ha producido ninguna reflexión). La señal en este caso es debida enteramente a efectos internos de la antena: onda directa entre el emisor y el receptor, reverberaciones internas y ruido electrónico. A partir de este pulso se intenta determinar la distancia respecto a la superficie del medio a la que hay que situar la antena para que no se produzcan interferencias entre la señal directa y la primera reflexión en la superficie del medio. También se analizan las Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico.

### **1.3 Reseña Histórica del GPR**

Sencillo y homogéneo, siendo la profundidad de estudio de 1 metro a unas pocas decenas de metros. Consiste en la localización de muros enterrados en un terreno seco. Otros estudios inmediatamente posteriores se aplican también a la localización de estructuras arquitectónicas enterradas a poca profundidad (muros).

Aunque el método de prospección con radar de subsuelo es relativamente reciente, han sido las últimas décadas posteriores a los años 70 las más fecundas en cuanto a diversidad de aplicaciones y a desarrollo del método de estudio, del tratamiento de datos



y de los equipos. Dentro del tema de estudios aplicados a patrimonio, el tema más desarrollado es el referido a la parte de excavaciones arqueológicas. La primera aplicación de la que se tienen noticias dentro de este campo es la de Vickers et al. (1976) en Nuevo México. El estudio se realiza en un medio sótanos y plataformas correspondientes al piso de viviendas), generalmente en suelos secos.

Las características del terreno hacen que los resultados de estos estudios sean satisfactorios. Posteriormente, el estudio de Vaughan (1986) en la península del Labrador, para localizar tumbas y elementos arquitectónicos, se aplica a un terreno húmedo y no homogéneo, formado básicamente por depósitos de playa y bloques rocosos. Es el primer estudio aplicado a arqueología que se realiza en un medio complejo. Las anomalías localizadas en este caso no superan los dos metros de profundidad. Las excavaciones que se realizan a continuación permiten calibrar los resultados, y se llega a conclusiones de cierto interés, como por ejemplo, que los elementos del interior de las tumbas (huesos y adornos metálicos) no presentan suficiente contraste con los materiales del medio para que se puedan identificar como anomalías. Sin embargo, la alteración del terreno que produce un enterramiento sí que se observa claramente en los registros como una anomalía. También se puede comprobar que algunas anomalías se ocasionan en las inhomogeneidades del terreno y no tienen relación con los elementos buscados.

Al mismo tiempo se han abierto otros campos de aplicación, los referidos a patrimonio y al estudio de edificios de interés histórico-artístico; evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico.

La técnica de prospección con georadar aplicada a patrimonio y a arqueología no es una excepción. Los nuevos trabajos, las técnicas desarrolladas y, en general, toda la historia del método, de sus aplicaciones y de la teoría en la que se basa tienen que ser el punto de partida de cualquier estudio. Los resultados que se obtienen en cada uno de los casos estudiados y en cada uno de los ensayos realizados son una pieza más que forma parte de un mosaico más general.

Hay que tener en cuenta que este método de prospección es relativamente reciente, ya que aunque los primeros ensayos que podemos asociar con el método datan de las

primeras décadas del siglo XX, no se desarrolla como un método práctico de prospección hasta las décadas de los años 60 y de los 70. A partir de esta época los ensayos y

aplicaciones se suceden cada vez con mayor rapidez. El abanico de casos estudiados utilizando este método y el número de pruebas en distintos campos crece rápidamente.

De los estudios aplicados básicamente a geología y glaciología se pasa a los estudios en ingeniería civil y, posteriormente, a los estudios relacionados con la arqueología y con el patrimonio histórico y artístico.

Aunque los primeros ensayos de penetración de ondas de radio en materiales del subsuelo datan ya de principios del siglo XX y gran parte de la teoría en la que está basado este método ya está perfectamente desarrollada a mediados de este siglo, es a partir de la década de los años setenta cuando el método se extiende ampliamente. Entre los trabajos que se publican en esa época se pueden destacar los ensayos que realiza Cook sobre la penetración de ondas de radio en diferentes frecuencias y sobre diferentes materiales del subsuelo. Se realizan estudios en medios sencillos, como los realizados por Annan y Davis en permafrost, en Tuktoyaktuk (delta del río Mackenzie), para mostrar la utilidad de equipos de radar. Junto con estas aplicaciones, se suceden los ensayos destinados a determinar las propiedades electromagnéticas de los materiales del subsuelo o del hielo. En 1978 Unterberger realiza el estudio de cuatro sistemas de radar diferentes, utilizando tres frecuencias distintas (230 MHz, 440 MHz y 4300 MHz), analizando su comportamiento en medio salinos en los que pretende detectar distintos elementos: los flancos de los domos salinos, el contacto superior entre los domos salinos y el medio, fallas, pozos (que pueden encontrarse llenos de agua) y fracturas en las rocas. También calcula la velocidad de las ondas en la sal. En su publicación, Unterberger (1978) presenta una amplia bibliografía sobre autores que han analizado la propagación de las ondas electromagnéticas en rocas. Algo más tarde, en 1989, aparece una publicación de Davis y Annan en la que describen con detalle el funcionamiento del sistema, diferentes métodos de adquisición de datos y uno de los equipos comerciales del momento que es el que utilizan para ilustrar con ejemplos de prospección, tanto en suelos como en rocas, la manera de determinar elementos anómalos y secuencias estratigráficas.

Un método muy básico de estudios de prospección con ondas de radio aparece incluso en algún libro de texto bajo el título de radiografías con ondas radiofónicas. Se trata de un

método de eco de radio que no considera las reflexiones en anomalías, sino las ondas directas que aunque no se ha podido encontrar la fecha exacta del libro original en ruso, es posible que date de finales de los años 60 o principios de los años 70 del siglo pasado, Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico. Llegan entre dos antenas, una de ellas situada en la superficie del terreno y la otra en el interior de una galería de mina o de un sondeo. Situando esta última en distintas posiciones, es posible detectar medios con distintas conductividades, así como su posición y una estimación de su tamaño mediante las sombras que se producen en el registro debido a la diferente atenuación de la señal, que depende de la conductividad del medio por el que se propaga la señal.

Ya en el tema concreto de los estudios arqueológicos, una de las primeras aplicaciones de las que se tiene noticia es la de Vickers en el yacimiento de Chaco Canyon, en New Mexico. El medio de estudio era un terreno seco y bastante homogéneo, en el que se intentaban localizar posibles muros enterrados a profundidades inferiores a 1 metro. En la misma década se realizan también otros estudios en Estados Unidos en los que se pretenden detectar, mediante ondas electromagnéticas, restos de muros y sótanos, así como detectar anomalías que permitan localizar muros enterrados y plataformas que se corresponden con el suelo de viviendas. En todos estos casos se trata de estudios en terrenos básicamente secos, de forma que la penetración de las ondas de radar es buena y se alcanzan resultados satisfactorios. En la década de los 80 los análisis con georadar se multiplican, y hay que destacar, por ejemplo, los estudios que se realizan en Red Bay, en la península del Labrador (Canadá) en los que se determina el emplazamiento de tumbas y de elementos enterrados y muros asociados con las viviendas de un poblado vasco del siglo XVI.

El estudio se realiza en este caso sobre terreno húmedo no homogéneo en el que existen bloques rocosos y otros elementos entre el terreno formado básicamente por depósitos de playa. Los análisis, para los cuales se realizan pruebas de velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas con objeto de poder convertir el tiempo doble de propagación en profundidades, permiten determinar anomalías siempre por encima de los dos metros de profundidad. Las excavaciones que se realizan posteriormente en la zona permiten identificar los elementos que han ocasionado los distintos eventos y las anomalías en los radargramas, comparando de este modo los resultados del estudio geofísico con los elementos existentes en el subsuelo. Gracias a estas comparaciones

pueden determinar que los elementos que se encuentran en el interior de las tumbas (huesos y algunos artefactos metálicos) no contrastan lo suficiente con el medio para aparecer en los registros como anomalías características. Sin embargo, el suelo alterado que existe en la zona de algunas tumbas sí que puede observarse como zonas claramente anómalas en los registros de georadar. Se observa también que los bloques naturales de rocas son la causa de varias de las anomalías detectadas. Otras anomalías están ocasionadas por la existencia de muros, formados por pilas de los bloques de rocas naturales que se encuentran en el terreno. Este estudio es uno de los primeros que se realizan en arqueología en un terreno complicado en el cual las ondas de radio no pueden alcanzar una gran penetración. Además presenta, como elemento interesante, la comparación de los resultados que ofrece la prospección geofísica con los resultados que se obtienen a partir de excavaciones. Otros análisis pioneros en este campo son los estudios realizados en Japón a mediados de la década de los 80. Consisten en determinar la situación de antiguas casas con suelos de arcilla en terrenos volcánicos otra aplicación que es posible encontrar en este campo relacionado con la arqueología y el patrimonio histórico y artístico es la localización de zonas anómalas debidas a humedad en suelos y en muros de edificios históricos o artísticos o bien zonas anómalas que determinan áreas afectadas por grietas y fisuras.

El hecho es que este método está cada vez más extendido en áreas relacionadas tanto con la arqueología como con la conservación y restauración del patrimonio, siendo ya habitual su aplicación en los más variados trabajos.

#### **1.4 Fundamentos de la prospección con radar de subsuelo.**

La prospección con radar de subsuelo consiste en la emisión y propagación por un medio dado de ondas electromagnéticas, con la posterior recepción de las señales reflejadas en discontinuidades del medio. En este capítulo se han comentado aquellos conceptos que nos sirven para entender este proceso. Los campos electromagnéticos quedan definidos mediante las ecuaciones de Maxwell.

Estas ecuaciones ligan los campos eléctrico y magnético con las fuentes que los producen, a partir de una serie de parámetros constantes para cada medio determinado. Estas constantes definen electromagnéticamente el medio. En prospección con radar de

subsuelo tres de estos parámetros son básicos para comprender qué se está registrando. Se trata de la **conductividad**, la **permitividad dieléctrica** y la **permeabilidad magnética**. Estos tres parámetros son valores complejos. Cuando efectuamos una medida con radar, los parámetros que se obtienen son los que se denominan valores efectivos, es decir, combinaciones entre las partes reales e imaginarias de cada uno de los tres. Por ejemplo, la parte real de la permitividad relativa de un medio genera una corriente en fase con el campo eléctrico aplicado, mientras que su parte imaginaria genera una corriente desfasada. Con la conductividad ocurre al revés: su parte real determina la amplitud de la corriente desfasada y la imaginaria la de la corriente en fase con el campo eléctrico aplicado. La conductividad efectiva se obtiene como la suma de la componente real de la conductividad del medio y de la imaginaria de su permitividad relativa. La permitividad efectiva está formada por la componente real de la permitividad relativa y la parte imaginaria de la conductividad del medio, que junto con la pulsación de la radiación,  $\omega$ , indica el efecto de las cargas libres.

A partir de las ecuaciones de propagación de una onda plana y armónica y de las relaciones de Maxwell se llega a expresiones para la velocidad de propagación y para la longitud de onda en función de estos parámetros del medio y de las características de la radiación (frecuencia utilizada). Estas expresiones dependen del tipo de medio por el que se produce la propagación: espacio libre, dieléctrico perfecto, dieléctrico, dieléctrico de bajas pérdidas o conductor.

La atenuación que se produce durante la propagación de una onda por un medio material puede obtenerse considerando los factores de expansión geométrica del frente de ondas y el denominado factor de atenuación. Este último es una función también de los parámetros electromagnéticos del medio y de la frecuencia de la radiación. La atenuación debida a los efectos del medio es una función exponencial que determina la disminución de energía (y por lo tanto de amplitud) de la onda conforme nos alejamos del foco donde se ha generado.

La amplitud de la onda que se recibe en la antena es también dependiente del porcentaje de energía que se ha reflejado en cada una de las discontinuidades del medio. Se definen los coeficientes de transmisión y reflexión como los porcentajes de energía refractada y reflejada respecto a la energía incidente en una superficie determinada.

Estos coeficientes dependen de las impedancias electromagnéticas de los campos incidente y refractado o incidente y reflejado, juntamente con los ángulos de incidencia y refracción. En el caso particular de un radar de subsuelo la incidencia puede considerarse normal, es decir, que el ángulo de incidencia y el ángulo de refracción son cero (aproximadamente).

La prospección con georadar consiste en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas. En la explicación que llevaremos a cabo se presentan brevemente los conceptos teóricos más importantes referidos a campos electromagnéticos, en los que se basa la prospección con georadar. Podemos diferenciar tres partes: la primera se refiere a los parámetros electromagnéticos de los medios materiales y a la propagación de las ondas electromagnéticas. La segunda permitividad de los dos medios en contacto, explica los fenómenos que se producen durante la propagación de una onda electromagnética en un medio material: difracción, dispersión de la energía y atenuación de la onda electromagnética. La tercera se centra en las características de la emisión de un radar, en el funcionamiento de los equipos de radar y en los distintos métodos de trabajo que se utilizan. En ella se comentan los parámetros que definen un sistema de radar aéreo (el más desarrollado actualmente), básicamente formado por una antena que emite energía y otra antena, situada en otro punto, que la recibe, ya sea directamente, ya sea tras haber sufrido una reflexión en un cuerpo anómalo situado en el medio aéreo.

. El georadar emplea ondas de frecuencias mucho mayores que las utilizadas en sísmica: la prospección con georadar trabaja normalmente entre los 10 MHz y los 1000 MHz, mientras que el rango de trabajo en prospección sísmica se sitúa entre los 10 Hz y los 1000 Hz). A diferencia de la prospección sísmica, en la cual son las propiedades mecánicas de los materiales las que rigen la propagación de las ondas, con el georadar, las propiedades determinantes serán las electromagnéticas: la permitividad dieléctrica, la conductividad y la permeabilidad magnética. Las reflexiones se producen debido a los contrastes de estas propiedades. El procesado de los datos es similar al que se realiza en sísmica, pudiendo llegar a utilizarse en el tratamiento de trazas de georadar programas y métodos diseñados para sísmica, aunque teniendo en cuenta las características de polarización de las ondas electromagnéticas, de tal forma que existe una mayor analogía con las ondas s que con las ondas p.

## 1.5 Propagación de ondas electromagnéticas.

La base teórica de este método de prospección es, por un lado los conceptos de óptica geométrica, y por otro la teoría de campos electromagnéticos, cuyas ecuaciones básicas fueron formuladas por Maxwell en 1867 relacionando los campos eléctrico y magnético con sus fuentes. Estas relaciones se completan con las denominadas ecuaciones de continuidad, que especifican el comportamiento de estos campos en las zonas en las que existen distribuciones superficiales de carga, es decir, ahí donde tenemos discontinuidades en el medio. A partir de estas ecuaciones se puede determinar el comportamiento de una onda de radar durante su propagación por un medio determinado.

$$\begin{aligned}
 \nabla \vec{D} &= \rho_f \\
 \nabla \vec{B} &= 0 \\
 \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{M} \\
 \nabla \times \vec{H} &= -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}
 \end{aligned}
 \tag{1.5.1}$$

Donde  $\vec{E}$  es la intensidad del campo eléctrico (medido en V/m),  $\vec{B}$  es la inducción magnética (medida en W/m<sup>2</sup>),  $\vec{M}$  es la imanación (en A/m),  $\vec{H}$  es la intensidad del campo magnético (A/m),  $\vec{D}$  es el vector de desplazamiento eléctrico (medido en C/m<sup>2</sup>),  $\rho_f$  es la densidad de carga libre (C/m<sup>3</sup>) y  $\vec{J}$  (A/m<sup>2</sup>) es la densidad de corriente debida al movimiento de cargas en la materia, y comprende tanto la densidad de corriente de cargas libres como la densidad de corriente de polarización y la densidad de corriente equivalente en materia imanada.

Las denominadas ecuaciones constitutivas relacionan la intensidad del campo eléctrico y magnético con el desplazamiento eléctrico y la inducción magnética, respectivamente.

Para medios homogéneos e isotropos, las ecuaciones constitutivas tienen una expresión sencilla, relacionando estas magnitudes por medio de la permitividad dieléctrica ( $\epsilon$ ), la conductividad ( $\sigma$ ) y la permeabilidad magnética ( $\mu$ ) del material:

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \epsilon \vec{E} \\ \vec{H} &= \frac{\vec{B}}{\mu} \\ \vec{J} &= \sigma \vec{E}\end{aligned}\tag{1.5.2}$$

Donde  $\vec{J}_m$  es la densidad de corriente debida tanto a polarización como a magnetización del material a consecuencia de los campos eléctrico y magnético aplicados, y las expresiones  $\vec{\epsilon}$ ,  $\vec{\mu}$  y  $\vec{\sigma}$  suelen aproximarse por tres tensores de dimensión 3x3 (Carcione, 1996). Partiendo de las ecuaciones de Maxwell y con la ecuación general de propagación de ondas se pueden obtener las relaciones que rigen la propagación de una onda electromagnética en función de las propiedades del medio por el que se produce. Con estas relaciones es posible determinar la velocidad de propagación de la onda, la longitud de onda en el medio material y la atenuación que sufre la energía durante la trayectoria.

## 1.6 Parámetros electromagnéticos de un medio.

Los parámetros electromagnéticos (conductividad, permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética) son los que definen un medio al paso de una onda electromagnética.

## 1.7 Conductividad.

La conductividad de un medio nos proporciona una medida de la respuesta de sus cargas libres en presencia de un campo eléctrico externo, siendo el factor de proporcionalidad entre el campo libre aplicado y la densidad de volumen de corriente debido al movimiento de estas cargas libres. Es decir, proporciona una medida de la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica. Según la ley de Ohm:

$$\vec{J}_f = \sigma \vec{E}\tag{1.7.1}$$

Donde  $\vec{E}$  es el campo eléctrico externo aplicado,  $\vec{J}_f$  es la densidad volúmica de corriente debido a las cargas libres y  $\sigma$  es la conductividad del material que se expresada en mhos/m.



Las unidades de medida de la conductividad, en el S.I., son mohs/metro o el equivalente de Siemens/metro. La conductividad de un medio es la inversa de su resistividad (medida en Ohmios metro,  $\Omega m$  ).

En general podremos distinguir entre materiales conductores, semiconductores y aislantes. Pertenecen al primer grupo aquellos materiales cuya conductividad es mayor a  $10^5 S/m$ , mientras que materiales que presentan una conductividad menor a  $10^{-8} S/m$  se clasifican como aislantes, siendo los semiconductores aquellos cuya conductividad se encuentra entre estos dos valores.

En muchos medios sucede que el contenido de agua en los poros del material y la composición química de ésta son los factores que determinan su conductividad, más que los granos minerales que lo componen.

En la mayor parte de las rocas y subsuelos en los que se realizan estudios, la conductividad es principalmente electrolítica ya que, excepto en el caso de existencias de minerales metálicos o de arcillas, la mayor parte de los materiales habituales pueden ser considerados como aislantes. En estos medios la conducción eléctrica se debe básicamente a la existencia de fluido (con iones disueltos) en poros y fisuras. Es decir, cuanto mayor sea el contenido de agua, el porcentaje de iones disueltos y la porosidad del medio, mayor será su conductividad. En la tabla 1.1 se presenta la conductividad y la resistividad de algunos materiales abundantes en el subsuelo.

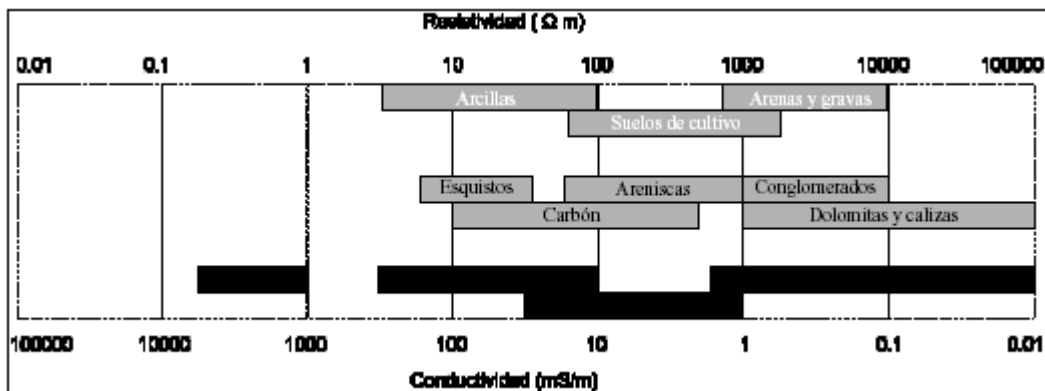


Tabla 1.1. Resistividad y conductividad de materiales muy comunes en los estudios de prospección.

La temperatura afecta a la movilidad de los iones, de forma que influye en la conductividad electrolítica. Por ello, cambiar la temperatura de los medios la conductividad puede verse modificada. En general, la conductividad es un parámetro fuertemente variable que no depende sólo de los cambios de materiales del medio, ya que puede variar dentro de una misma formación. En materiales porosos este parámetro es fuertemente variable dependiendo de la naturaleza de los iones disueltos en el fluido intersticial, de la saturación de agua, del número de poros y de su comunicación, entre otros factores.

En general, la conductividad eléctrica se presenta como un valor complejo:

$$\sigma = \sigma' - i\sigma'' \quad (1.7.2)$$

Donde  $\sigma'$  es la parte real de la conductividad compleja, y determina la amplitud de la corriente en fase con la intensidad del campo eléctrico externo, y  $\sigma''$  es la parte imaginaria de la conductividad compleja, que determina la amplitud de la corriente desfasada respecto al campo eléctrico externo y considera el retardo en la respuesta de conducción que presenta el material en presencia de un campo eléctrico variable con el tiempo

## 1.8 Permitividad dieléctrica.

La permitividad dieléctrica absoluta es una constante de proporcionalidad entre la intensidad del campo eléctrico externo aplicado y el vector desplazamiento eléctrico:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1.8.1)$$

La permitividad absoluta,  $\epsilon$  (medida en el S.I. en F/m), se define como el producto entre una permitividad relativa del material ( $\epsilon_r$ ), que es una constante adimensional y la permitividad dieléctrica del vacío

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (1.8.2)$$

La permitividad dieléctrica relativa es una constante que da una medida de la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico. Proporciona un valor de la respuesta estática del material cuando está en presencia de un campo eléctrico externo. La constante dieléctrica relativa del vacío es 1. Para la mayoría de los materiales que podemos encontrar en el subsuelo al realizar una prospección electromagnética, los valores de la permitividad dieléctrica relativa se encontrarán entre 1 (la del aire) y 81, siendo esta última la constante dieléctrica relativa del agua a 20° de temperatura.

La constante de proporcionalidad (adimensional) entre la polarización de un material,  $\vec{P}$  y el campo externo es la susceptibilidad,  $\chi$ .

$$\vec{D} = \vec{P} + \epsilon_0 \vec{E} = x \cdot \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_0 \vec{E} = (1 + x) \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \quad (1.8.3)$$

La constante dieléctrica se representa en forma compleja como una expresión en la que la componente real produce una corriente en fase respecto al campo eléctrico externo, y la componente imaginaria provoca una corriente en desfase respecto a dicho campo eléctrico, siendo:

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (1.8.4)$$

Donde  $\epsilon'$  es la parte real de la permitividad dieléctrica compleja, llamada permitividad real y  $\epsilon''$  la parte imaginaria. Dividiendo la ecuación (1.8.4) por  $\epsilon_0$  se obtiene una expresión similar para la permitividad relativa.

Este parámetro y la conductividad están interrelacionados entre sí. La parte real de la permitividad dieléctrica y la imaginaria de la conductividad generan una corriente que varía en fase con el campo eléctrico aplicado, mientras que la parte imaginaria de la constante dieléctrica y la real de la conductividad generan una corriente desfasada respecto al campo eléctrico.

La componente imaginaria de la permitividad dieléctrica considera los retardos en la respuesta a la polarización del material sometido a un campo electromagnético, es decir, indica el factor de pérdidas dieléctricas. Por otro lado también contiene el factor que indica las pérdidas por conducción. De forma habitual se suele considerar esta

componente imaginaria como la suma de los dos factores, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

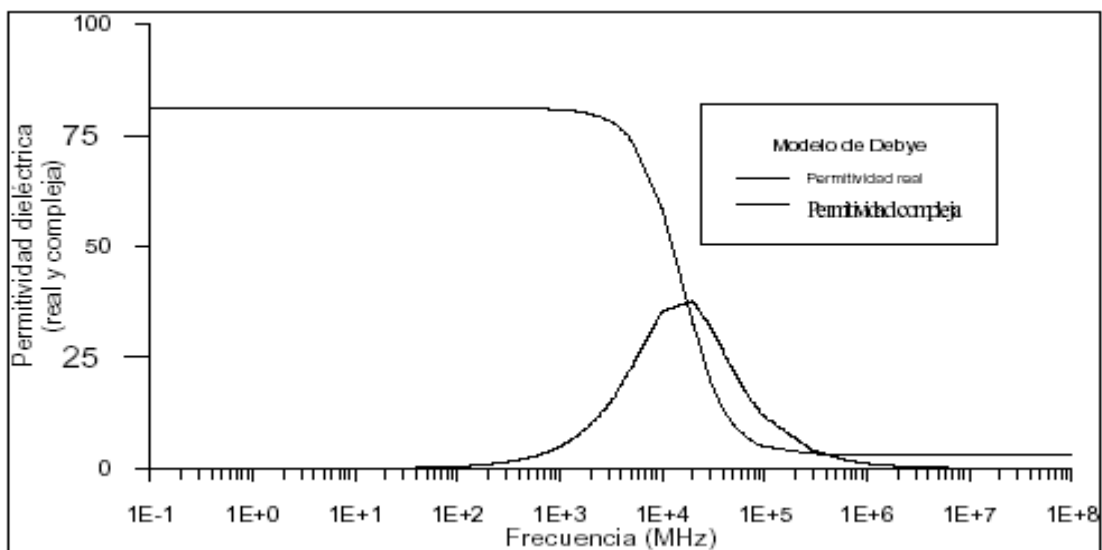
$$\epsilon'' = \epsilon'_d + \frac{\sigma}{\omega} \tag{1.8.5}$$

Donde  $\omega$  es la pulsación del campo electromagnético externo,  $\epsilon'_d$  es el factor de pérdidas dieléctricas que se relaciona con la respuesta frente a los fenómenos de relajación asociados con las moléculas de agua y  $\sigma_{dc}$  es la conductividad estática.

Con estas consideraciones la expresión 1.8.4 queda

$$\epsilon = \epsilon' - i \left( \epsilon'' + \frac{\sigma_{dc}}{\omega} \right) \tag{1.8.6}$$

Para altas frecuencias (entre 10 MHz y 1000 MHz), en la mayor parte de los materiales del subsuelo, los fenómenos de desplazamiento (o polarización) dominan sobre los fenómenos de conductividad. De esta forma, los medios suelen caracterizarse a partir de su constante dieléctrica. Para frecuencias algo menores el término de la conductividad estática predomina sobre el otro. Para frecuencias bajas (los 100 Hz) no se ha observado que este parámetro dependa de la frecuencia del pulso, pero para frecuencias más altas se aprecia una dependencia entre ambos. Tanto la parte imaginaria como la parte real de la permitividad dieléctrica presentan variación en función de la frecuencia (figura 1.1). Hay diferentes mecanismos que caracterizan esta dependencia. Los dos utilizados más comúnmente son el modelo de Debye (figura 1.2) y figura 1.1



**Figura 1.1 Variación de la parte real y de la parte imaginaria de la permitividad dieléctrica compleja en función de la frecuencia, a partir del modelo de Debye**

En los dos se considera la variación de la permitividad dieléctrica en función de la frecuencia, de la conductividad estática,  $\sigma_{dc}$ , de dos valores extremos de la permitividad,  $\epsilon_s$  y  $\epsilon_\infty$ , a baja frecuencia (el primero) y a muy alta frecuencia (el segundo) y del periodo de relajación,  $\tau$ . Cuando en un medio con moléculas que pueden polarizarse en presencia de un campo eléctrico externo se aplica una intensidad de campo eléctrico entran en juego dos efectos contrarios: por un lado la tendencia a la polarización (que tiende a orientar las moléculas) y, por otro, la agitación térmica que tiende a desordenar las moléculas. Cuando el campo eléctrico externo desaparece las moléculas tienden a recuperar su posición inicial.

Al tiempo que invierten en este proceso, que se produce gracias a la agitación térmica que sigue actuando, se le denomina periodo o tiempo de relajación.

(1.8.7)

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (i\omega\tau)} - i \frac{\sigma(0)}{\omega\epsilon_0}$$

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (i\omega\tau)^{1-\xi}} - i \frac{\sigma(0)}{\omega\epsilon_0}$$

Donde  $\alpha$  es un coeficiente que cumple:  $0 \leq \xi \leq 1$ .

(1.8.8)

## 1.9 Permeabilidad magnética.

Este parámetro ( $\mu$ ) es el que relaciona la inducción magnética, con la intensidad de campo magnético, Se mide en Henri/metro y se puede escribir como el producto entre la permeabilidad magnética del vacío ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m) y la permeabilidad relativa del material:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} = \mu \vec{H}$$

(1.9.1)

Siendo  $\mu_r$  la permeabilidad relativa del material, que depende a su vez de la susceptibilidad magnética del mismo,  $\chi_m$ , que a su vez es la constante de proporcionalidad entre la imanación de un material y la intensidad de campo magnético externo.

La permeabilidad compleja magnética relativa se puede escribir en forma compleja como:

$$\mu_r = \mu' - i\mu'' = 1 + \chi_m \quad (1.9.2)$$

La parte real de esta expresión da idea de la energía magnética almacenada en el material, y se le denomina permeabilidad magnética elástica, mientras que la parte imaginaria determina la cantidad de pérdidas magnéticas debidas a corrientes turbillonarias, histéresis, viscosidad magnética del material, etc..., y se denomina permeabilidad magnética viscosa.

En la mayor parte de los materiales que nos encontraremos en los estudios con georadar (excepto en aquellos que contengan materiales ferromagnéticos) se cumple que la permeabilidad magnética es próxima a 1, no dependiendo de la frecuencia del campo magnético.

La mayoría de los materiales de la Tierra tienen un comportamiento isotrópico respecto a la permeabilidad magnética, de manera que para realizar un tratamiento tensorial, como en el caso de la conductividad y de la permitividad dieléctrica, el tensor de este parámetro es una constante por una matriz identidad de dimensiones 3x3:

$$\tilde{\mu} = \mu I \quad (1.9.3)$$

La relación entre la permeabilidad magnética en el vacío y la permitividad dieléctrica en el vacío se expresa como:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (1.9.4)$$

## 1.10 Velocidad de propagación y longitud de onda.

A partir de las cuatro ecuaciones formuladas por Maxwell en 1867 y una onda plana que se propaga en un medio, se pueden calcular las relaciones que definen la propagación de las ondas electromagnéticas en un material. Considerando el caso de una onda plana que se propaga en la dirección, se obtiene la siguiente ecuación, habiendo supuesto una

variación del campo armónica respecto al tiempo, es decir, dependiente de  $e^{i\omega t}$ .

Se observa que la expresión tiene una parte que define la propagación de la onda con el tiempo, mientras que el otro término muestra la disminución de la amplitud de la onda con la distancia recorrida, es decir, considera la atenuación de la onda electromagnética durante su propagación por el medio. El término de la amplitud (que consta de una amplitud inicial en un punto dado y de un término de atenuación con la distancia a dicho punto) depende de un factor de decaimiento  $\gamma$ :

$$\begin{aligned}\vec{E}(\vec{r}) &= \vec{E}_0 e^{-\gamma \vec{r}} \\ \vec{H}(\vec{r}) &= \vec{H}_0 e^{-\gamma \vec{r}}\end{aligned}\tag{1.10.1}$$

Este término  $\gamma$  es el denominado constante de propagación o número de onda complejo, que puede expresarse en función de los parámetros electromagnéticos característicos de cada medio introduciendo las relaciones que se contemplan en las ecuaciones de Maxwell:

$$\gamma = i\omega\sqrt{\epsilon_0\epsilon_r\mu_0\mu_r} = i\frac{\omega}{c}\sqrt{\epsilon_r\mu_r} = i\frac{2\pi}{\lambda_0}\sqrt{\epsilon_r\mu_r}\tag{1.10.2}$$

Donde  $c$  es la velocidad de una onda electromagnética en el vacío, es decir, una constante,  $\lambda_0$  es la longitud de la misma onda también en el vacío,  $\epsilon_0$  la constante dieléctrica del vacío,  $\epsilon_r$  la constante dieléctrica relativa del medio,  $\mu_0$  la permeabilidad magnética del vacío y  $\mu_r$  la permeabilidad magnética del medio.

Considerando las componentes real e imaginaria de la constante de propagación:

$$\gamma = \alpha + i\beta\tag{1.10.3}$$

Es posible determinar el denominado factor de atenuación de la onda (la componente real del número de onda complejo), y la constante de fase de la onda (la componente imaginaria del número de onda complejo), que determina la velocidad de fase de la misma. La dependencia de estos dos parámetros depende también de la dependencia frecuencial que presentan los parámetros electromagnéticos del material. Las

expresiones del factor de atenuación de la onda,  $\alpha$ , y de la constante de fase,  $\beta$ , pueden escribirse como:

(1.10.4)

$$\alpha = \omega \operatorname{Im} \sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0} = \frac{\omega}{c} \operatorname{Im} \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

$$\beta = \omega \operatorname{Re} \sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0} = \frac{\omega}{c} \operatorname{Re} \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

### 1.11 Velocidad de propagación de una onda electromagnética en un medio material.

El segundo parámetro ( $\beta$ ) permite determinar la velocidad de la onda en el medio material en el cual se está propagando, ya que:

$$\beta = \frac{\omega}{v}$$

(1.11.1)

Donde  $v$  es la velocidad de fase de la onda electromagnética. De esta forma, la expresión que se obtiene para la velocidad de propagación de la onda es la siguiente:

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\omega}{\frac{\omega}{c} \operatorname{Re} \sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \cong \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} + 1 \right)}}$$

(1.11.2)

En medios no magnéticos, los más frecuentes, en los estudios con georadar, la expresión se simplifica ya que:  $\mu_r = 1$ .

De forma que la expresión que comúnmente se podrá utilizar es:

$$v = \frac{c}{\operatorname{Re} \sqrt{\epsilon_r}}$$

(1.11.3)



Para materiales diferentes la velocidad,  $v$ , y la constante de propagación,  $\gamma$ , las expresiones desarrolladas adoptan diferentes formas, tal como se expresa en la tabla 1.2.

Medio	Velocidad	Constante de propagación
Espacio libre	$v = c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{\omega}{\beta}$ $\approx 30 \text{ cm / ns}$	$\gamma = i\beta (\text{m}^{-1})$
Dieléctrico perfecto	$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$ $= \frac{\omega}{\beta} (\text{m / s})$	$\gamma = i\beta =$ $= i\omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon_r \mu_r} (\text{m}^{-1})$
Dieléctrico $\epsilon = \epsilon' - i \frac{\sigma}{\omega}$	$v = \frac{\omega}{\beta} (\text{m / s})$	$\gamma = \alpha + i\beta =$ $i\omega \sqrt{\mu \epsilon'} \left( \sqrt{1 - i \frac{\sigma}{\omega \epsilon'}} \right) (\text{m}^{-1})$
Dieléctrico de bajas pérdidas $P = \frac{\sigma}{\omega \epsilon'} \ll 1$	$v = \frac{\omega}{\beta} (\text{m / s})$	$\gamma = \alpha + i\beta =$ $i\omega \sqrt{\mu \epsilon'} \left( 1 - i \frac{\sigma}{2\omega \epsilon'} \right) (\text{m}^{-1})$
Buen conductor $P = \frac{\sigma}{\omega \epsilon'} \gg 1$	$v = \frac{\omega}{\beta} (\text{m / s})$	$\gamma = \alpha + i\beta \approx$ $\approx \sqrt{\pi f \mu \sigma} (1 + i) (\text{m}^{-1})$

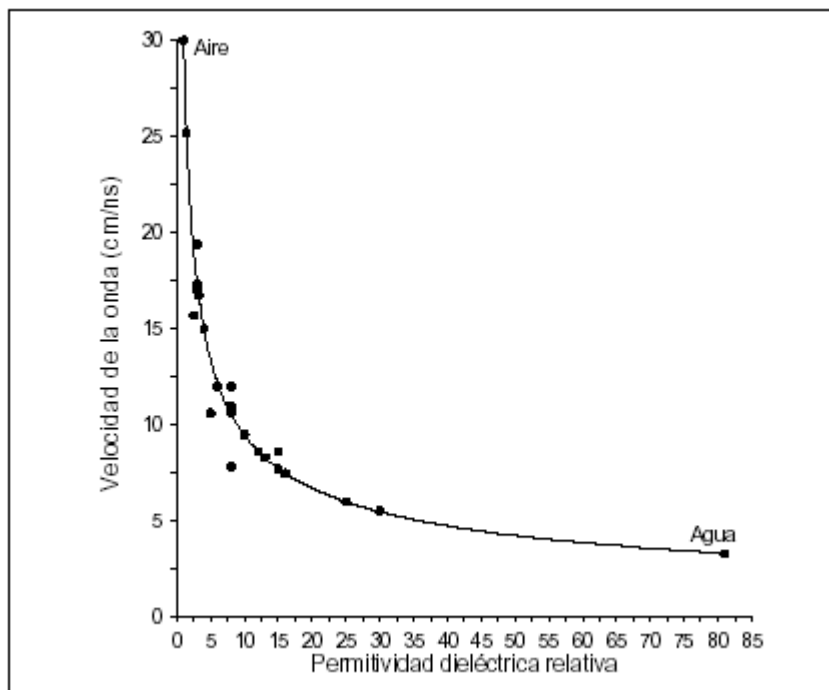
**Tabla 1.2. Valores de  $v$  y de  $\gamma$  para diferentes comportamientos del medio.**

En muchos casos la parte imaginaria de la permitividad dieléctrica es pequeña frente a la parte real. En la ecuación 1.8.5 podemos ver que esta parte depende de la conductividad del medio y del medio y del factor de pérdidas dieléctricas relacionado con la relajación en la molécula de agua. Cuando los medios son dieléctricos o poco conductores el término asociado con la conductividad es pequeño. Si además se tiene en cuenta que las frecuencias habituales de trabajo están situadas entre los 10 MHz y los 1000 MHz se puede considerar que la parte imaginaria es mucho menor que la parte real de la permitividad ya que el término asociado con la relajación de la molécula de agua y, por lo tanto, con la parte imaginaria de la permitividad es pequeño (ver la figura 1.1). En estos casos la ecuación 1.11.3 puede simplificarse y escribir como:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

(1.11.4)

En la figura 1.2 se dibuja la variación de la velocidad de la onda frente a la constante dieléctrica a partir de la relación 1.11.4 (en línea continua), así como diferentes valores puntuales medidos en diversos materiales reales, dada su permitividad dieléctrica característica. Los valores de la velocidad se han obtenido de las tablas presentadas por Reynolds (1997).



**1.2. Variación de la velocidad frente a la permitividad dieléctrica los puntos de la gráfica son valores experimentales obtenidos diferentes materiales (Reynolds, 1997).**

1.2 se dibuja la variación de la velocidad de la onda frente a la dieléctrica así como valores puntuales medidos en diversos materiales reales, dada su dieléctrica característica. Los valores de la velocidad se han obtenido presentadas por Reynolds (1997).

La velocidad más elevada se obtiene para el aire, mientras que el punto que presenta menor velocidad en la gráfica representa al agua. Los materiales del subsuelo están

situados entre estos dos valores. La gráfica representa la comparación entre los valores experimentales (tabulados) y la curva obtenida al representar la ecuación 1.11.4. Se observa que la aproximación que proporciona la ecuación 1.11.4 se ajusta adecuadamente a los resultados experimentales

## 1.12 Longitud de onda en un medio diferente del vacío.

La longitud de onda en un medio dado,  $\lambda_m$ , 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 onda en el vacío:

(1.12.1)

$$\lambda_m = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega} v = \frac{2\pi}{\omega} \frac{c}{\text{Re}\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} = \frac{\lambda_0}{\text{Re}\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

Donde  $\lambda_0$  es la longitud de la onda en el vacío.

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

$$\lambda_m = \frac{\lambda}{\text{Re}\sqrt{\epsilon_r}}$$

(1.12.2)

## 1.13 Atenuación.

La atenuación de una onda electromagnética debido a las características del material por el que se propaga es un tema que ha sido planteado en diversas ocasiones tanto teóricamente como a partir de simulaciones.

La componente real del factor de atenuación caracteriza el grado de disminución de la amplitud de la onda conforme se aumenta la distancia al punto en el cual se ha generado. siendo sus unidades  $\text{m}^{-1}$ :

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \text{Im}\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

(1.13.1)

Puede observarse que la atenuación depende de la componente imaginaria de la permitividad dieléctrica relativa del medio y de su permeabilidad magnética relativa.

El grado de atenuación de una onda electromagnética se define como el cociente entre las amplitudes de las oscilaciones de la onda en dos puntos separados una distancia  $r$ . Si tomamos la ecuación de propagación de ondas, esta relación queda como:

$$\frac{\vec{E}_0}{\vec{E}(\vec{r})} = e^{\alpha r} \quad (1.13.2)$$

Si se toman logaritmos de esta expresión, podremos medir el grado de atenuación en nepers (en el caso de considerar logaritmos neperianos):

$$L = \ln\left(\frac{\vec{E}_0}{\vec{E}(\vec{r})}\right) = \alpha r \quad (1.13.3)$$

Y en el caso de considerar logaritmos decimales, se obtendrá un parámetro del grado de atenuación que se medirá en decibelios:

$$L = 20 \log\left(\frac{\vec{E}_0}{\vec{E}(\vec{r})}\right) = 20(\log e)\alpha r = 8.686\alpha r \quad (1.13.4)$$

Siendo la atenuación específica el grado de atenuación de una onda por unidad de longitud:

$$\Gamma = \frac{1}{r}L = 8.686\alpha = \frac{54.6}{\lambda} \text{Im} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (1.13.5)$$

Este parámetro permite obtener el grado de decaimiento de la amplitud de la onda conforme ésta se propaga por el medio material.

## 1.14 Parámetros efectivos.

Los parámetros que definen el comportamiento electromagnético de los materiales (permitividad dieléctrica y conductividad) tienen, tal como hemos visto al inicio de este capítulo, una parte real y una parte compleja.

Tanto la parte real de la expresión de la conductividad como la parte imaginaria de la constante dieléctrica compleja producen una corriente en desfase respecto al campo eléctrico, mientras que la parte imaginaria de la conductividad y la parte real de la permitividad dieléctrica provocan una corriente en fase respecto al campo eléctrico.

Las corrientes en fase respecto al campo eléctrico producen una conductividad que se denomina efectiva y que es el valor mensurable de este parámetro, mientras que las corrientes en desfase, junto con el efecto de las cargas libres para altas frecuencias, producen un retardo del campo eléctrico. De esta forma se definen los parámetros efectivos. La conductividad efectiva es la suma de los efectos de la componente real de la conductividad compleja y del efecto de la componente imaginaria de la permitividad dieléctrica, que genera un campo eléctrico en fase con el campo externo:

$$\sigma_{ef} = \sigma' + \omega \epsilon'' \quad (1.14.1)$$

La permitividad efectiva está compuesta en parte por la componente real de la permitividad compleja, y en parte por el efecto de las cargas libres (parte imaginaria de la conductividad compleja), siendo importante el retardo del campo eléctrico debido al efecto de las cargas libres en el caso de altas frecuencias. Este efecto es importante a altas frecuencias y debe tenerse en cuenta cuando se trabaja con unas antenas determinadas: aquellas que emiten en la banda de las microondas (antenas de 1 GHz y frecuencias superiores): Son estos parámetros los que se pueden medir en experiencias de laboratorio y los que se utilizan para calcular la velocidad de propagación de la onda electromagnética por el medio así como la atenuación de la energía que se produce durante esta propagación. En los siguientes capítulos, aunque no se mencionen explícitamente los parámetros efectivos, se entiende que son los utilizados para realizar todos los cálculos y para definir el comportamiento de las ondas electromagnéticas en los medios.

Para la mayor parte de medios que se pueden encontrar, la componente de desfase de la conductividad es pequeña.

De aquí en adelante, para simplificar, cuando se hable de permitividad dieléctrica y conductividad, a menos que se indique lo contrario se estará haciendo referencia a la permitividad dieléctrica efectiva y a la conductividad efectiva, concretamente a su parte real, ya que es el parámetro que puede medirse experimentalmente. Del mismo modo se

hará referencia a la permitividad dieléctrica relativa efectiva como  $\epsilon_r$ , llamándola permitividad dieléctrica relativa.

### **1.15 Reflexión y refracción.**

Cuando la energía electromagnética alcanza una discontinuidad en los parámetros electromagnéticos del medio, se producen los fenómenos de reflexión y de refracción. Cuando la interfase es plana, la frecuencia de las ondas reflejadas y refractadas es la misma que la frecuencia de la onda incidente, siendo también el ángulo de reflexión igual al de incidencia.

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.

En la figura 1.3. se presenta esquemáticamente el proceso de incidencia de una onda electromagnética plana en un contacto entre dos materiales diferentes, siendo el contacto también plano. La polarización de la onda electromagnética plana es perpendicular al 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.

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  $\theta_i$  es el ángulo de incidencia de la onda sobre la superficie plana, y  $\theta_t$  es el ángulo de refracción, estos coeficientes adoptan la siguiente expresión:

En los estudios que se realizan con georadar, pueden simplificarse estas expresiones ya que el sistema opera con reflexión de muy pequeño ángulo, 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

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.

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.

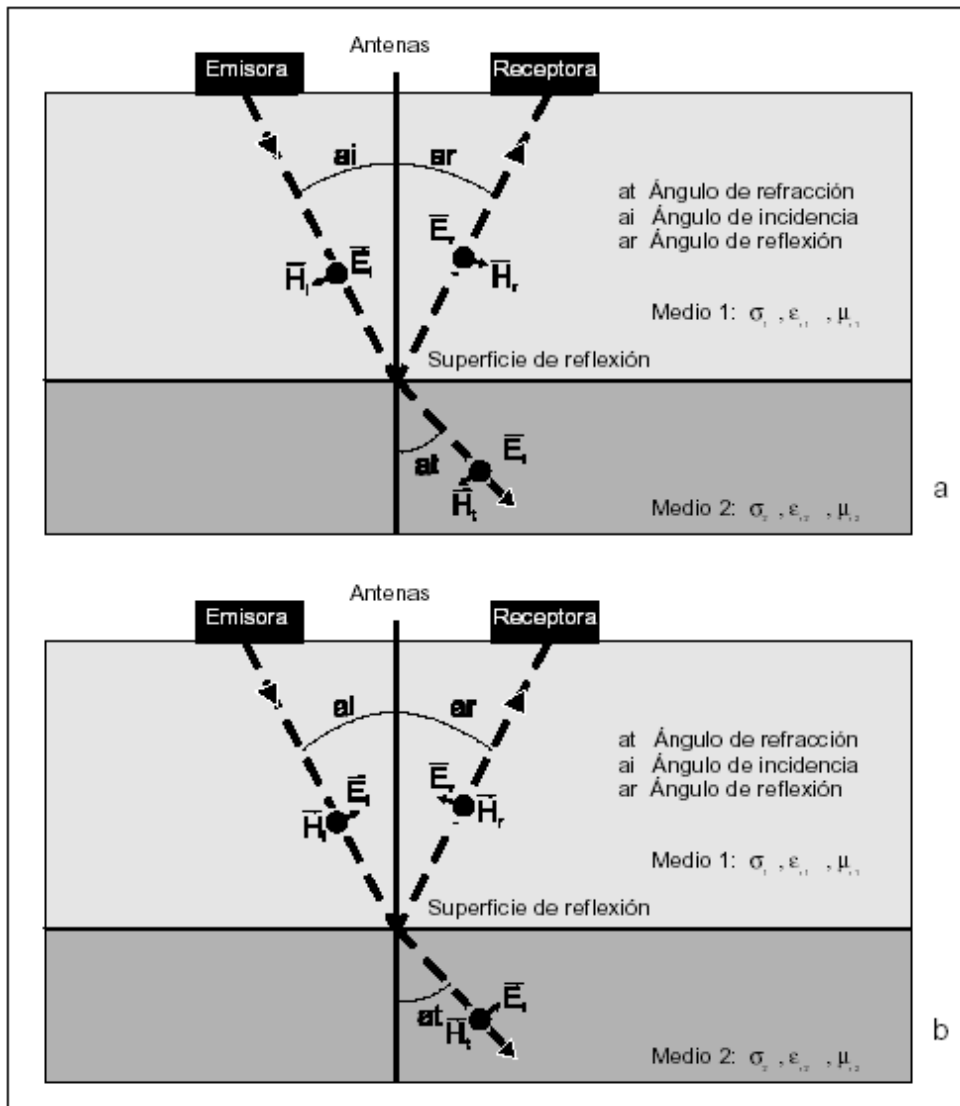


Figura 1.3 Refracción y reflexión de Energía incidente en un contacto horizontal a) Onda electromagnética polarizada horizontalmente ( Paralelo al plano de incidencia)

## 2.1 Rango del radar.

Hay que tener en cuenta que la profundidad pelicular de penetración que se calcula no es igual al rango o penetración de las ondas de radar. Se trata de la distancia para la cual la energía inicial ha disminuido en un factor  $1/e$  teniendo en cuenta únicamente la absorción del medio.

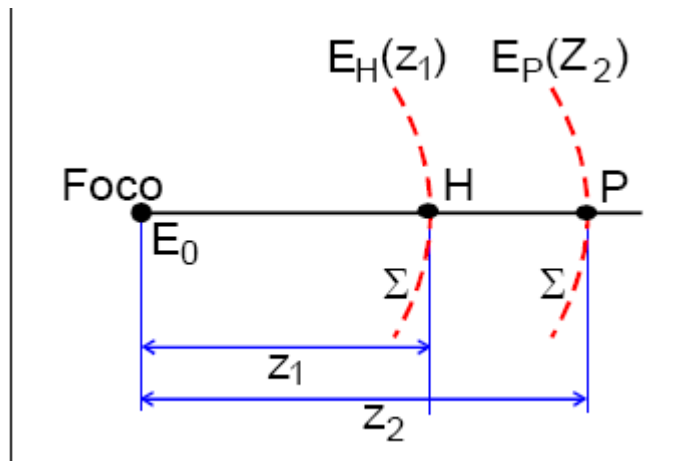
Además, para obtener  $d$  se consideran únicamente los factores relacionados con el medio por el que se propaga la onda y que afectan a la atenuación.

Existen otros factores que también producen una disminución de la energía de la onda durante su propagación, tal como ya se ha expuesto. Pero además de estos factores relacionados con el medio y con la propagación de la onda hay que tener en cuenta otros, como son los factores instrumentales y los relacionados con la superficie reflectora. El rango del radar se define como la máxima penetración que éste puede alcanzar.

De forma general puede decirse que las pérdidas que presenta una radiación electromagnética durante su propagación, a una distancia dada del emisor, son:

- Pérdidas producidas en la antena.
- Pérdidas durante la transmisión de la energía entre el aire y el medio.
- Pérdidas ocasionadas por la dispersión geométrica del frente de ondas





Esquema de la propagación de un frente de ondas esférico.

## 2.2 Resolución vertical y horizontal.

La resolución de un equipo se define como su capacidad para resolver elementos independientes en el subsuelo, ya sea en espesor (resolución vertical), ya sea en tamaño horizontal (resolución horizontal).

Conocer la resolución del aparato en un medio dado permite saber cuál es la distancia mínima que debe existir entre dos reflectores (ya sea vertical u horizontal) para que éstos se registren como eventos separados.

La resolución vertical permite conocer la sensibilidad del equipo para diferenciar entre dos señales adyacentes en el tiempo como eventos diferentes. La resolución horizontal indica la distancia mínima que debe existir entre dos reflectores situados uno junto al otro horizontalmente (paralelos a la superficie del medio analizado) para que el aparato los detecte como eventos separados.

## 2.3 Resolución vertical.

La sensibilidad del equipo para distinguir dos señales adyacentes en el tiempo como eventos separados depende de la frecuencia de la emisión utilizada y de la duración del pulso. En un medio de tres capas (como el de la figura 4.10) la resolución se caracteriza

considerando el espesor mínimo que debe tener la capa intermedia para que el aparato pueda detectarla.

La anchura de banda (en Hz) es inversamente proporcional a la duración del pulso. De esta forma, para una antena con frecuencia central de 500 MHz, la duración

$$\Delta t = \frac{1}{\Delta f}$$

del pulso es de 2 ns. Si la antena es de 900 MHz la duración del pulso es de 1.1 ns; si es de 100 MHz su duración del pulso es de 10 ns; para una frecuencia central de 200 MHz la duración del pulso resultante es de 5 ns; para una frecuencia de 1 GHz esta duración es de 1 ns y para una frecuencia de 10 MHz se obtiene un valor de 100 ns.

La longitud equivalente del pulso que se propaga (en metros) es el producto entre la duración del pulso y la velocidad de la onda electromagnética en el medio por el que se está propagando.

Esta longitud equivalente determina la resolución vertical que podremos esperar. A mayor longitud del pulso, menor resolución vertical.

Cuando tenemos una antena situada directamente sobre el suelo se produce un acoplamiento de la señal con el suelo. Esto quiere decir que la forma de la onda emitida por la antena no será la misma cuando sea transmitida al medio estudiado.

El tren de ondas que se propaga hacia el interior del medio queda afectado (tanto en su forma, tipo y amplitud, o sea energía) por el material de dicho medio, que realiza un filtrado efectivo de la onda.

La longitud del pulso, en principio, disminuye conforme se aumenta la frecuencia.

Pero este efecto sólo tiene lugar en el lóbulo principal de la emisión. Cuando se produce un acoplamiento con el suelo, y dependiendo de la eficiencia de transmisión, el tren de onda que penetra puede ser varias veces mayor que la longitud de onda teórica esperada para una antena dada.

Si la onda que se propaga tiene un número determinado de ciclos con una duración total de  $t$  nanosegundos, la reflexión ocasiona una onda reflejada cuya complejidad es, como mínimo, igual a la de la onda incidente, si no mayor, y una duración más larga.

Este alargamiento de la duración del pulso es consecuencia del efecto de filtrado que

realizan los medios materiales, atenuando en mayor medida las altas frecuencias, de forma que la onda, conforme se propaga pierde las componentes de altas frecuencias. La complejidad de la forma del tren de onda de la emisión complica la interpretación de los registros y, desde luego, empeora la resolución vertical del aparato.

La resolución vertical de una antena aumenta cuando se produce una disminución de la velocidad de propagación de la onda en el medio. Por ejemplo, cuando se registran reflexiones en oquedades, la resolución es mejor si estas oquedades están llenas de agua en lugar de aire. La onda se propaga más lentamente. Por ello es posible distinguir la reflexión producida en el contacto superior (medio-agua) de la producida en el contacto inferior (agua-medio), para una separación entre estas superficies reflectoras menor que la que debería haber en el caso de la oquedad llena de aire para tener la misma capacidad de resolución.

Otra forma de mejorar la resolución vertical de un equipo es diseñar antenas que generen señales de menor duración. Sin embargo, si disminuimos  $D_t$  aumentaremos  $D_w$ , siendo ésta el ancho de banda del espectro .

Con todo, en este caso al mejorar la resolución se limita la penetración de la señal.

## **2.4 Resolución horizontal.**

La resolución horizontal se define como la capacidad del aparato para resolver un reflector y su geometría. Depende de la velocidad de desplazamiento de la antena y del número de pulsos emitidos por segundo (el producto de estos dos factores es el número de pulsos emitido por unidad de longitud del terreno analizado), de la geometría del haz emitido (cono de emisión), de la sección eficaz del reflector (primera zona de Fresnel) y de la profundidad a la que se localiza el reflector.

La velocidad de la antena y el número de trazas por segundo son dos factores que se pueden controlar. No ocurre lo mismo con la geometría del haz emitido, que depende de las características de la antena y de las del medio. Este haz se puede considerar aproximadamente como cono de energía que intersecta con la superficie del reflector, iluminando un área que se denomina huella de la antena.

La primera zona de Fresnel describe el área mínima detectable. Los rasgos del medio con dimensiones menores no se detectan. Por ejemplo, en un suelo húmedo en el que se propaga la onda con una velocidad de 0.06 m/ns, el radio de la primera zona de Fresnel es de 43 cm (ecuación 4.24) si se utiliza una antena de 500 MHz y la superficie reflectora está a 1.5 m de la antena. Esto indica que se pueden detectar elementos de diámetro medio mayores que 90 cm.

El tamaño finito de esta superficie de incidencia del cono de energía afecta tanto a la resolución vertical como a la horizontal. Para la resolución horizontal, cuanto mayor sea la primera zona de Fresnel, peor será el coeficiente de resolución horizontal. Un cono estrecho mejora considerablemente la resolución. La anchura del cono de emisión afecta la resolución vertical cuando las superficies reflectoras están fuertemente inclinadas o cuando las irregularidades de la superficie son grandes comparadas con la longitud de onda de la energía incidente.

Son varios los criterios que se pueden considerar para determinar la resolución horizontal.

Según algunos autores, la resolución horizontal también es inversamente proporcional a  $a^{1/2}$ , siendo  $a$  el factor de atenuación. Esto indica que el valor de la resolución horizontal es mayor en un medio altamente atenuante, mientras que empeora en medios no atenuantes.

Otro criterio es el que define la huella de la antena como la intersección entre el cono de energía radiado y la superficie reflectora, es decir, como el área iluminada por la antena a la que le otorgan un radio,  $r_a$  definido como:

La resolución horizontal se define

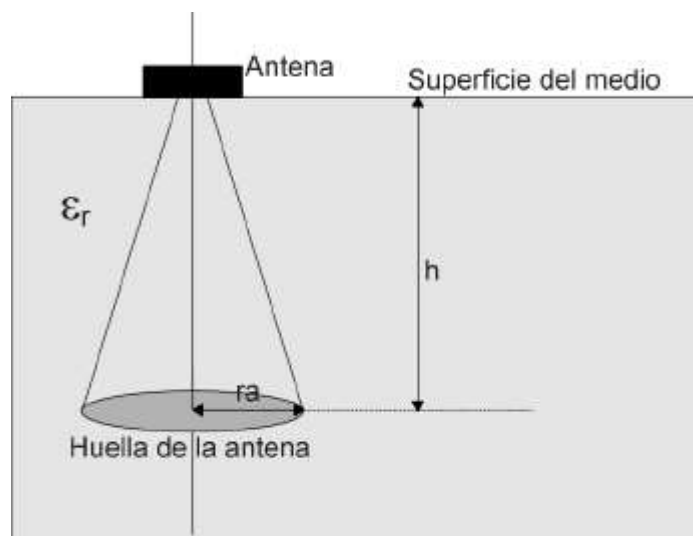
$$r_a = \frac{\lambda}{4} + \frac{h}{\sqrt{\epsilon_r + 1}}$$

Donde  $h$  es la distancia vertical entre la antena y la superficie reflectora y  $\epsilon_r$  es la permitividad relativa promedio del material comprendido entre ambas. Otro criterio para determinar la resolución horizontal. Considera que un elemento de dimensiones finitas queda perfectamente determinado cuando el número de trazas,  $n_t$ , que alcanza el reflector es suficientemente grande. Si el número de trazas incidentes en el objeto es demasiado pequeño, éstas quedan recogidas en el radargrama como eventos aislados

que no proporcionan información. Para determinar el valor de  $nt$  propone la siguiente relación:

$$nt = (tr/s) \frac{2h}{va}$$

Donde  $h$  es la separación entre la antena y el objeto,  $va$  es la velocidad de desplazamiento de la antena y  $(tr/s)$  es el número de trazas por segundo que se registran. Este último parámetro se selecciona previamente a la adquisición de datos. El mínimo valor de  $nt$  que permite identificar el objeto en el radargrama es la resolución horizontal.



**Esquema que muestra el área iluminada por la antena a una profundidad  $h$  desde la superficie del medio**

Finalmente, la resolución se ve afectada por el tratamiento realizado sobre la señal. Por ejemplo, si se realiza una suma de trazas ("*stacking*"). Cuando se aplica este tratamiento para mejorar la relación señal/ruido, la resolución horizontal empeora.

### **3.1 EJEMPLIFICACION DE DIFERENTES APLICACIONES DEL GEORADAR**

### **3.2 FUERTE BARRAGAN - ENSENADA PROV. DE BUENOS AIRES**

**Tarea realizada en Enero 2002**

#### **OBJETIVO DEL ESTUDIO**

Se realizó únicamente la prospección en el área interior del Fuerte Barragán, cuyo objetivo fue detectar la presencia y posición de paredes o estructuras enterradas y anomalías indicativas de la presencia de objetos enterrados, que se encontrarían hasta una profundidad máxima estimada de 1 metro.

#### **RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

La prospección geofísica realizada en el área N° 1 y 2) ha permitido confeccionar el Plano de resultados en el que se reflejan las conclusiones del estudio.

##### *Electromagnetómetro de Frecuencia Variable (GEM)*

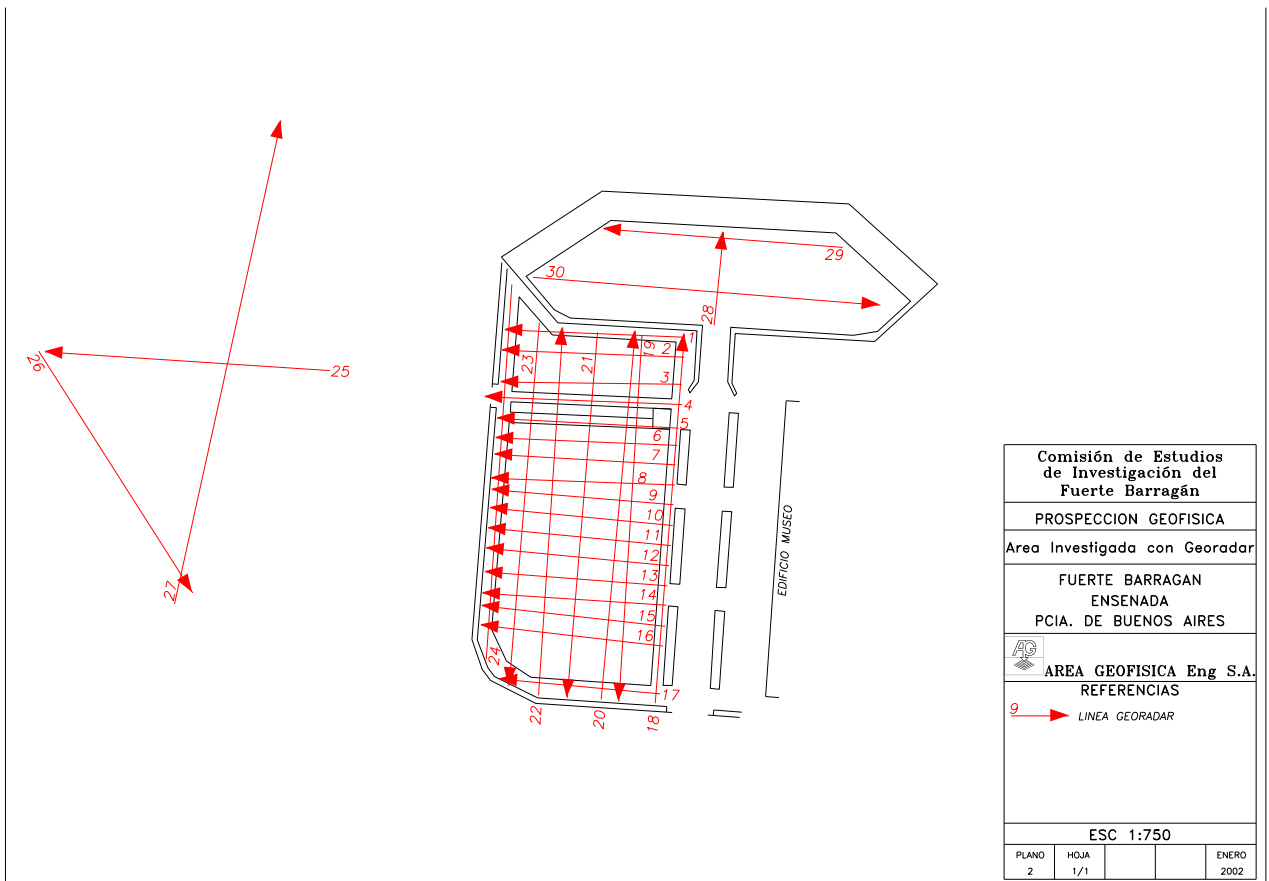
Se realizaron medidas en 12 frecuencias distintas, desde 330Hz a 19950 Hz obteniéndose valores puntuales de conductividad relativa .

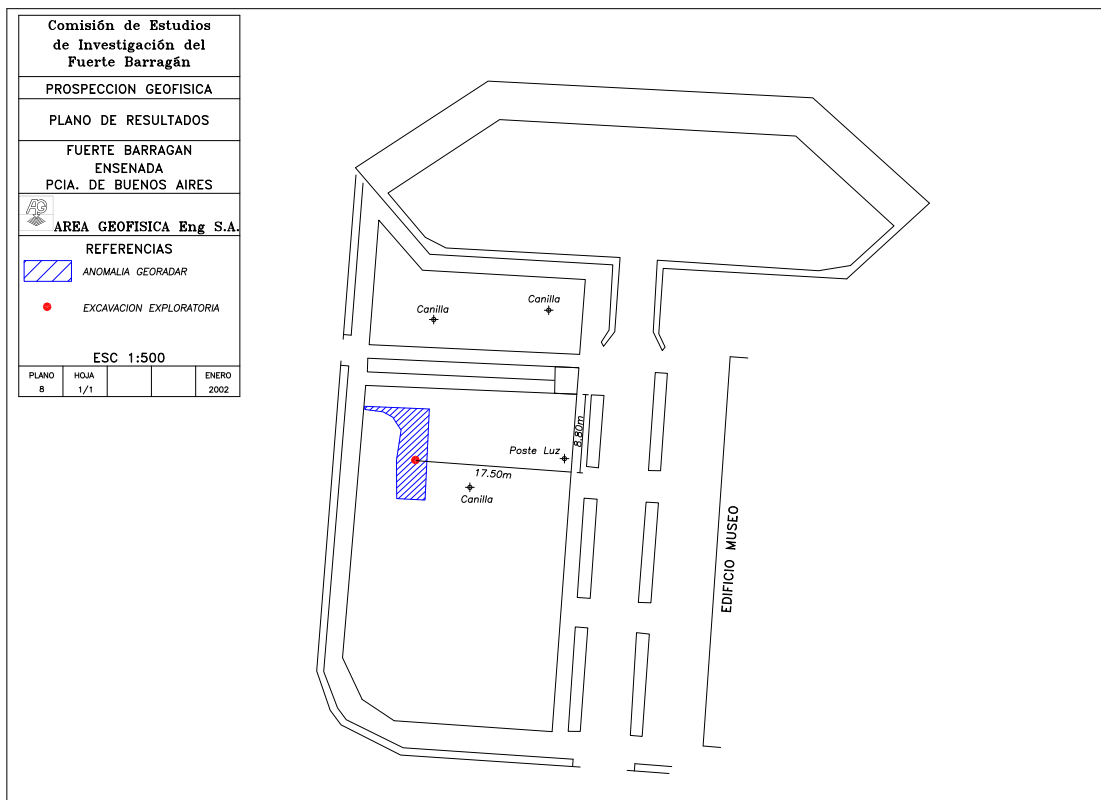
De este rango de frecuencias, se seleccionaron las de 330 y 2130 Hz, que fueron las más adecuadas para el objetivo que se buscaba en esta investigación. Los valores obtenidos en estas dos frecuencias, permitieron trazar curvas de igual conductividad relativa.

Las medidas realizadas con una frecuencia de 330Hz, fuera del área de máxima concentración de altos valores de conductividad relativa, notamos mayor uniformidad en dichos valores, diferenciándose de los valores reflejados que se han medido en una frecuencia de 2130Hz, se ven mas influenciados por objetos, como cañerías, raíces etc. existentes, u estructuras en superficie.

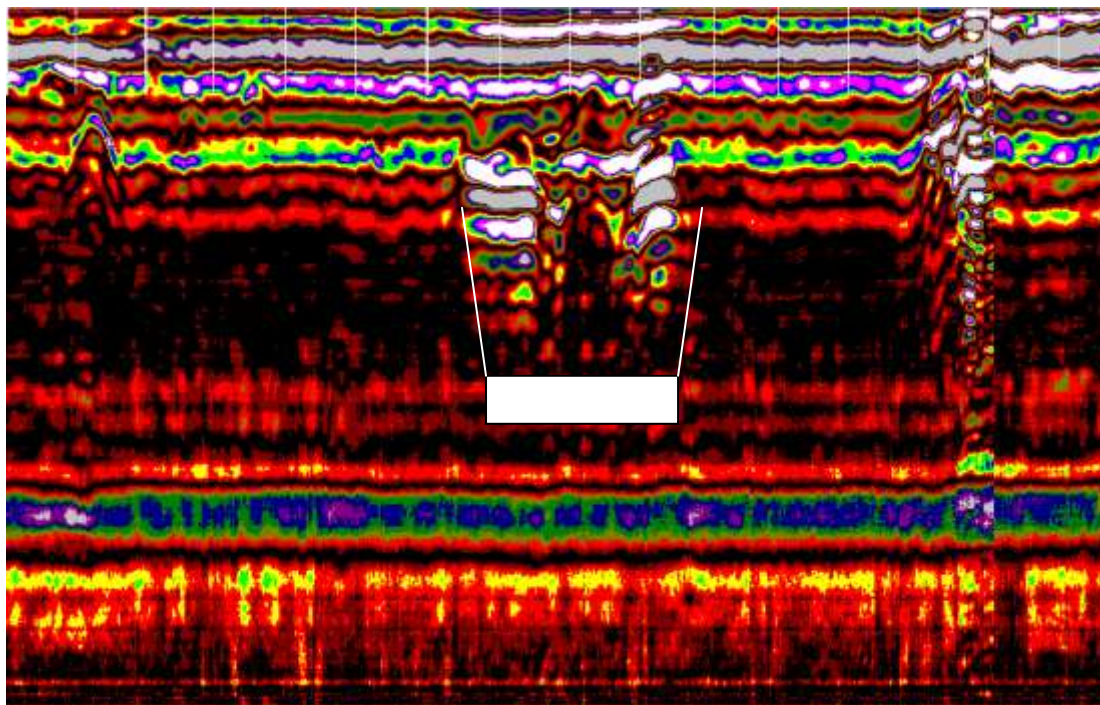
*Georadar*

El plano N° 1 muestra la disposición de los perfiles GPR en el terreno.





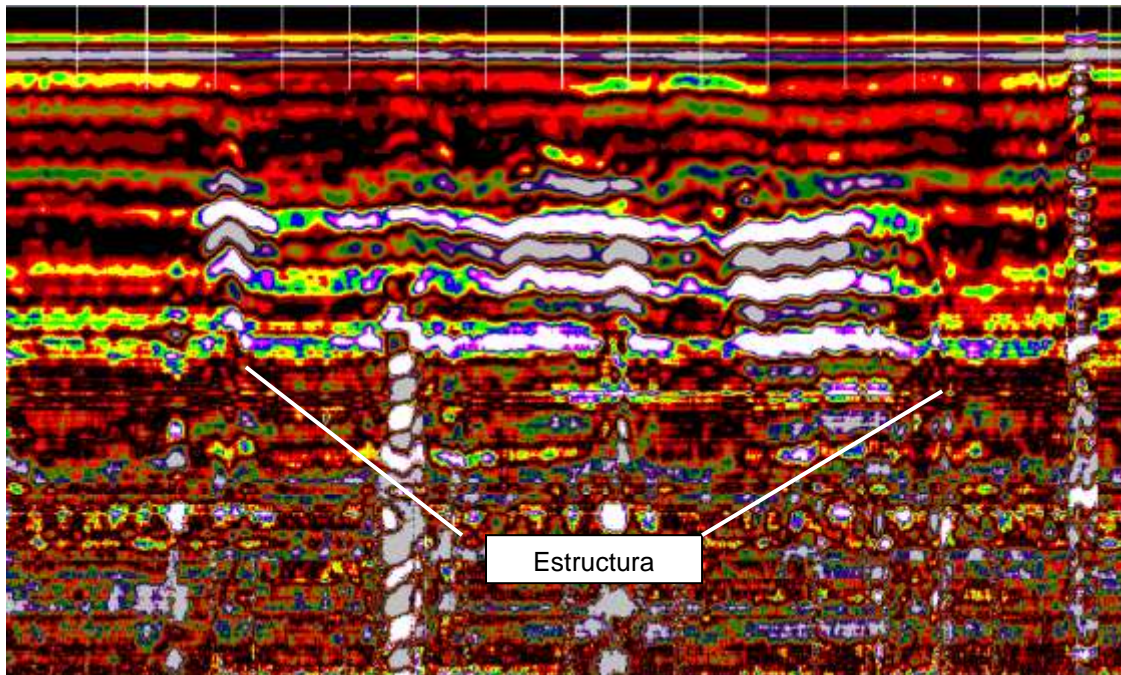
De los datos aportados por el georadar, se observa la presencia de anomalías geofísicas en la zona Oeste. Las anomalías consideradas, son asociables a la presencia de algún tipo de estructura sepultada. Los perfiles siguientes dan un claro ejemplo de esto.



Sector final del perfil georadar GPR7, en donde se observa la presencia de una anomalía asociable a la existencia de una estructura sepultada.



Sector final del perfil GPR8, en donde aparece también una anomalía asociable a una estructura sepultada.



Sector medio del perfil GPR22, que confirma la existencia de una estructura. La anomalía que aparece en este gráfico coincide con las mostradas anteriormente, y está ubicada en forma transversal a las anteriores.

De acuerdo a la información obtenida, se realizó la integración de la misma las que muestran la superposición de los datos originados por intermedio del electromagnetómetro (GEM), con las anomalías detectadas por el georadar.

Observamos en los mismos la coincidencia en la zona Oeste, de los valores máximos de conductividad relativa con las anomalías georadar descritas anteriormente, que corroboran la existencia de algún tipo de estructura sepultada.

En este plano se ubicó la posición de una excavación exploratoria. La misma debería alcanzar 1.00 metro de profundidad.

La profundidad volcada en este plano es aproximada y puede tener variaciones, ya que no se ha realizado ningún sondeo de calibración, y las mismas fueron calculadas asignándole al subsuelo una constante dieléctrica de  $k= 10$ .

## **DESARROLLO DEL TRABAJO**

La prospección geofísica se ejecutó el día 19 de Diciembre de 2001, en la zona interior del Fuerte Barragán, ubicado en la ciudad de Ensenada de la provincia de Buenos Aires.

Se realizaron 30 perfiles mediante un georadar SIR System 2, con una antena de 500 Mhz de frecuencia central y con un tiempo de propagación de onda de 50 nanosegundos, suficientes para alcanzar una profundidad de investigación de alrededor de 3 metros.

Para el procesamiento de las imágenes obtenidas se utilizó el software Radan Advance for Windows de Geophysical Survey Sistem.

posicionamiento fue realizado con un GPS MOVIL marca Trimble modelo PRO XRS y con un GPS BASE marca Trimble modelo 4600, con corrección diferencial de fase en postprocesamiento Se realizó también, una prospección con electromagnetómetro de frecuencia variable (EFV), que permitió obtener valores de conductividad aparente en toda el área de interés.

Mediante el programa Pathfinder Office.

*Se relevaron en total 2400m<sup>2</sup>, correspondientes al área interior del fuerte.*

## **TECNOLOGIA UTILIZADA**

### **Electromagnetómetro de Frecuencia Variable**

El electromagnetómetro de frecuencia variable es un equipo que permite medir la conductividad aparente del subsuelo (mS/m) cuyos distintos valores pueden ser asociados a la presencia de contaminantes que han variado por su presencia la resistividad eléctrica del terreno natural.

El equipo utilizado es un GEM 300 de la firma GSSI que permite seleccionar hasta 16 frecuencias simultáneas de medición entre 330 y 19950 Hz. La posibilidad de esta amplia selección que permite el equipo es importante para trabajar en el rango de medición adecuado para la aplicación específica en que se está utilizando, esta capacidad le confiere al equipo una gran versatilidad de uso a diferentes profundidades.

Los resultados son guardados en una memoria interna del equipo y pueden ser transferidos a una computadora en formato ASCII para ser utilizados con una planilla de cálculo o con formato adecuado para trabajar con programas de mapeo comerciales.

## **Georadar**

Los resultados de los trabajos de investigación representan cortes verticales del subsuelo, permitiendo así individualizar la presencia de materiales metálicos, basamentos de cemento, tuberías, cables, cavidades, pérdidas de líquidos, reconstrucciones estratigráficas y anomalías en general.

El radar está principalmente constituido por un transmisor de impulsos electromagnéticos de banda ancha, y su correspondiente receptor.

El instrumental utilizado comprende:

- UNIDAD PRINCIPAL SIR-SYSTEM.
- ANTENAS VARIAS (desde 20 Mhz a 2500 Mhz)

El terreno es energizado por un transductor (antena) preparado también para recibir las señales reflejadas en los cuerpos y estructuras sepultados. La señal reflejada es seriada numéricamente en 8 o 16 bits y archivada en un medio magnético adecuado.

La señal enviada a la antena desde el aparato transmisor está constituida por un impulso de una duración de pocos nanosegundos y el tiempo de escucha del sistema varía a elección del operador (7 - 1500 nanosegundos) en función de los objetivos y alcances del estudio.

La energía de este impulso es distribuida sobre un espectro de frecuencia muy amplio. Cuando este impulso es aplicado a la antena, sólo la parte de energía definible por la banda que pasa por la antena es realmente transmitida.

Las características de la antena, frecuencia central y ancho de banda, determinan entonces el tipo de energizador aplicado al terreno y la forma real del impulso transmitido.

La elección de la antena a utilizar está en función de las dimensiones y de la profundidad de los objetos reflectores, del objetivo de la investigación, y de los parámetros eléctricos del terreno, conductividad eléctrica y permeabilidad magnética.

El impulso enviado al terreno se propagará con una velocidad igual a la típica del campo electromagnético en el medio en cuestión. El valor de velocidad depende principalmente de la constante dieléctrica del medio atravesado.

La profundidad de penetración de la señal del radar es función de dos factores, la conductividad de los materiales del subsuelo, y la frecuencia de la señal de emisión. En

medios resistivos se obtiene alta penetración, asociada a una baja absorción de la onda electromagnética, y en medios conductivos una menor penetración (asociada a una alta absorción de onda electromagnética).

Parte de la energía transmitida por la antena será entonces reflejada por los cuerpos sepultados o por las discontinuidades geológicas eventualmente presentes, y será recibida por el receptor.

La energía del impulso reflejado será directamente proporcional al contraste del valor de los parámetros físicos entre el cuerpo sepultado y el terreno que lo contiene.

A fin de obtener las profundidades en metros de las anomalías observadas en el terreno se debe realizar una conversión de los datos mediante la correcta elección de los parámetros eléctricos reales del subsuelo o bien mediante un sondeo de calibración directa.

En la práctica, la ejecución del estudio se realiza moviendo la antena transmisora-receptora sobre la superficie a investigar, a lo largo de recorridos previamente determinados. El sistema de adquisición digital es sostenido en un vehículo apropiado y se conecta a la antena mediante un cable de comunicación.

El sistema puede proporcionar un perfil impreso interpretable en fase de adquisición, pero también está dotado de un sistema de captación digital de los datos, de fundamental importancia para poder realizar sucesivas elaboraciones sobre las señales adquiridas.

La tecnología de la prospección georadar ofrece, respecto a las disponibles hasta hoy, una serie de ventajas:

- La rapidez en la prospección. Inmediatamente después de la fase de adquisición, es posible evaluar la naturaleza, estructura y espesores del subsuelo.
- Investigación de tipo “no destructiva”. El terreno no es alterado por ninguna excavación o perforación.

### **3.3. BASÍLICA NUESTRA SEÑORA DE LUJÁN**

#### **CIUDAD DE LUJÁN**

#### **PROVINCIA DE BUENOS AIRES**

#### **OBJETIVO DEL ESTUDIO**

Los objetivos del presente estudio fueron los siguientes:

- Detectar la presencia de zonas con oquedades, terreno removido, asentamientos de suelos, estructuras enterradas, etc., en el exterior de la Basílica, hasta una profundidad aproximada de 6.00 a 8.00 metros. Como objetivo secundario de este punto, se prestará atención a la detección de estructuras que pudieran pertenecer a la Basílica original.
- Detectar la presencia de zonas con oquedades, terreno removido, asentamientos de suelo, estructuras enterradas, etc., en las cercanías de las fundaciones de las columnas interiores, ubicadas en el subsuelo de la Basílica, hasta una profundidad de 2.00 a 3.00 metros.
- Detectar la presencia de un posible paleocauce y/o paleoterrazas, en los alrededores de la Basílica, hasta una profundidad de 6.00 a 8.00 metros.

#### **RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

La prospección georadar realizada, de acuerdo a los objetivos mencionados (ver planos N°1 y 2), ha permitido confeccionar el Plano de Resultados N° 3, en el que se reflejan las conclusiones del estudio. o.

En los mismos se ha volcado la información obtenida de la interpretación de los perfiles georadar, ubicándose la posición de diversas anomalías geofísicas asociables a la presencia de estructuras, vigas, huecos, etc.

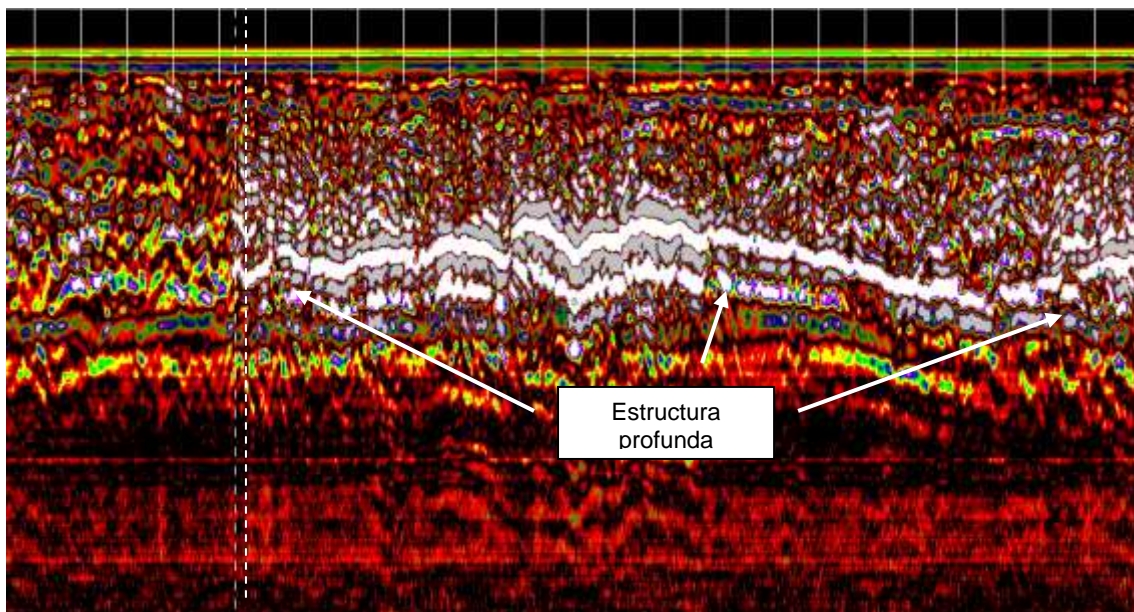
#### ***Área exterior de la Basílica:***

En esta zona se discriminaron tres tipos de anomalías geofísicas, que fueron asociadas a estructuras compactas, disgregadas, y a la existencia de vigas, tabiques o cimientos.

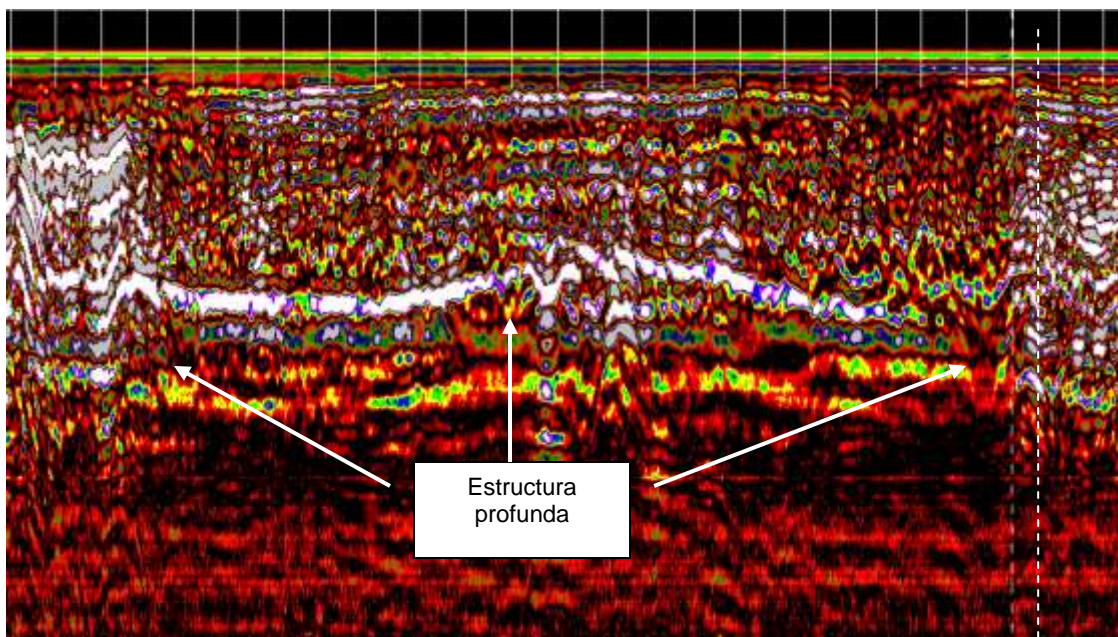
***Estructuras compactas:***

Las anomalías asociables a este tipo de estructura, fueron graficadas en los planos de resultados con áreas rayadas en azul. En el mismo se observan tres zonas claramente definidas; una en la entrada de la Basílica, y las otras a la derecha y a la izquierda del crucero.

En la primera, como muestran los ejemplos de los perfiles GPR 60; 76 y 77, se observa en cada uno de ellos, un reflector continuo variable entre 1.20 y 1.50 metros de profundidad, que estaría indicando la presencia de un estructura continua. Es notable la coincidencia de este reflector profundo con los límites presumbles de la construcción de la antigua iglesia, graficados en los planos con una línea punteada verde.

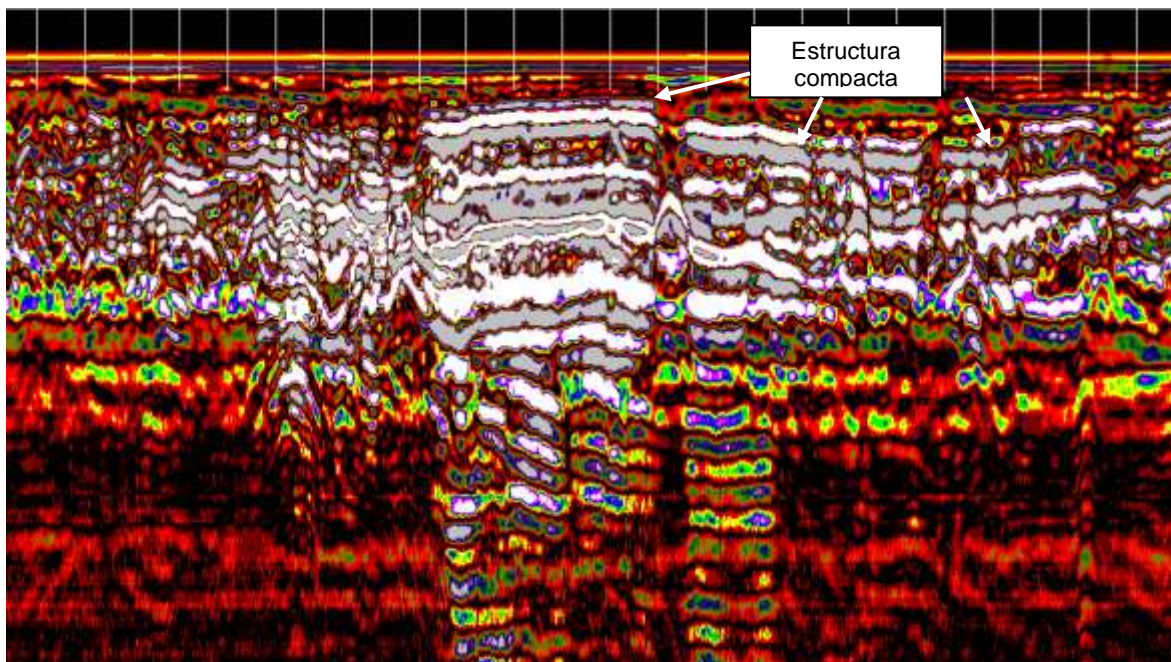


Perfil GPR76: la línea punteada corresponde al límite presumbible de la antigua iglesia.



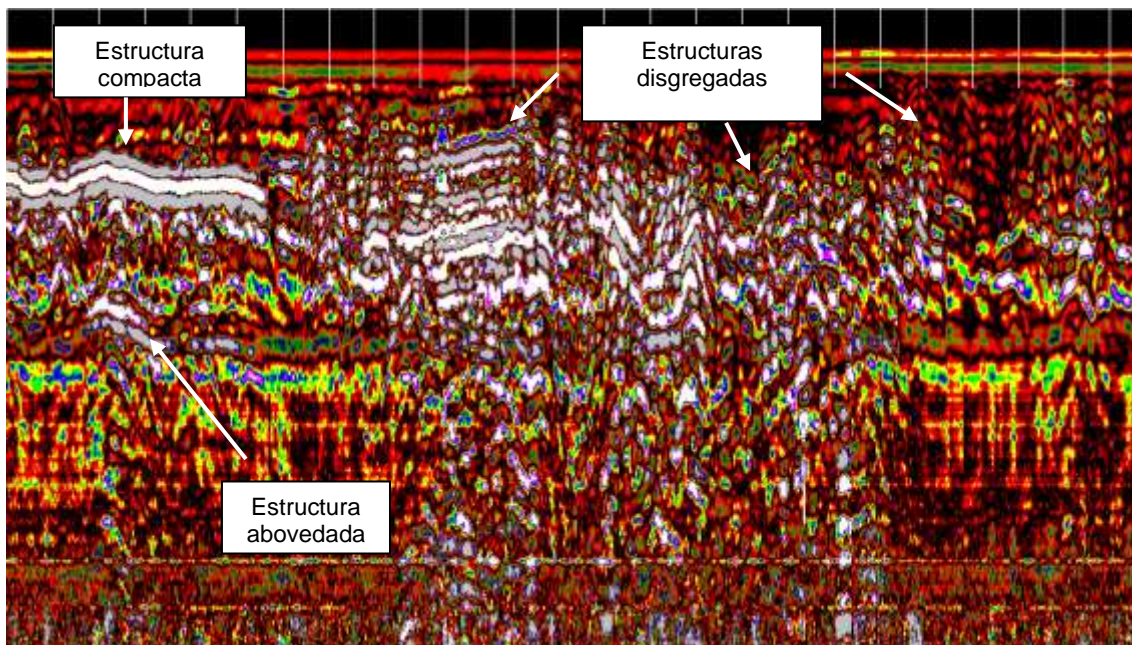
Perfil GPR77: igual que en el caso anterior, la línea punteada corresponde al final presumible de la antigua iglesia.

En la zona ubicada a la derecha del crucero, se detectaron anomalías que también podrían asociarse a estructuras compactas subsuperficiales, alrededor de 0.40m. de profundidad, como muestra el ejemplo del perfil GPR87.



Perfil GPR87: se observa una importante reflexión en la parte central del perfil, originada en algún tipo de estructura importante.

La última zona, en donde se asociaron anomalías geofísicas a estructuras compactas, es la que se encuentra a la izquierda del cruce. El perfil GPR42, evidencia claramente la existencia de una posible estructura continua, a una profundidad de 0.70 metros, que se interrumpe abruptamente para dar paso a anomalías asociables a estructuras disgregadas, que se explican en el siguiente punto. También se observa en este sector una anomalía más profunda, ubicada a 1.20 metros, que podría estar asociada a la existencia de alguna estructura de forma abovedada.



Perfil GPR42

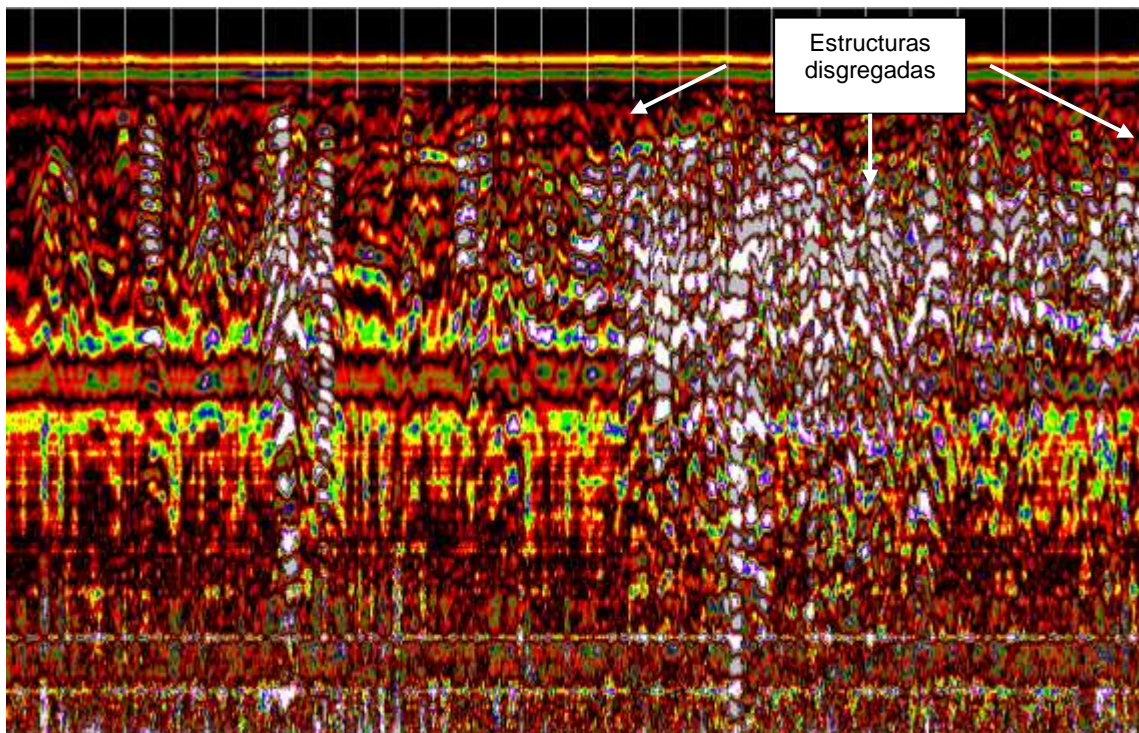
***Estructuras disgregadas:***

Las anomalías asociables a este tipo de estructuras, fueron graficadas en color gris en el Plano de Resultados. Estas zonas se encuentran concentradas mayormente, en la parte superior del plano.

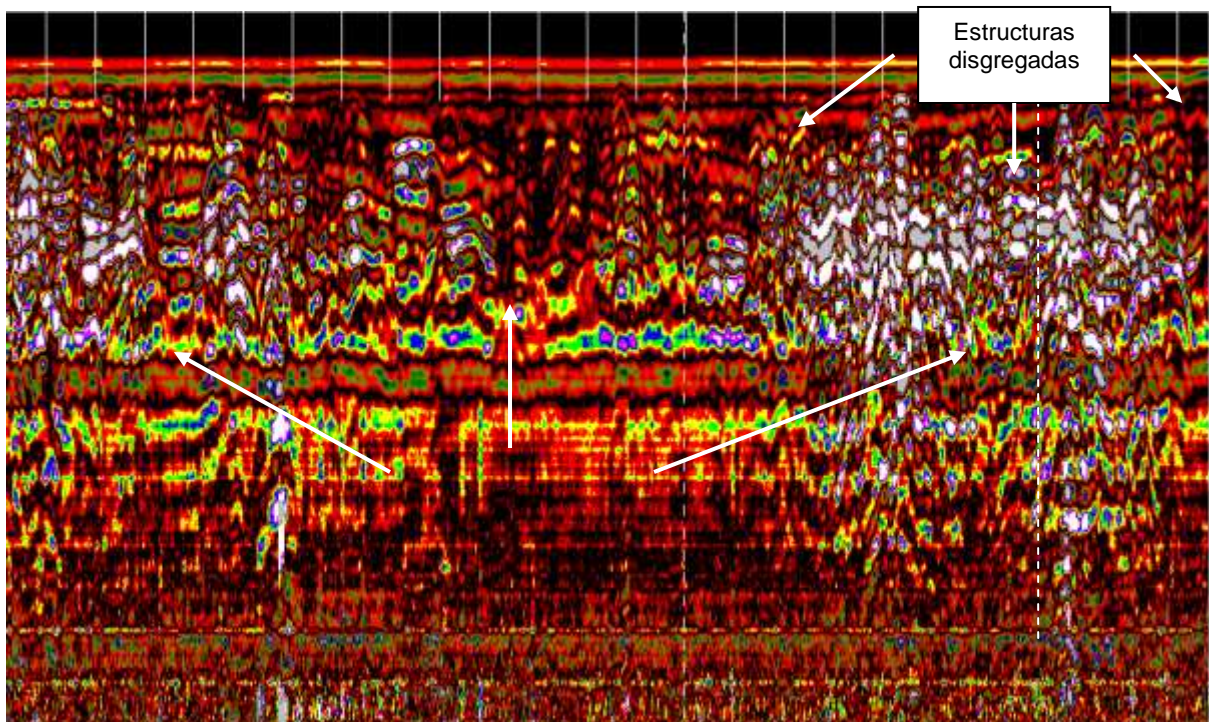
El perfil GPR42, presenta luego de la estructura compacta descrita anteriormente, gran cantidad de reflexiones. Las mismas indican la existencia de restos de materiales, escombros etc. Es muy posible que la estructura continua detectada en este perfil, se haya ido disgregando por efectos de agentes erosivos, dando como respuesta este tipo de imagen.

A continuación se observan otros ejemplos que ilustran esta descripción.





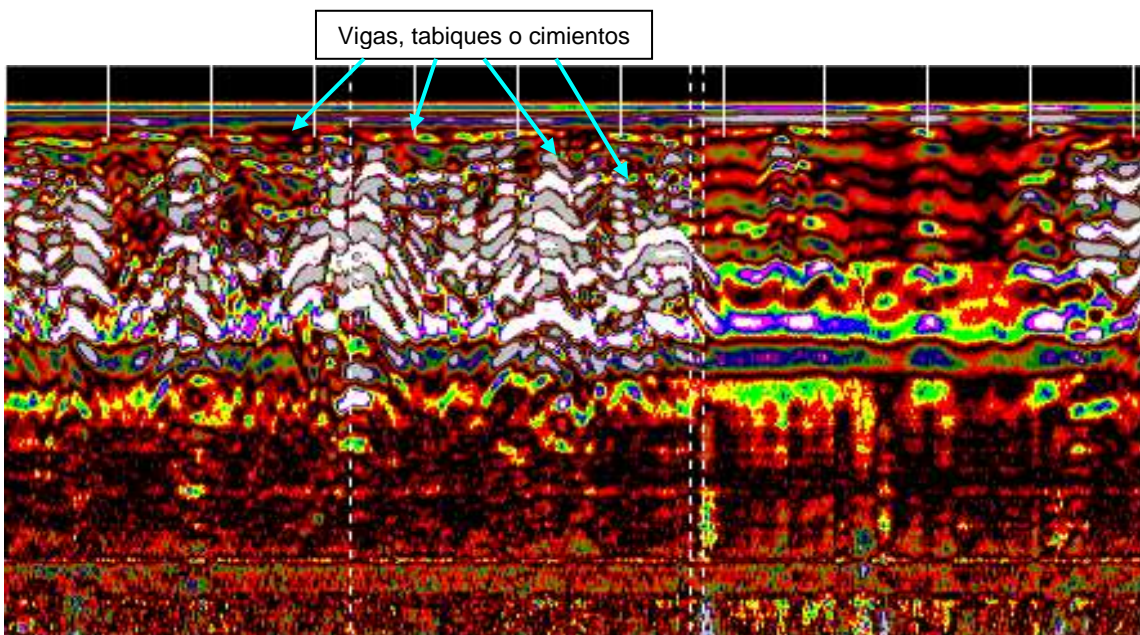
Perfil GPR41: sector final de la línea georadar, en donde se observan las múltiples reflexiones asociables a presencia de materiales sueltos.



Perfil GPR46, en el sector en donde se cruza con el perfil GPR41, que confirma la existencia de este tipo de anomalías.

***Vigas, tabiques o cimientos:***

Este tipo de anomalías geofísicas, si bien podrían incluirse en la descripción de estructuras, se presentan en forma puntual y claramente definidas. En el perfil GPR18, observamos varias anomalías puntuales de forma hiperbólica, que fueron asociadas a la existencia de vigas. En el caso de que existiesen tabiques sepultados, la reflexión originada en la parte superior del mismo, sería igual a la que originaría una viga o una cañería. La única forma de discriminarlos sería realizando calicatas exploratorias dirigidas, en los puntos mencionados en el Plano de Resultados.



Perfil GPR18: se observan las anomalías asociadas a la presencia de vigas, tabiques o cimientos. La primera línea punteada, corresponde al límite de la antigua iglesia.

Este tipo de anomalías, se concentra en mayor medida en el área izquierda de la Basílica.

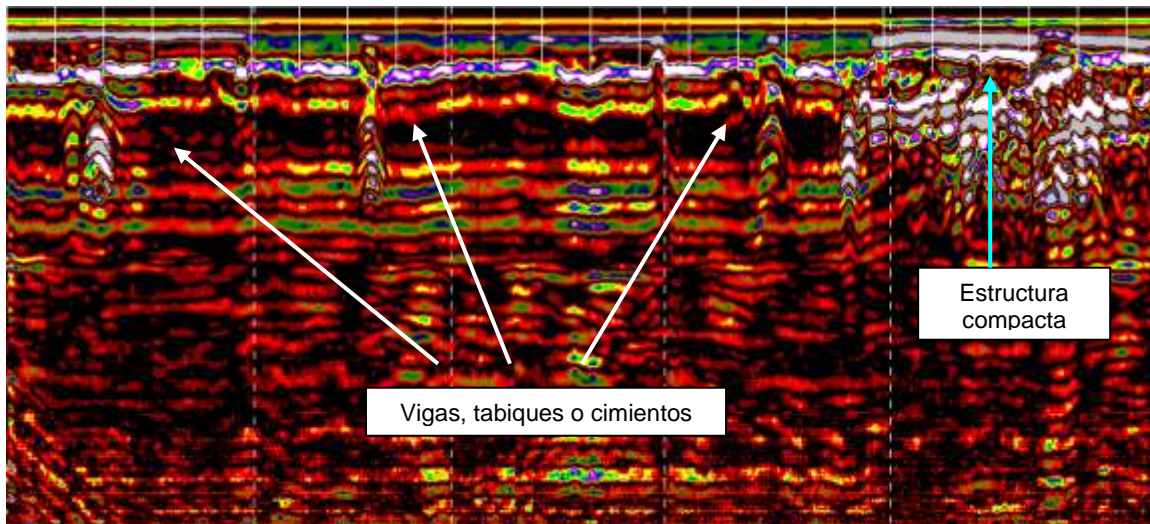
***Área interior – Cripta***

En la cripta ubicada en el subsuelo de la Basílica, se discriminaron seis tipos de anomalías geofísicas, las cuales se describen a continuación:

***Estructuras compactas:***

Se detectaron dos sectores de la cripta, en donde existe una respuesta de la onda georadar asociable a una estructura compacta subsuperficial, ubicada a una profundidad cercana a los 20cm, las cuales se encuentran graficadas en color azul en el Plano de

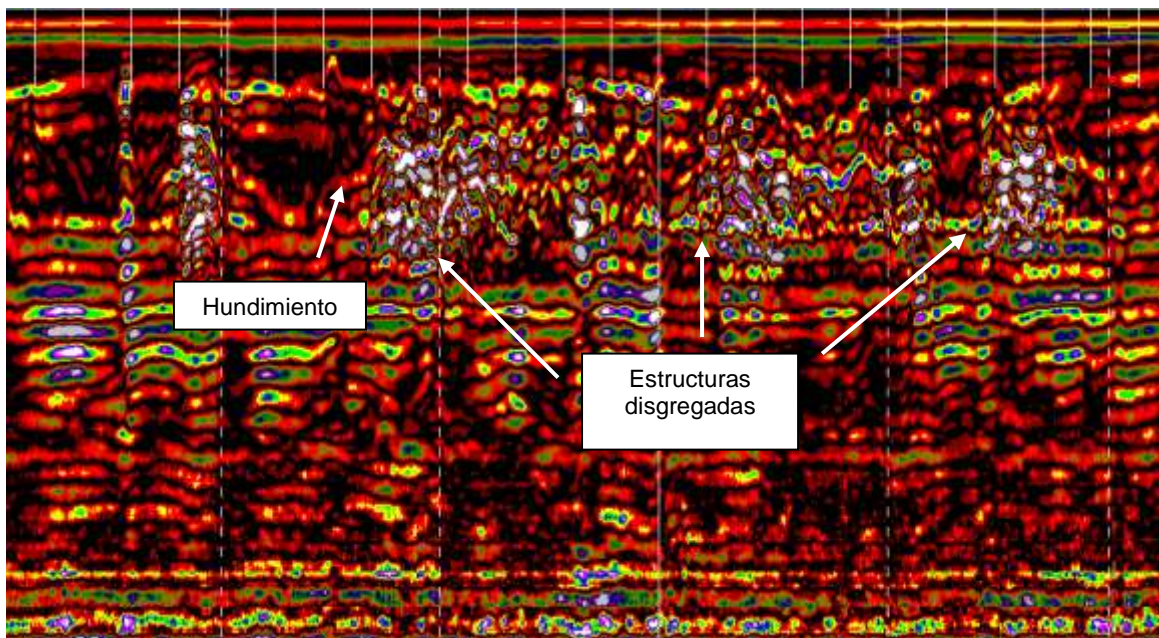
Resultados. El perfil GPR19 muestra la zona en cuestión en donde se observa claramente la anomalía considerada.



Perfil GPR19, sector final.

***Estructuras disgregadas***

Las anomalías consideradas en este caso, son iguales a las descritas en el punto correspondiente a la parte exterior de la Basílica. En el Plano de Resultados, se encuentran graficadas en gris. Como ejemplo se adjunta el perfil GPR8



Perfil GPR8

***Vigas, tabiques o cimientos:***

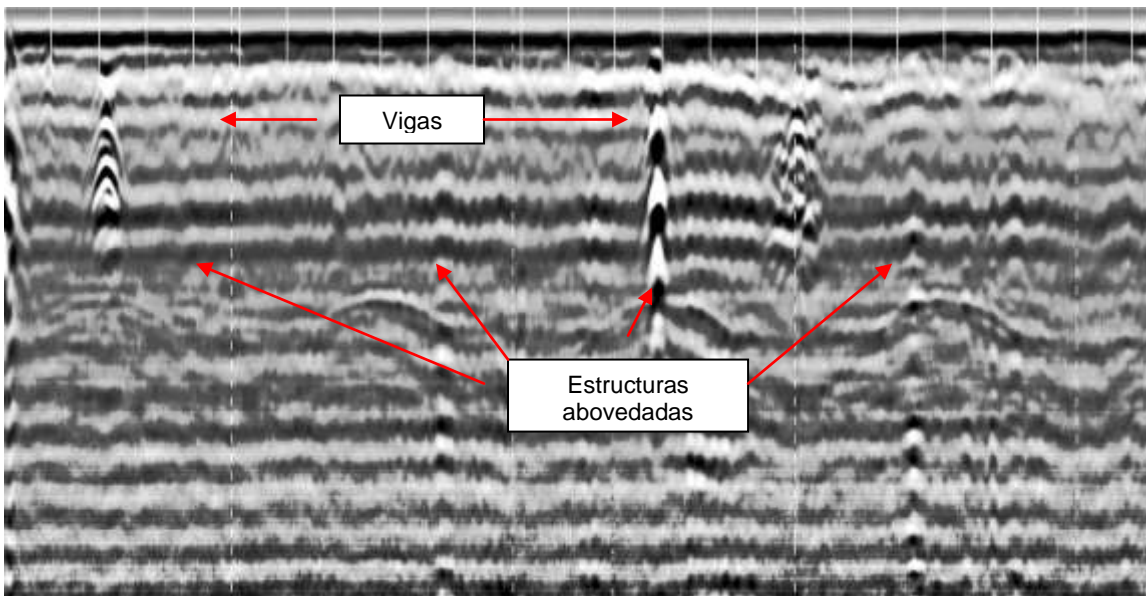
De la misma manera que el caso anterior, la descripción de este tipo de anomalía se encuentra explicada en la que corresponde a la parte exterior de la Basílica.

El perfil GPR19, presentado en la página anterior, y el perfil GPR15 a continuación, son claros ejemplos del tipo de respuesta obtenida por el georadar.

Cabe aclarar que se detectó en la parte central de los dos pasillos ubicados en la cripta, una viga longitudinal a los mismos, representada en el Plano de Resultados por dos líneas verdes continuas.

***Estructuras abovedadas:***

En varios sectores de la cripta se encontraron anomalías geofísicas asociables a la presencia de una estructura abovedada. Todas estas anomalías, se encuentran comprendidas entre columnas, y fueron representadas en el Plano de Resultados por áreas rayadas en celeste. El perfil GPR15, grafica claramente el tipo de reflexión obtenido, ubicado a una profundidad de 1.40 metros.

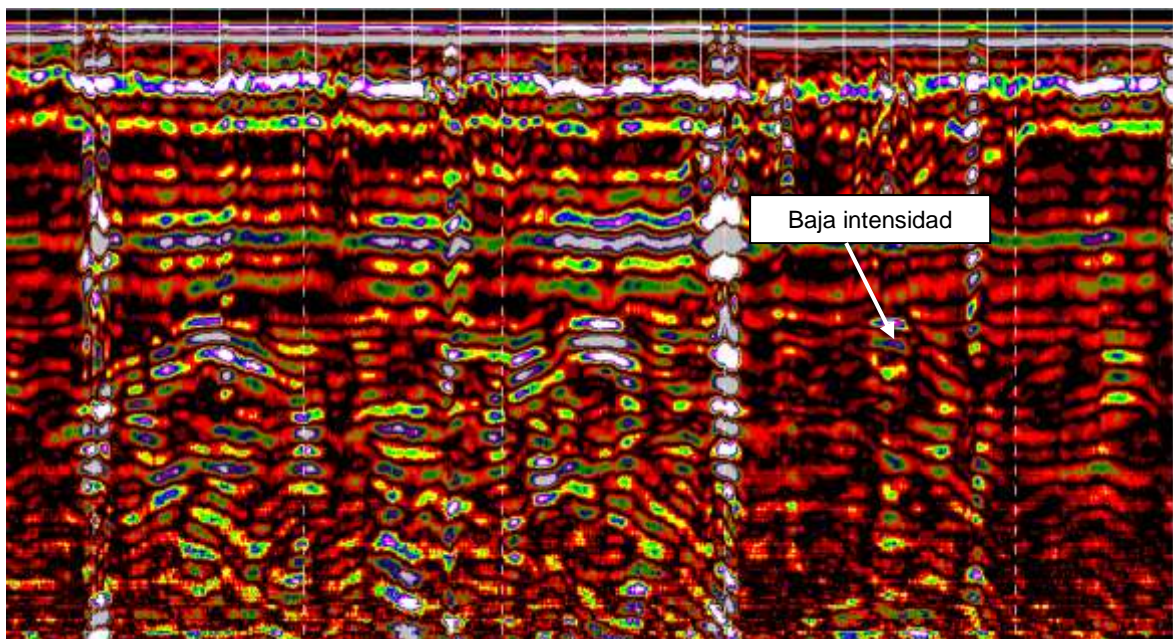
***Hundimientos***

Se observó en dos sectores, anomalías asociables a este fenómeno. El perfil GPR8, presentado anteriormente, muestra el sector en donde se presume la existencia de un pequeño hundimiento, representado en el Plano de Resultados, por puntos rojos.

### ***Anomalía de baja intensidad***

Se detectó una zona, cercana a la entrada de la cripta, en donde la señal emitida por el georadar era absorbida casi en su totalidad. Esto es debido generalmente a la presencia de suelos limosos-arcillosos, saturados en agua, y de baja densidad o consistencia.

El perfil GPR32, muestra como es la reflexión que se obtiene en este tipo de suelos.



Perfil GPR32

Nota:

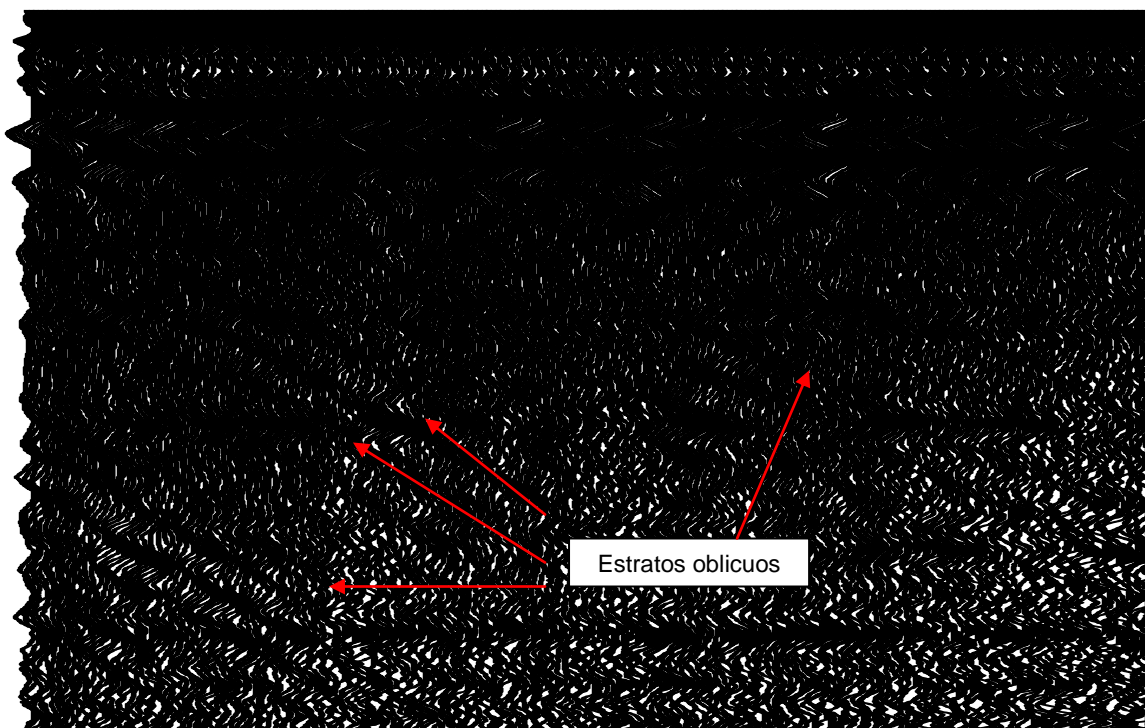
Las profundidades volcadas en el Plano de Resultados, fueron recalculadas en base a los sondeos realizados. Se utilizó para la determinación de las mismas en el área exterior de la Basílica una constante dieléctrica  $k=9$ , y en el área correspondiente a la cripta una constante dieléctrica de  $k=10$ . (ver capítulo N°4 del presente informe)

Por lo que se refiere a la situación geomorfológica subterránea del área investigada, la prospección georadar ha detectado la presencia de una "paleoterraza", cuyos bordes tienen una pendiente hacia el actual río Luján, ubicada con una dirección aproximadamente paralela al mismo.

Su posicionamiento esquemático se observa en el Plano de Resultados.

Se han detectado dos posibles bordes de origen fluvial (el georadar ha evidenciado varios estratos oblicuos secuenciados en forma asimétrica, perfil GPR107) que hacen suponer la presencia de un paleocauce o antiguo meandro del río. La ubicación esquemática de los mismos se encuentra graficada en el Plano de Resultados.

#### PerfilGPR107



### **DESARROLLO DEL TRABAJO**

La prospección georadar se efectuó durante los días 26, 27 y 30 de Julio de 2002 en las áreas mencionadas en el punto 1 del presente informe, correspondientes a la Basílica de Nuestra Señora de Luján.

Se realizaron 113 perfiles en el exterior de la Basílica, mediante un georadar SIR System 10H, con antenas de 500 y 300 Mhz de frecuencia central, y con un tiempo de propagación de onda variable entre 60 y 120 nanosegundos, suficientes para alcanzar las profundidades de investigación previstas (plano N° 1 y 2).

En el área correspondiente a la cripta, se realizaron 33 perfiles, mediante un georadar SIR System 2, con una antena de 500 Mhz de frecuencia central, y con un tiempo de

propagación de onda de 60 nanosegundos, suficiente para alcanzar la profundidad requerida (plano N°1).

Para el procesamiento de las imágenes obtenidas se utilizó el software Radan Advance for Windows de Geophysical Survey Sistem.

Posteriormente se realizó una reinterpretación de las imágenes obtenidas, calibrándose con los datos obtenidos de los pozos realizados.

## **TECNOLOGIA UTILIZADA**

### **Georadar**

Los resultados de los trabajos de investigación representan cortes verticales del subsuelo, permitiendo así individualizar la presencia de materiales metálicos, basamentos de cemento, tuberías, cables, cavidades, pérdidas de líquidos, reconstrucciones estratigráficas y anomalías en general.

El radar está principalmente constituido por un transmisor de impulsos electromagnéticos de banda ancha, y su correspondiente receptor.

El instrumental utilizado comprende:

- UNIDAD PRINCIPAL SIR-SYSTEM.
- ANTENAS VARIAS (desde 20 Mhz a 2500 Mhz)

El terreno es energizado por un transductor (antena) preparado también para recibir las señales reflejadas en los cuerpos y estructuras sepultados. La señal reflejada es seriada numéricamente en 8 o 16 bits y archivada en un medio magnético adecuado.

La señal enviada a la antena desde el aparato transmisor está constituida por un impulso de una duración de pocos nanosegundos y el tiempo de escucha del sistema varía a elección del operador (7 - 1500 nanosegundos) en función de los objetivos y alcances del estudio.

La energía de este impulso es distribuida sobre un espectro de frecuencia muy amplio. Cuando este impulso es aplicado a la antena, sólo la parte de energía definible por la banda que pasa por la antena es realmente transmitida.

Las características de la antena, frecuencia central y ancho de banda, determinan entonces el tipo de energizador aplicado al terreno y la forma real del impulso transmitido.

La elección de la antena a utilizar está en función de las dimensiones y de la profundidad de los objetos reflectores, del objetivo de la investigación, y de los parámetros eléctricos del terreno, conductividad eléctrica y permeabilidad magnética.

El impulso enviado al terreno se propagará con una velocidad igual a la típica del campo electromagnético en el medio en cuestión. El valor de velocidad depende principalmente de la constante dieléctrica del medio atravesado.

La profundidad de penetración de la señal del radar es función de dos factores, la conductividad de los materiales del subsuelo, y la frecuencia de la señal de emisión. En medios resistivos se obtiene alta penetración, asociada a una baja absorción de la onda electromagnética, y en medios conductivos una menor penetración (asociada a una alta absorción de onda electromagnética).

Parte de la energía transmitida por la antena será entonces reflejada por los cuerpos sepultados o por las discontinuidades geológicas eventualmente presentes, y será recibida por el receptor.

La energía del impulso reflejado será directamente proporcional al contraste del valor de los parámetros físicos entre el cuerpo sepultado y el terreno que lo contiene.

A fin de obtener las profundidades en metros de las anomalías observadas en el terreno se debe realizar una conversión de los datos mediante la correcta elección de los parámetros eléctricos reales del subsuelo o bien mediante un sondeo de calibración directa.

En la práctica, la ejecución del estudio se realiza moviendo la antena transmisora-receptora sobre la superficie a investigar, a lo largo de recorridos previamente determinados. El sistema de adquisición digital es sostenido en un vehículo apropiado y se conecta a la antena mediante un cable de comunicación.

El sistema puede proporcionar un perfil impreso interpretable en fase de adquisición, pero también está dotado de un sistema de captación digital de los datos, de fundamental importancia para poder realizar sucesivas elaboraciones sobre las señales adquiridas.

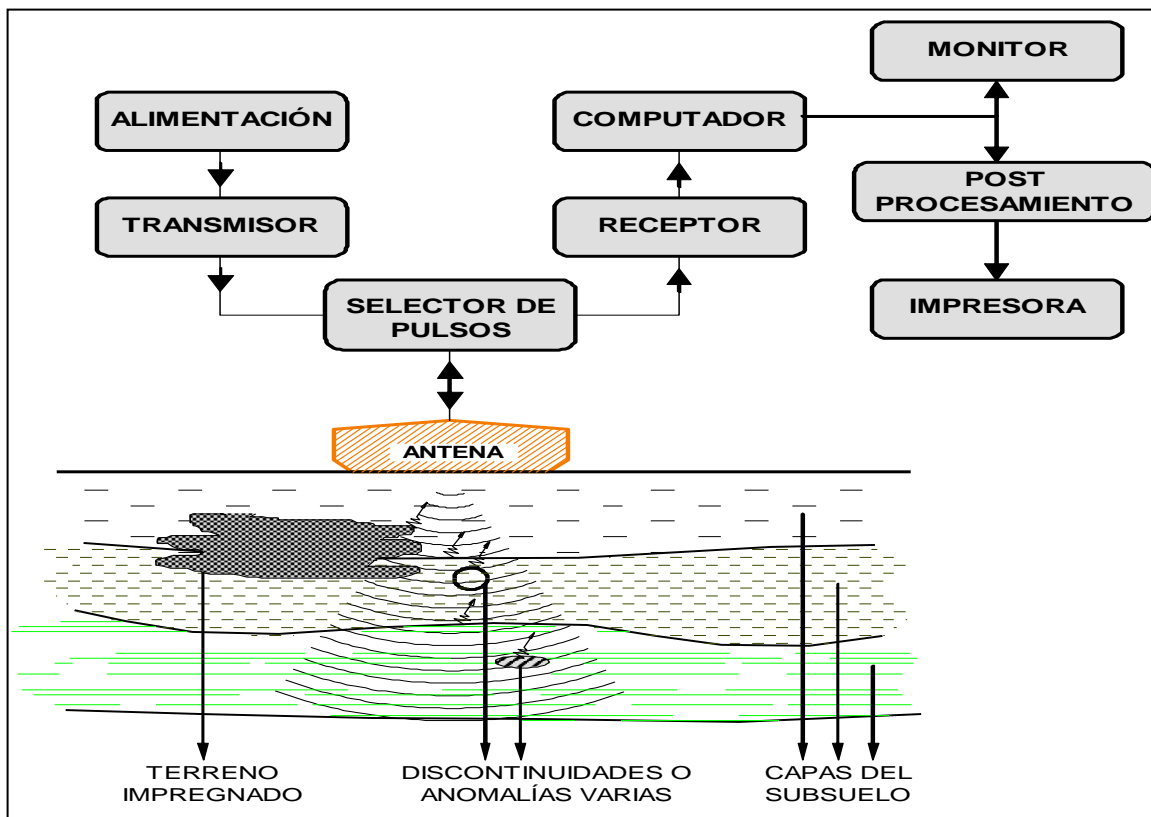
La tecnología de la prospección georadar ofrece, respecto a las disponibles hasta hoy, una serie de ventajas:

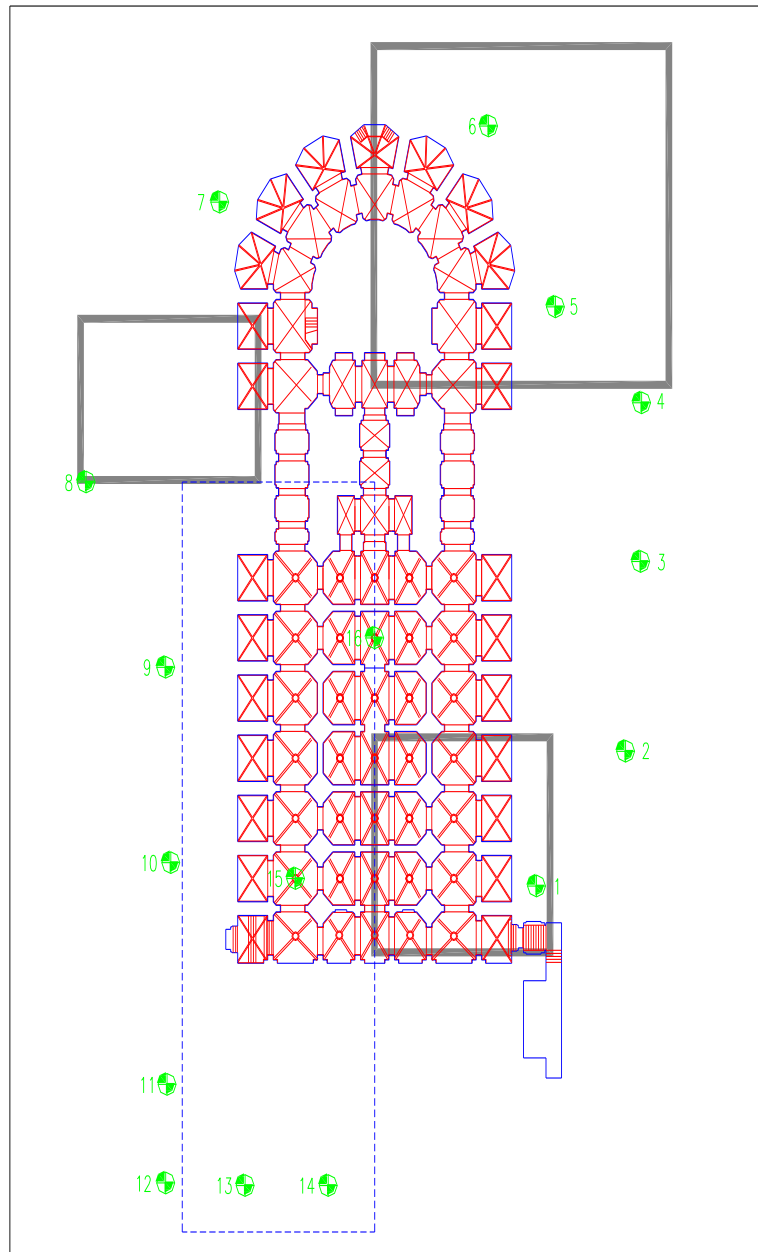
- La rapidez en la prospección. Inmediatamente después de la fase de adquisición, es posible evaluar la naturaleza, estructura y espesores del subsuelo.

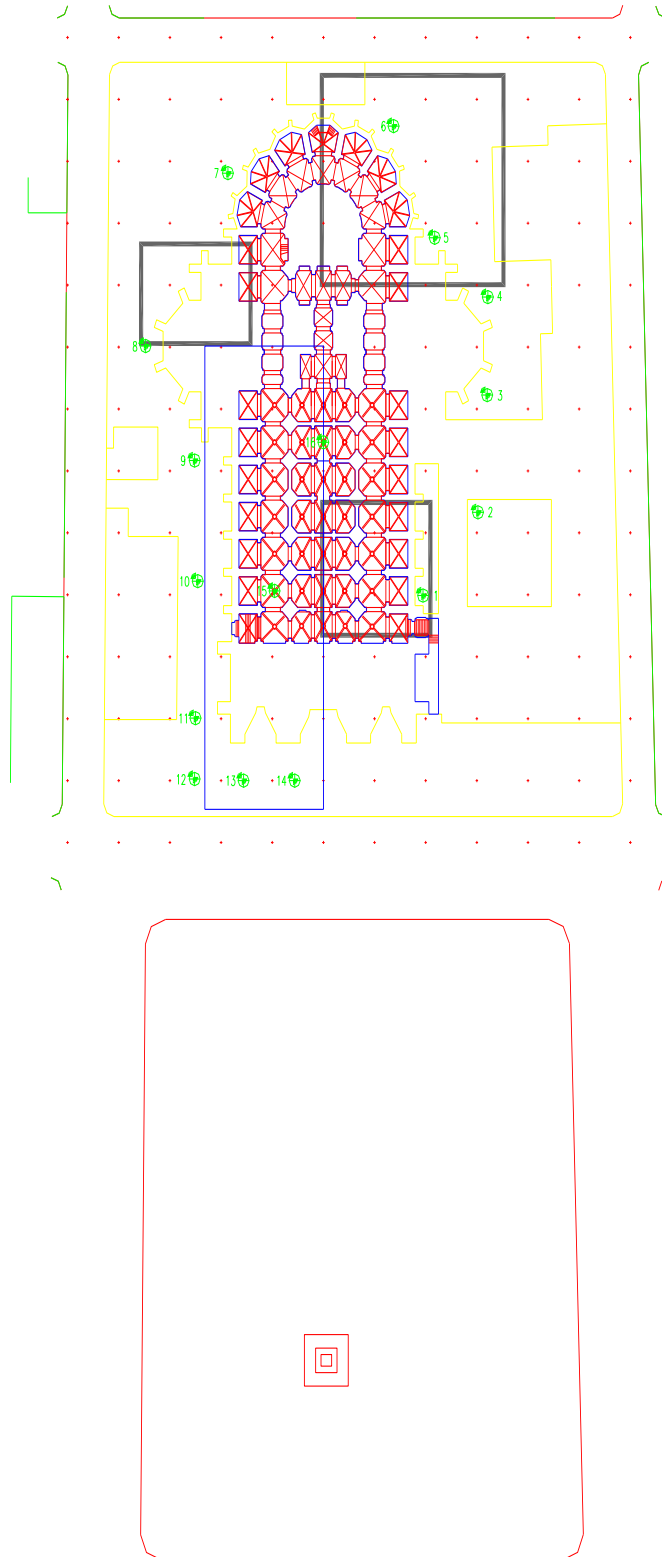


- Investigación de tipo “no destructiva”. El terreno no es alterado por ninguna excavación o perforación.
- Capacidad de realizar estudios continuos (centímetro a centímetro). Se evitan de ésta manera la interpolación de datos geofísicos y sus subsecuentes errores.

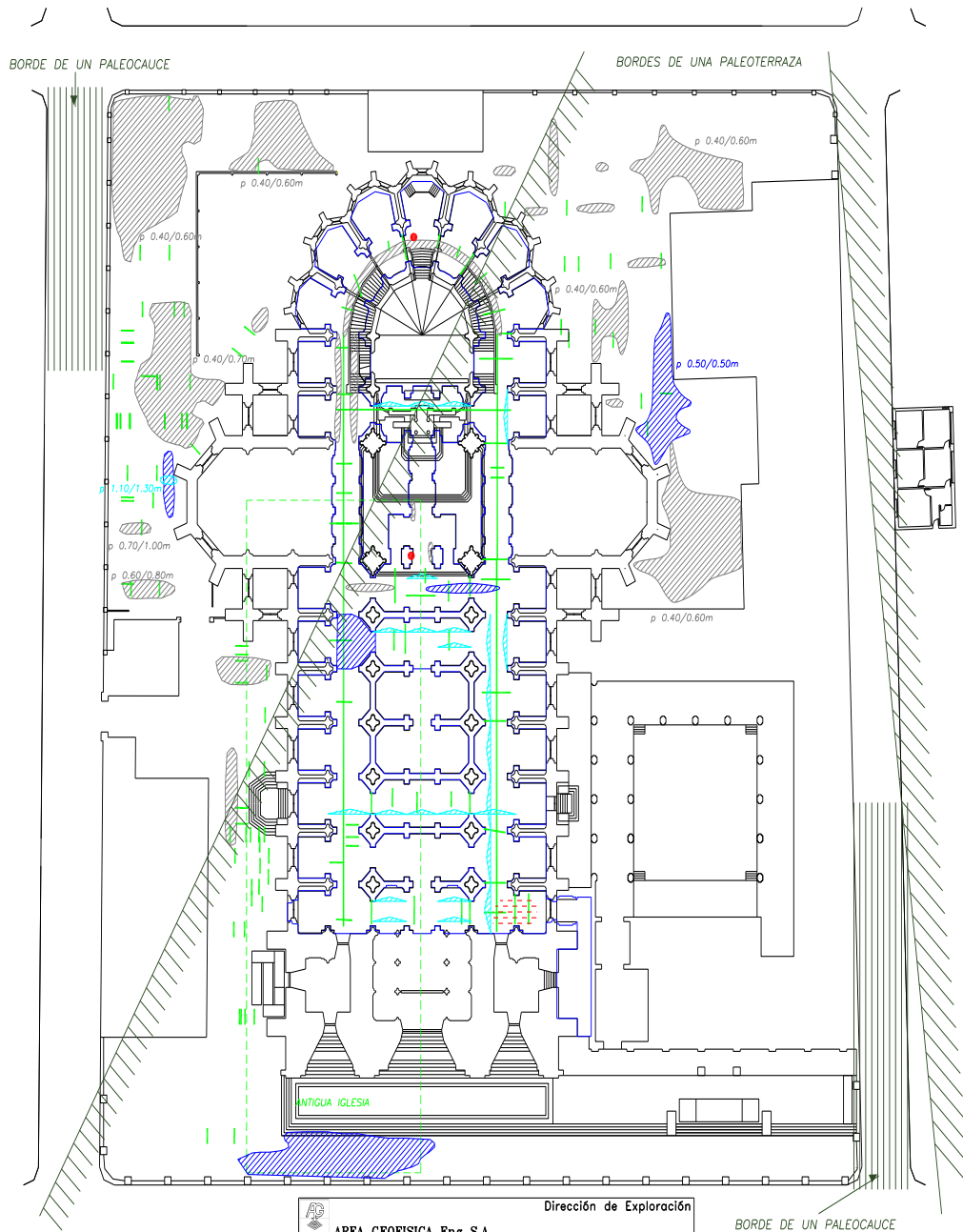
El método se puede aplicar también sobre la superficie del agua y sobre la superficie de hielos.



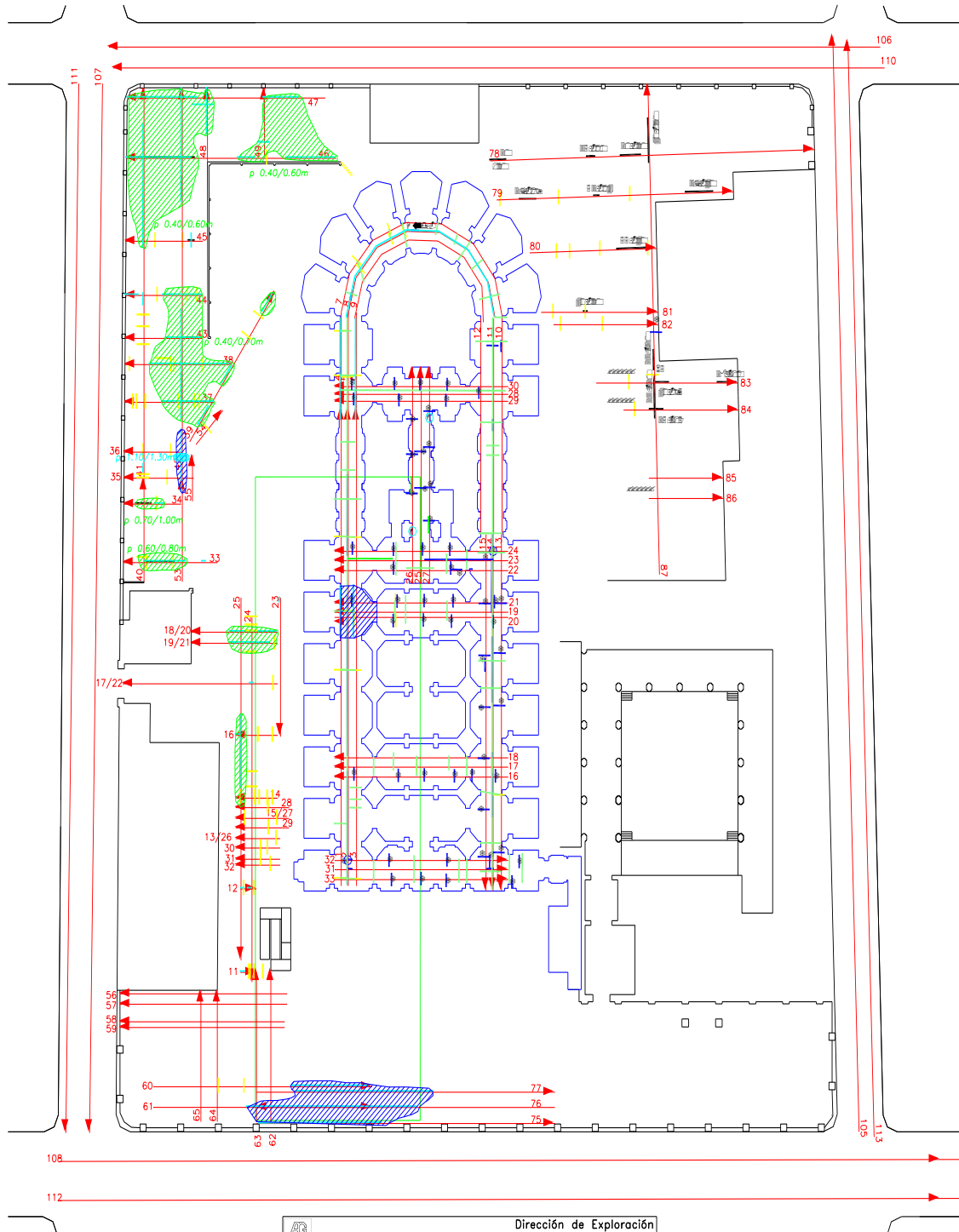





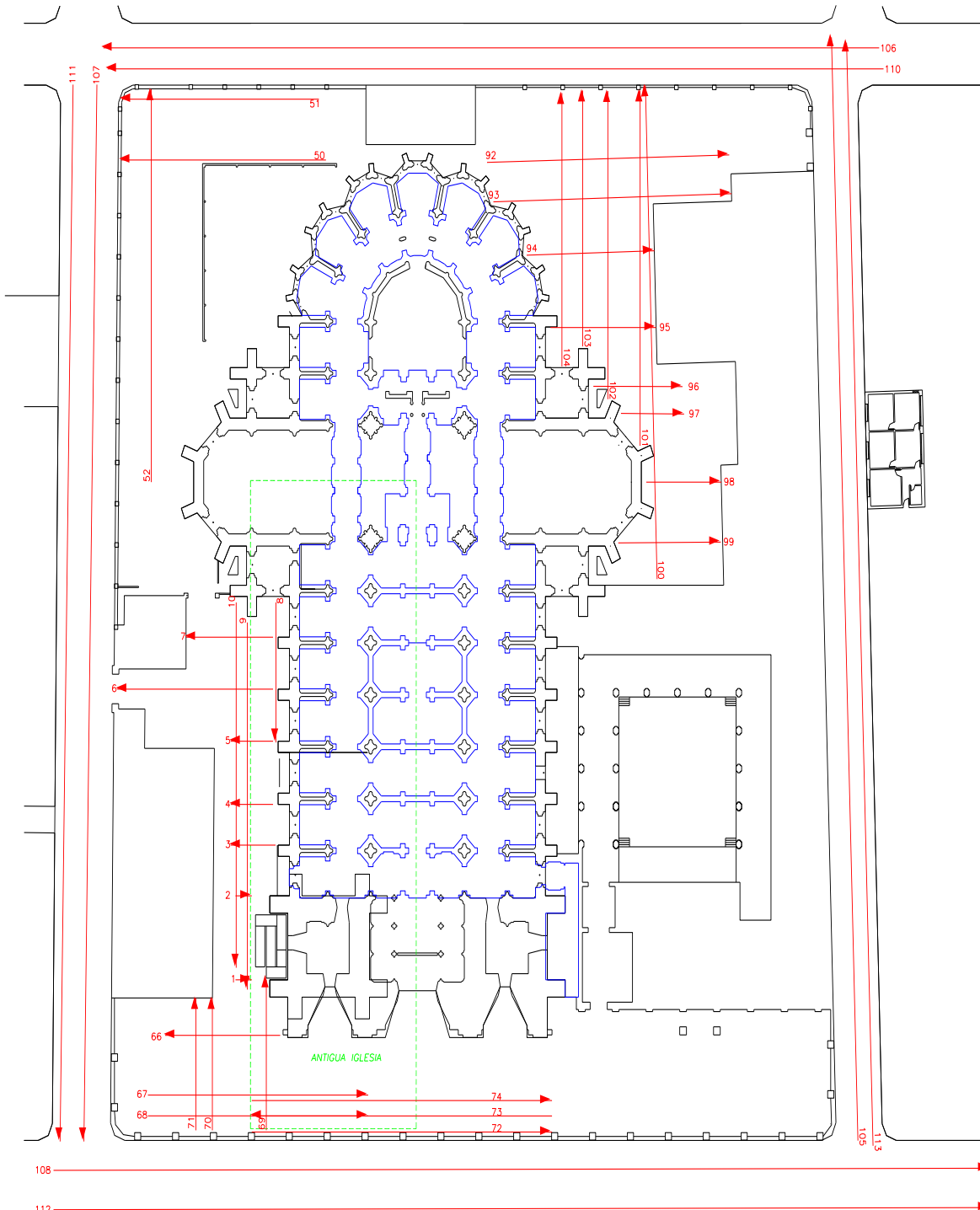





Dirección de Exploración	
<b>AREA GEOPISICA Eng S.A.</b>	
CLIENTE	REFERENCIAS
Estudio Gazaneo & Morello	— VIGAS/TABIQUES/CIMENTOS
PROSPECCION GEORADAR	▨ ESTRUCTURAS COMPACTAS
Basilica	▨ ESTRUCTURAS DISGREGADAS
Ntra. Sra. de Luján	- - - ANOMALIA BAJA INTENSIDAD
Luján	— ESTRUCTURA ABOVEDADAS
Pcia. de Buenos Aires	● HUNDIMIENTO
PLANO DE RESULTADOS	
ESC 1:500	
PLANO 3	HOJA 1/1
	AGOSTO 2001



 Dirección de Exploración	
AREA GEOPISICA Eng S.A.	
CLIENTE AGUAS ARGENTINAS S.A.	REFERENCIAS
PROSPECCION GEORADAR	9 → LINEA GEORADAR
ZONA Zufriategui y Azcuénaga Vicente Lopez	
PLANIMETRIA	
ESC 1:500	
PLANO 2	HOJA 1/1
ENERO 2000	



 Dirección de Exploración <b>AREA GEOFISICA Eng S.A.</b>	
CLIENTE Estudio Gazaneo & Morello	REFERENCIAS
PROSPECCION GEORADAR Basílica Ntra. Sra. de Luján Luján Pcia. de Buenos Aires PERFILES GPR 300 MHz ESC 1:500	9 → LINEA GEORADAR
PLANO 2	HOJA 1/1
AGOSTO 2001	

## 4.1. Tablas

$\vec{E}_t$	Intensidad del campo eléctrico transmitido (refractado).	V/m
f	Frecuencia.	Hz = $10^{-6}$ MHz
$f_a$	Fracción en volumen de agua.	Tanto por uno
$f_h$	Fracción en volumen de hielo.	Tanto por uno
F	Área efectiva de reflexión.	m <sup>2</sup>
G	Ganancia.	dB
$G_d$	Ganancia de una antena direccional.	dB
$G_{RX}$	Ganancia del receptor.	dB
$G_{TX}$	Ganancia del emisor.	dB
h	Profundidad hasta el reflector (separación entre la antena y el reflector).	m
H	Función que depende de todos los factores de atenuación de la energía entre el emisor y el receptor.	Sin dimensiones.
$\vec{H}$	Intensidad del campo magnético.	A/m
$\vec{H}_0$	Intensidad del campo magnético inicial en el foco.	A/m
$\vec{H}_i$	Intensidad del campo magnético incidente.	A/m
$\vec{H}_r$	Intensidad del campo magnético reflejado.	A/m
$\vec{H}_t$	Intensidad del campo magnético transmitido (refractado).	A/m
i	Intensidad del flujo de electrones	A/m
I	Índice de resistividad de una roca parcialmente saturada.	Sin dimensiones.
$\vec{J}$	Densidad de corriente eléctrica debida al movimiento de cargas	A/m <sup>2</sup> $\vec{J} = \vec{J}_m + \vec{J}_r$
$\vec{J}_r$	Densidad volumétrica de corriente debida a las cargas libres.	A/m <sup>2</sup>
$\vec{J}_m$	Densidad de corriente por polarización y magnetización del material.	A/m <sup>2</sup>
L	Grado de atenuación.	np dB
L	Constante de pérdidas	dB



$L_0$	Pérdida en el espacio libre.	dB
m	masa	Kg
$\vec{M}$	Imanación.	A/m
n	Exponente de saturación.	Sin dimensiones
nt	Número de trazas que alcanzan a un reflector.	Trazas
P	Factor de pérdidas.	Sin dimensiones $P = \frac{\sigma}{\omega\epsilon}$
$P_1$	Potencia emitida.	W
$P_2$	Potencia emitida en la dirección del reflector.	W
$P_3$	Potencia que alcanza al reflector (potencia incidente).	W
$P_4$	Potencia reflejada por el receptor.	W
$P_5$	Potencia redirigida hacia el receptor.	W
$P_6$	Potencia que alcanza al reflector tras la reflexión.	W
$P_7$	Potencia recibida.	W
$P_{arcilla}$	Porcentaje de arcilla.	Tanto por uno
$P_c$	Potencia recibida por una antena.	W
$P_e$	Potencia entregada a la antena.	W
$P_g$	Potencia generada por el emisor.	W
$P_{max. radiada}$	Potencia máxima radiada por la antena.	W
$P_{min}$	Potencia mínima detectable.	W
$P_t$	Potencia radiada.	W
$P_{term}$	Ruido termal de la antena.	W
$P_{total}$	Potencia total de la antena distribuida por todo el espacio.	W
$\vec{p}$	Polarización.	$A s m^{-2} = C/m^2$
Q	Sensibilidad del radar.	dB $Q = 10 \log S$
r	Distancia.	m
$r$	Coefficiente de reflexión en amplitud.	Sin dimensiones.

ra	Radio del área iluminada por la antena.	m
$r_0, r_1, r_3$	Radios de las esferas que definen las zonas d Fresnel.	m
R	Coefficiente de Fresnel de reflexión de la energía para incidencia normal.	Sin dimensiones.
R	Rango del radar.	m
R	Rango del radargrama.	ns
$R_{1 \rightarrow 2}$	Coefficiente de Fresnel de reflexión en el contacto entre los medios (1) superior y (2) inferior.	Sin dimensiones.
Re	Rendimiento de un tubo de rayos X	Sin dimensiones
$R_h$	Resolución horizontal	m
$R_v$	Resolución vertical.	m
S	Sensibilidad del radar (relación señal/ruido mínima para que el radar funcione correctamente).	Sin dimensiones.
$S_a$	Grado de saturación.	% o tanto por uno
t	Tiempo.	s
t	Coefficiente de transmisión en amplitud.	Sin dimensiones.
tr/s	Número de trazas por segundo registradas.	n° de trazas/s
T	Temperatura	°C
T	Coefficiente de Fresnel de transmisión de la energía para incidencia normal.	Sin dimensiones.
$T_0$	Intervalo de tiempo de no superposición	s
$T_{1 \rightarrow 2}$	Coefficiente de Fresnel de transmisión entre los medios (1) superior y (2) inferior.	Sin dimensiones.
v	Velocidad de la onda electromagnética en el medio material.	m/s = $10^{-7}$ cm/ns
va	Velocidad de desplazamiento de la antena.	m/s
$v_f$	Velocidad de fase.	m/s
$v_g$	Velocidad de grupo.	m/s
V	Diferencia de potencial	V
x	Distancia.	m

$X_{\min}$	Separación mínima entre la antena y el primer reflector para que no se produzca superposición de señales.	m
$z$	Distancia entre el emisor y el receptor. Profundidad.	m
$\alpha$	Parte real de número de onda complejo. Factor de atenuación de la onda.	$m^{-1}$
$\beta$	Ángulo de la semianchura del lóbulo.	rad
$\beta$	Parte imaginaria del número de onda complejo. Constante de fase.	rad/m
$\Gamma$	Atenuación específica.	dB
$\delta P(\sigma, \varphi, r)$	Densidad de potencia, medida a una cierta distancia $r$ en una dirección definida por los ángulos $\sigma$ y $\varphi$ .	$W/m^2$
$\Delta f$	Ancho de banda.	$Hz = 10^{-6} MHz$
$\Delta t$	Duración del pulso.	s
$\chi$	Susceptibilidad eléctrica.	Sin dimensiones
$\chi_m$	Susceptibilidad magnética.	Sin dimensiones.
$\epsilon$	Permitividad dieléctrica.	$A^2 m^{-3} kg^{-1} s^4 = F/m$ $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$
$\epsilon_\infty$	Permitividad a muy alta frecuencia.	F/m
$\epsilon'$	Parte real de la permitividad dieléctrica.	F/m
$\epsilon''$	Parte imaginaria de la permitividad dieléctrica.	F/m
$\tilde{\epsilon}$	Tensor permitividad dieléctrica en un medio anisótropo.	F/m
$\epsilon_0$	Permitividad dieléctrica en el vacío	F/m $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} F/m$
$\epsilon_a$	Permitividad dieléctrica relativa del agua.	Sin dimensiones
$\epsilon_{aa}$	Permitividad relativa de la mezcla agua-aire para el modelo SSC.	Sin dimensiones
$\epsilon_{arcilla}$	Permitividad dieléctrica relativa de la arcilla.	Sin dimensiones
$\epsilon_{arena}$	Permitividad dieléctrica relativa de la arena.	Sin dimensiones
$\epsilon_d''$	Factor de pérdidas dieléctricas.	F/m

$\epsilon_{ef}$	Permitividad efectiva.	F/m $\epsilon_{ef} = \epsilon' - \frac{\sigma''}{\omega}$
$\epsilon_h$	Permitividad dieléctrica relativa del hielo.	Sin dimensiones
$\epsilon_m$	Permitividad dieléctrica relativa de una mezcla.	Sin dimensiones
$\epsilon_{matriz}$	Permitividad dieléctrica relativa del grano sólido de un suelo.	Sin dimensiones
$\epsilon_n$	Permitividad dieléctrica relativa de la nieve.	Sin dimensiones
$\epsilon_r$	Permitividad relativa del material.	Adimensional
$\epsilon_s$	Permitividad a muy baja frecuencia.	F/m
$\phi$	Porosidad.	% o tanto por uno
$\gamma$	Constante de propagación o número de onda complejo.	$m^{-1}$ $\gamma = \alpha + i\beta$
$\eta_2$	Impedancia del campo eléctrico transmitido (refractado).	V/m
$\eta_{ef}$	Eficiencia de la antena.	dB
$\eta_1$	Impedancia del campo eléctrico incidente y reflejado.	V/m
$\kappa$	Coefficiente de atenuación por expansión geométrica del frente de ondas.	$\kappa \approx 1$
$\lambda$	Longitud de onda.	m
$\lambda_m$	Longitud de onda en un medio.	m
$\lambda_0$	Longitud de onda en el vacío.	m
$\mu$	Permeabilidad magnética.	$A^{-2} m kg s^{-2} = H/m$ $\mu = \mu_0 \mu_r$ $\mu = \mu' - i\mu''$
$\mu'$	Parte real de la permitividad magnética.	H/m
$\mu''$	Parte imaginaria de la permitividad magnética.	H/m
$\tilde{\mu}$	Tensor permeabilidad magnética en un medio anisótropo.	H/m
$\mu_0$	Permeabilidad magnética del vacío.	H/m $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$
$\mu_r$	Permeabilidad magnética relativa.	Adimensional
$\theta$	Tamaño angular del reflector.	rad

$\rho$	Resistividad.	$\Omega\text{m}$
$\rho_0$	Resistividad de una roca totalmente saturada.	$\Omega\text{m}$
$\rho_f$	Densidad de carga libre.	$\text{A s m}^{-3} = \text{C/m}^3$
$\rho_t$	Resistividad de una roca parcialmente saturada.	$\Omega\text{m}$
$\sigma$	Conductividad.	$\text{A}^2 \text{m}^{-3} \text{kg}^{-1} \text{s}^3 = \text{m}^{-1}$ $\Omega^{-1} = \text{S/m}$ $\sigma = \sigma' - i\sigma''$
$\sigma'$	Parte real de la conductividad.	$\text{S/m}$
$\sigma''$	Parte imaginaria de la conductividad.	$\text{S/m}$
$\tilde{\sigma}$	Tensor conductividad en un medio anisótropo.	$\text{S/m}$
$\sigma_{dc}$	Conductividad estática.	$\text{S/m}$
$\sigma_{ef}$	Conductividad efectiva.	$\text{S/m}$ $\sigma_{ef} = \sigma' + \omega\epsilon''$
$\Sigma$	Frente de ondas.	Sin dimensiones.
$\tau$	Periodo de relajación.	s
$\omega$	Pulsación (frecuencia angular).	$\text{s}^{-1} = \text{rad/s} = 10^{-6} \text{ MHz}$
$\omega_0$	Frecuencia propia de resonancia de la molécula de agua.	$\text{s}^{-1}$
$\omega_{M1}$ $\omega_{M2}$ $\omega_{M3}$	Frecuencias propias de los modos de vibración de una molécula de agua.	$\text{s}^{-1}$
$\xi$	Coefficiente de la ecuación de Debye.	Sin dimensiones. $0 \leq \xi \leq 1$
$\xi_x$	Fase a una distancia x del foco	Sin dimensiones.

## Unidades de medida y multiplicadores (prefijos) utilizados con las unidades básicas.

Unidad	Símbolo	Relación
Amperio	A	
Coulomb	C	$1 \text{ C} = 1 \text{ A s}$
decibelio	dB	
Faradio	F	$1 \text{ F} = 1 \text{ C V}^{-1} = 1 \text{ m}^{-3} \text{ kg}^{-1} \text{ s}^4 \text{ A}^2$
grado centígrado	°C	
Henri	H	$1 \text{ H} = 1 \Omega \text{ s} = 1 \text{ m}^2 \text{ kg A}^{-2} \text{ s}^{-2}$
Hertz	Hz	$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$
Joule	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2}$
metro	m	
neper	np	
radián	rad	
Siemens	S	$1 \text{ S} = 1 \text{ mho} = 1 \Omega^{-1}$
segundo	s	
Tesla	T	$1 \text{ T} = 1 \text{ Wb m}^{-2} = 1 \text{ kg s}^{-2} \text{ A}^{-1}$
Voltio	V	$1 \text{ V} = 1 \text{ A } \Omega = 1 \text{ m}^3 \text{ kg s}^{-3} \text{ A}^{-1}$
Watio	W	$1 \text{ W} = 1 \text{ J s}^{-1} = \text{m}^2 \text{ kg s}^{-3}$
Weber	Wb	$1 \text{ Wb} = 1 \text{ kg s}^{-2} \text{ A}^{-1} \text{ m}^2$
Ohmio	$\Omega$	$1 \Omega = 1 \text{ m}^2 \text{ kg A}^{-2} \text{ s}^{-3}$

Prefijo	Símbolo	Magnitud
tera	T	$10^{12}$
giga	G	$10^9$
mega	M	$10^6$
kilo	k	$10^3$
hecto	h	$10^2$
deka	da	10

<b>Prefijo</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Magnitud</b>
deci	d	$10^{-1}$
centi	c	$10^{-2}$
mili	m	$10^{-3}$
micro	$\mu$	$10^{-6}$
nano	n	$10^{-9}$
pico	p	$10^{-12}$
femto	f	$10^{-15}$
atto	a	$10^{-18}$

## Glosario

**Absorción:** Transformación de parte de la energía electromagnética que se propaga en calor. En la banda de microondas y radiofrecuencias este fenómeno se produce por la polarización orientacional de las moléculas de agua.

**Ancho de banda:** Espectro de frecuencias a los que emite la antena. En los radares de subsuelo, normalmente el ancho de banda es del orden de la frecuencia central.

**Antena:** Parte del radar de subsuelo utilizada para emitir hacia el interior del medio la energía que les suministra la unidad de control en forma de potencia, con la direccionalidad y las características adecuadas a la aplicación deseada. También han de recibir la parte de energía que se refleja en las discontinuidades electromagnéticas del medio y regresa hacia la superficie.

**Área efectiva de una antena:** Área de captación de energía.

**Atenuación:** Disminución de la energía de una onda (y por lo tanto, también de su amplitud) durante la propagación por un medio. Generalmente, las principales causas de atenuación son la absorción del medio y la expansión geométrica del frente de ondas.

**Atenuación específica:** Grado de atenuación de una onda por unidad de longitud.

**Coefficiente de reflexión:** Factor que proporciona el porcentaje de energía que se refleja en una discontinuidad en relación a la energía que incide sobre ella.

**Coefficiente de transmisión:** Factor que proporciona el porcentaje de energía de una señal incidente que se refracta y, por lo tanto, se transmite hacia el interior del segundo medio.

**Conductividad efectiva:** Suma de los efectos de la componente real de la conductividad compleja y con el efecto de la componente imaginaria de la permitividad dieléctrica compleja, que genera un campo eléctrico en fase con el campo externo. Corrientes en fase con el campo externo.

**Conductividad estática:** Cuando solo existen efectos de la parte real de la conductividad. Amplitud de la corriente en fase con la intensidad del campo eléctrico externo.

**Conductividad:** Medida de la respuesta de las cargas libres de un medio en presencia de un campo eléctrico externo.

**Constante dieléctrica:** Permitividad dieléctrica. Recibe el nombre de constante porque para un mismo medio (misma mezcla de materiales) en unas mismas condiciones físicas (porosidad, saturación y temperatura, principalmente) es un valor constante característico.

**Constante de propagación:** Factor de decaimiento de la intensidad del campo



electromagnético. Número de onda complejo.

**Densidad:** Relación entre la masa de un determinado volumen de un cuerpo y la masa del mismo volumen de agua. Para los gases se utiliza como referencia la masa del mismo volumen de aire.

**Diagrama de radiación:** Representaciones gráficas del frente de ondas que radia una antena en las diferentes direcciones del espacio.

**Difracción:** Efecto que se produce cuando la energía incide en un único elemento de tamaño relativamente grande de manera que las condiciones del medio varían bruscamente de un punto a otro.

**Dispersión:** Distribución aleatoria de la energía cuando incide sobre objetos de dimensiones del orden de la longitud de onda o inferior.

**Huella de la antena:** Área de la superficie iluminada por la emisión electromagnética en la que se produce la reflexión de la mayor parte de la energía incidente. Queda determinada por la primera zona de Fresnel.

**Impedancia de un campo electromagnético:** Cociente entre el campo eléctrico y el campo magnético.

**Parámetros electromagnéticos:** Parámetros que definen el medio electromagnéticamente: conductividad, permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética.

**Permitividad dieléctrica:** Capacidad de polarización de un medio en presencia de un campo eléctrico externo. Constante de proporcionalidad entre el campo eléctrico externo aplicado y el desplazamiento eléctrico.

*Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico. 941*

**Permitividad efectiva:** Efecto de la componente real de la permitividad dieléctrica compleja junto al efecto de las cargas libres determinado por la parte imaginaria de la conductividad compleja. Corrientes en desfase con el campo externo. Proporciona una estimación de la capacidad de polarización de un medio en presencia de un campo electromagnético.

**Porosidad (n):** Relación entre el volumen de huecos (VH) y el volumen total (VT). Proporción de huecos de un medio. Determina el porcentaje del volumen de un medio que no está relleno de material sólido.

**Radargrama:** Registro de radar de subsuelo, formado por varias trazas.

**Radiofrecuencias:** Comprende las bandas de MF, HF y VHF. Entre 0.3 MHz y 300 MHz.

**Rango de la traza:** Tiempo máximo de registro, equivalente a la longitud temporal del radargrama (o de una traza).

**Rango del radargrama:** Rango de la traza. Longitud de la ventana temporal del registro. Tiempo de registro.

**Rango del registro:** Rango de la traza.

**Rango del radar:** Máxima penetración que puede alcanzar un sistema de radar.

**Reflector:** Superficie donde se produce la reflexión de parte de la energía que incide. Estas superficies son discontinuidades bruscas de uno o varios parámetros electromagnéticos y, a menudo, separan diferentes unidades materiales de un medio.

**Resolución horizontal:** Capacidad del radar para resolver dos señales adyacentes en el espacio horizontal de manera que se puedan interpretar como elementos separados.

**Resolución vertical:** Capacidad del radar para resolver dos señales adyacentes en el tiempo.

**Tiempo doble de propagación:** Tiempo que tarda la señal en llegar al reflector y volver de nuevo hacia la antena. Recibe esta denominación porque recorre dos veces la distancia que separa la antena del reflector.

**Transductor:** Dispositivo que convierte la potencia eléctrica de una corriente en potencia acústica o mecánica, y viceversa, las vibraciones acústicas en señales eléctricas.

**Traza:** Registro puntual de amplitud.

**Velocidad característica de un medio:** Velocidad promedio a la que se propaga una onda electromagnética por ese medio.

**Zonas de Fresnel:** Zonas de la superficie iluminada que contribuyen en la reflexión; dependen de la separación entre el emisor y el reflector y de la longitud de onda de la señal incidente.

**Zona irradiada por la antena:** Área del reflector determinada por la intersección entre el cono de emisión y la superficie reflectora.

### **Bibliografía**

**Annan, A. P. y J. L. Davis**, 1976. Impulse Radar sounding in permafrost. *Radio Science*. Volume 11.

**Annan, A. P., S. W. Cosway y T. Sigurdsson**, 1994. GPR for snow pack water content. *Proceedings of the fifth international conference on ground penetrating radar*. Vol. 2

**Bauman. P.D., R.J. Heitzman, J. E. Porter, J. T. Sallomy, M. L. Brewster y C.J. Thompson**, 1994. The integration of radar, magnetic, and terrain conductivity

**Davis, J.L. y A.P. Annan**, 1989. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*

Estudios de Empresa Area Geofisica efectuados en la Provincia de Buenos Aires

Tesis Doctoral de Radar de subsuelo de Vega Pérez Gracia

-Taller sobre ensayos No Destructivos y Estructurales en la CNEA a cargo del Dr. Maximiliano Pieraccini de la Universidad de Florencia (Italia).

## Índice

Resumen	1
Abstract	2
Prefacio	3
1.1 Diferentes designaciones del Georadar	5
1.2 Introducción	5
1.3 Reseña Histórica del GPS	7
1.4 Fundamento de la prospección con radar de subsuelo	11
1.5 Propagación de ondas electromagnéticas	13
1.6 Parámetros electromagnéticos de un medio	15
1.7 Conductividad	15
1.8 Permitividad Dieléctrica	17
1.9 Permeabilidad Magnética	20
1.10 Velocidad de propagación de longitud de onda	21
1.11 Velocidad de propagación de una electromagnética En un medio material.	23
1.12 Longitud de onda en un medio diferente del vacío	26
1.13 Atenuación	26
1.14 Parámetros efectivos	27
1.15 Reflexión	29
2.1 Rango de radar	31
2.2 Resolución Vertical y Horizontal	32
2.3 Resolución Vertical	32
2.4 Resolución Horizontal	34
3.1 Ejemplificación de diferentes aplicaciones del georadar	37
3.2 Fuerte Barragán Ensenada (Buenos Aires)	37
3.3 Basílica Nuestra Señora de Luján (Buenos Aires)	44
4.1 Tablas	63
Unidades de medida de y Multiplicadores	69
Glosario	71
Bibliografía	74