



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles

“EXPLORACIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE  
LA TÉCNICA DEL RADAR DE PENETRACIÓN  
TERRESTRE. UN ESTADO DEL CONOCIMIENTO”

Tesis para optar el Título de:  
**Ingeniero Civil en Obras Civiles**

Profesor Patrocinante:  
Sr. Galo Valdebenito Montenegro  
Ingeniero Civil, especialidad Estructuras  
Dr. Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural.

Profesor Co-Patrocinante:  
Sr. Andrés Iroumé Arrau  
Ingeniero Civil  
Master of Sciences in Resources Management  
Doctor en Ciencias Forestales.

CARLOS ANDRÉS JARA BUSTAMANTE  
VALDIVIA – CHILE  
2015

*Este trabajo de titulación a sido desarrollado en el marco del proyecto FONDECYT 1141064 “Effects of vegetation on channel morphodynamics: A multiscale investigation in Chilean gravel-bed rivers”.*

*Agradezco a todos los que me acompañaron, enseñaron y confiaron en mí, en este largo camino. A mi familia que me apoyó y a Victoria Guerrero. En especial a Dr. Galo Valdebenito, Dr. Andrés Iroumé, David Alvarado y Josep Pedret por el apoyo, la colaboración y la confianza depositada en mi persona para el desarrollo de este trabajo.*

## Índice

<b>Resumen</b>	<b>VII</b>
<b>Summary</b>	<b>VIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos.....	1
1.2.1.Objetivo General.....	1
1.2.2.Objetivos Específicos.....	1
1.3. Metodología.....	2
1.4. Estructuración de la Tesis.....	2
<b>2. El Radar de Penetración Terrestre, Fundamentos</b>	<b>4</b>
2.1. Introducción.....	4
2.2. Contexto Histórico.....	4
2.3. Principios Físicos.....	5
2.3.1.Ecuaciones de Maxwell.....	5
2.3.2.Propiedades Electromagnéticas de un medio.....	7
2.3.2.1. Conductividad.....	7
2.3.2.2. Permitividad Dieléctrica.....	8
2.3.2.3. Permeabilidad magnética.....	9
2.3.3. Naturaleza Ondulatoria de los Campos Electromagnéticos.....	10
2.3.3.1. Propiedades de Onda.....	11
2.3.3.2. Reflexión y Refracción.....	12
2.3.3.3. Atenuación.....	14
2.3.3.4. Dispersión.....	15
2.4. Sistema de Radar.....	16
2.4.1.Sistema GPR.....	16
2.4.2.Antena.....	16
2.4.2.1. Directividad.....	17
2.4.2.2. Ganancia.....	18
2.4.2.3. Polarización.....	18
2.4.2.4. Antena Monoestática.....	18
2.4.2.5. Antena Biestática.....	19

2.4.3.Unidad Control.....	19
2.4.4.Accesorios y Equipos Complementarios.....	20
2.5. Equipos GPR.....	20
2.6. Adquisición de Datos.....	20
2.6.1.Adquisición en Perfiles.....	21
2.6.2.Adquisiciones Puntuales.....	21
2.6.3.Punto Medio Común (Common Mid Point, CMP).....	22
2.6.4.Transiluminación y tomografía.....	23
2.6.5.Reflexión y refracción de gran ángulo (Wide Angle Reflexión and Refraction, WARR).....	24
2.6.6.Sondeos.....	25
2.7. Procesamiento de Datos.....	25
2.7.1.Información de la Cabecera de una Traza.....	27
2.7.2.Parámetros para la Interpretación del Radargrama.....	27
2.7.3.Filtros Horizontales y Verticales.....	29
2.7.4.Deconvolución Predictiva.....	31
2.7.5.Migración.....	33
2.7.6.Transformada Rápida de Fourier y Transformada de Hilbert.....	33
2.7.7.Ganancia.....	36
2.7.8.Superposición de trazas (stacking).....	37
2.8. Proceso en Estudio con Radar de Penetración Terrestre.....	39
<b>3. Aplicaciones del Radar de Penetración Terrestre</b> .....	<b>41</b>
3.1. Introducción.....	41
3.2. Aplicación en Arqueología y Patrimonio.....	41
3.2.1.Arqueología.....	42
3.2.2.Patrimonio.....	51
3.3. Aplicaciones en Ingeniería Civil.....	59
3.4. Geología.....	76
3.4.1.Estratigrafía.....	77
3.4.2.Geomorfología.....	78
3.4.3.Fallas Sísmicas.....	80
3.4.4.Sedimentología.....	83

<b>4. Aplicación Práctica del Radar de Penetración Terrestre En Sedimentología Aplicación al Río Blanco, Chaitén</b>	<b>91</b>
4.1. Introducción.....	91
4.2. Zona de Exploración.....	91
4.3. Metodología y Descripción de la Campaña.....	94
4.3.1.Funcionamiento del Radar de Penetración Terrestre (GPR) y Descripción del Equipo.....	94
4.3.2.Descripción de la Aplicación.....	94
4.4. Resultados.....	98
4.4.1.Calibración.....	98
4.4.2.Interpretación.....	101
<b>5. Conclusiones</b>	<b>104</b>
<b>6. Bibliografía</b>	<b>108</b>
<b>A1. Anexo 1: Equipo GPR Disponibles en el Mercado</b>	<b>126</b>

## **RESUMEN**

“Exploración Geofísica Mediante la Técnica del Radar de Penetración Terrestre (Ground Penetrating Radar, GPR)”, busca desarrollar un estado del arte en relación a las aplicaciones del radar de penetración terrestre con especial atención en el uso en ingeniería estructural, vial y en geotecnia; en arqueología y patrimonio; en geomorfología, estratigrafía, en fallas sísmicas, sedimentología y sedimentos volcánicos.

Esta base teórica se estructura en tres partes: las primeras dos teóricas y la tercera práctica.

En la primera se realizará una descripción de los fundamentos físicos y teóricos del GPR, funcionamiento e instrumentación, los equipos disponibles en el mercado, los sistemas de medición existentes y análisis de datos.

La segunda parte implicará el estudio de sus aplicaciones en distintas disciplinas, entre ellas, la ingeniería estructural, vial y en geotecnia; la arqueología y patrimonio; la geomorfología, la estratigrafía, en fallas sísmicas, la sedimentología y los sedimentos volcánicos.

Mientras que la tercera parte consta de una aplicación práctica de su uso en los sedimentos posteriores a la erupción del volcán Chaitén, en Chaitén, provincia de Palena, Región de Los Lagos, Chile.

Este estudio bibliográfico pretende asentar las bases técnicas y teóricas para futuros trabajos, estableciendo el estado del conocimiento actual del uso del Radar de Penetración Terrestre.

Esta tesis se realizó en el marco del proyecto FONDECYT 1141064.

## **SUMMARY**

"Geophysical Exploration Technique Using Ground Penetrating Radar (GPR)," seeks to develop a state of the art in relation to the application of ground penetrating radar on the use in structural engineering, geotechnical and road; in archeology and heritage; in geomorphology, stratigraphy in seismic faults, sedimentology and volcanic sediments.

This theoretical basis is structured in three parts: the first and two theoretical and the third practice.

In the first part its a description of the physical and theoretical foundations of GPR, operation and instrumentation equipment available on the market, existing measurement systems and data analysis will be performed.

The second part will involve the study of its applications in various disciplines, including structural engineering, geotechnical and road; archeology and heritage; geomorphology, stratigraphy in seismic faults, sedimentology and volcanic sediments.

While the third part consists of a practical application of its use in sediments post-eruption of Chaitén volcano in Chaitén, Palena, Los Lagos Region, Chile.

This literature review seeks to establish the technical and theoretical basis for future work, establishing the current state of knowledge of using Ground Penetrating Radar.

This thesis was developed within the framework of project FONDECYT 1141064.

## **1. Introducción**

### **1.1. Introducción**

Desde el comienzo de la historia, el ser humano se ha interesado por averiguar lo que hay bajo sus pies, qué secretos esconde la superficie por donde marca sus pasos o qué hay en interior de una estructura.

Con el tiempo se han desarrollado herramientas que están dando respuesta a esta incógnita, algunos métodos muy invasivos, como perforaciones, excavaciones, demoliciones, entre otros. Mientras que con el avance de los estudios físicos y el desarrollo de la tecnología se han creado técnicas nuevas y no invasivas, como el radar (Radio Detection And Ranging). Uno de estos sistemas es, el radar de penetración terrestre (Ground Penetrating Radar, GPR).

Éste último es un sistema electromagnético diseñado para la localización de objetos, exploración y el estudio no destructivo bajo la superficie de la tierra o el interior de estructuras visualmente opacas. En condiciones favorables, puede proporcionar información precisa de la composición interna de éstas.

El GPR está basado en el principio de propagación de ondas electromagnéticas de muy alta frecuencia, donde el método consiste en la interpretación de los fenómenos de reflexión, refracción y difracción de estas ondas durante su propagación en un medio discontinuo.

Desde 1970 a la actualidad, la gama de aplicaciones para el GPR se ha expandido a distintas áreas tales como de la construcción, obras civiles, arqueología, geología, glaciología, minera, militar, entre otras.

A pesar de esto, en Chile es poco conocido el sistema GPR al igual que su aplicación en distintas disciplinas y áreas. Como por ejemplo, en la detección de minas antipersonales, el estudio de estructuras patrimoniales, la detección de restos arqueológicos, auscultación de caminos, estudios geomorfológicos, entre otros. Con ello se puede determinar que Chile tiene mucho campo para dar uso al radar de penetración terrestre.

En este trabajo de titulación se pretende estudiar el estado del arte en relación a las exploraciones geofísicas mediante la técnica del Radar de Penetración Terrestre con especial atención en el uso en ingeniería estructural, vial y en geotecnia; en arqueología y patrimonio; en geomorfología, estratigrafía, en fallas sísmicas, sedimentología y sedimentos volcánicos, con el fin de establecer un estado actual del conocimiento en el uso del GPR en las distintas disciplinas.

### **1.2. Objetivos**

#### **1.2.1. Objetivo General**

Elaborar un estado del arte de la exploraciones geofísicas mediante la técnica del Radar de Penetración Terrestre.

#### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Establecer el funcionamiento y los fundamentos teóricos del radar de penetración terrestre, así también, la medición, análisis de datos y los equipos disponibles en el mercado.

- Realizar una revisión y elaborar un estado del conocimiento relativo a las aplicaciones Geofísicas con la técnica del Radar de Penetración Terrestre.
- Realizar una aplicación practica en el área de la sedimentología con el Radar de penetración Terrestre en los sedimentos volcánicos en Chaitén.

### 1.3. Metodología.

A continuación se describe las actividades que conforman parte de la metodología para conseguir satisfactoriamente los objetivos de la tesis.

- Realizar una revisión del estado del conocimiento relativo al funcionamiento y fundamentos físicos del radar de penetración terrestre, para establecer los principios físicos y su funcionamiento; el sistema de medición e interpretación de datos y el contexto histórico.
- Llevar a cabo una revisión de los equipos de radar de penetración terrestres disponibles en el mercado, y así también, el soporte lógico utilizado en el procesamiento e interpretación de datos.
- Realizar una revisión de los trabajos relativos a las aplicaciones del GPR en ingeniería estructural, vial y en geotecnia; en arqueología y patrimonio; en geomorfología, estratigrafía, en fallas sísmicos, sedimentología y sedimentos volcánicos, para elaborar un estado del conocimiento relativo a estas aplicaciones, disponibles en las bases de datos con acceso desde el sistema de biblioteca UACH.
- Efectuar una aplicación practica con el Radar de Penetración Terrestre, en los sedimentos volcánicos en Chaitén.
- Con base en la experiencia del trabajo realizado, formular conclusiones y establecer posibles líneas futuras de trabajo.

### 1.4. Estructuración de la Tesis

**Capítulo 1 – Introducción:** Incluye la introducción, el objetivo general y objetivos específicos y una propuesta metodológica para lograr los objetivos satisfactoriamente.

**Capítulo 2 – El Radar de Penetración Terrestre, Fundamentos Físicos y Teóricos:** Contiene el contexto histórico, los principios físicos y funcionamiento del radar de penetración terrestre, además de los equipos disponibles en el mercado, los diversos métodos de medición y análisis de datos.

**Capítulo 3 – Aplicaciones del GPR:** Contiene la revisión bibliográfica relativa a las aplicaciones del radar de penetración terrestre en: en ingeniería estructural, vial y en geotecnia; en arqueología y patrimonio; en geomorfología, estratigrafía, en fallas sísmicos, sedimentología y sedimentos volcánicos.

**Capítulo 4 – Aplicación Práctica del Radar de Penetración Terrestre en Sedimentos Volcánicos en Chaitén:** Contiene los objetivos y la descripción de la campaña realizada en Chaitén, donde se realiza una aplicación práctica del GPR en sedimentos volcánicos.

**Capítulo 5 – Conclusión:** Se presentan las conclusiones y futuras líneas de investigación.

**Capítulo 6 – Bibliografía:** Contiene las referencias.

**Capítulo 7 – Anexos:** Contiene el Anexo.

## **2. El Radar De Penetración Terrestre, Fundamentos.**

### **2.1. Introducción.**

La ciencia que se encarga del estudio de la Tierra desde el punto de vista de la física es la geofísica. Su objeto de estudio abarca los fenómenos relacionados con su estructura, condiciones físicas e historia evolutiva. Además es una disciplina experimental donde se utilizan métodos cuantitativos físicos tales como:

- Método sísmico
- Método de resistividad eléctrica
- Métodos magnéticos y gravimétricos
- Método de ultrasonido
- Método de interferometría
- El PID (Photo Ionization Detector) y el IR (infra Red Analyzer)
- Prospecciones laser, como método complementario
- Georadar o Radar de Penetración Terrestre (GPR)

El Radar de Penetración Terrestre es un sistema electromagnético diseñado para la localización de objetos, exploración y estudio no destructivo bajo la superficie de la tierra o del interior de estructuras visualmente opacas. Está basado en el principio de propagación de ondas electromagnéticas de muy alta frecuencia, donde el método consiste en la interpretación de los fenómenos de reflexión, refracción y difracción de estas ondas durante su propagación en un medio discontinuo.

Este capítulo contiene el contexto histórico, los principios físicos y el funcionamiento del Radar de Penetración Terrestre, además de los equipos disponibles en el mercado, los diversos métodos de adquisición de datos y procesamiento de datos.

### **2.2. Contexto Histórico.**

Un radar se puede definir como un sistema que permite detectar un objeto por medio de la emisión y recepción de ondas electromagnéticas que se propagan en un medio.

El Radar De Penetración Terrestre nace como una aplicación al estudio del interior de la tierra partiendo de los radares aéreos que se desarrollaron durante la Segunda Guerra Mundial para la detección de aviones y barcos [Pérez 2001].

La primera descripción de su uso para la localización de objetos enterrados data desde 1910 con patente alemana perteneciente a Leimbach y Löwis. Éstos autores describieron una técnica alternativa que consiste en el uso de antenas independientes (transmisoras y receptoras), montadas sobre una

superficie para detectar la reflexión desde una interfaz generadas desde aguas subterráneas o un depósito mineral [Daniels, 2004].

Una extensión de esta técnica permitió determinar la profundidad de la interfaz, a través de un estudio de la interferencia entre ondas reflejadas y la señal original. La principal característica de este trabajo es el uso de efectos de difracción debido a las características del subsuelo y variaciones de conductividad producidas por la dispersión [Daniels, 2004].

Posteriormente surgieron varios trabajos, donde destaca el desarrollado por Hülsenbeck, en 1926, donde al parecer fue el primero en usar las técnicas de pulso para determinar características de estructuras subterráneas. Notó que algunas variaciones dieléctricas, no necesariamente implicaba conductibilidad, sino que también podrían producir reflexiones [Daniels, 2004].

En tanto, a partir de 1930 se desarrollaron otras técnicas para determinar profundidades de hielo, agua dulce, depósitos de sal, desiertos y formaciones de roca.

Desde 1970 a la actualidad se generó un rápido desarrollo de la electrónica, la informática, las técnicas de detección y amplificaciones de las señales electromagnéticas, además del procesado de datos por ordenador, lo que contribuyó a mejorar la resolución del radar.

Además, dada la necesidad de obtener un método no destructivo para el estudio de zonas superficiales, provocó el desarrollo del georadar y sus aplicaciones, las cuales se han expandido a distintas áreas tales como de la construcción, obras civiles, arqueología, geología, glaciología, minera, militar, entre otras.

## 2.3. Principios Físicos

### 2.3.1. Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell relacionan entre sí el campo eléctrico, el magnético y las cargas y corrientes que los crean. Dichas ecuaciones fueron obtenidas de forma empírica por distintos científicos a lo largo del siglo XIX, y fue precisamente James Clerk Maxwell (1831-1879) quien, aparte de introducir un nuevo término en una de ellas, se dio cuenta de que con tan sólo cuatro leyes se describe por completo el electromagnetismo [Dios *et al*, 1998].

Las ecuaciones de Maxwell se expresan de la siguiente forma:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \text{ (Ley de Gauss para campo eléctrico)} \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \text{ (Ley de Gauss para campo magnético)} \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \text{ (Ley de Faraday)} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \text{ (Ley generalizada de Ampère)} \quad (2.4)$$

Donde  $\vec{E}$  es la intensidad de campo eléctrico ( $V/m$ );  $\rho$  es la densidad de carga eléctrica ( $C/m^3$ );  $\vec{B}$  es la densidad de flujo magnético (T);  $\vec{J}$  es la densidad de flujo de corriente eléctrica ( $A/m^2$ );  $\vec{D}$  es el vector desplazamiento ( $C/m^2$ );  $t$  es tiempo (s); y  $\vec{H}$  es la intensidad del campo magnético ( $A/m$ ).

### ***Ecuaciones Constitutivas.***

Para el Radar De Penetración Terrestre, las propiedades eléctricas y magnéticas son muy importantes. Las ecuaciones constitutivas proporcionan una descripción macroscópica de cómo los electrones, átomos y moléculas responden masivamente a la aplicación de un campo electromagnético [Jol, 2009].

Estas son:

$$\vec{J} = \tilde{\sigma}\vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{D} = \tilde{\epsilon}\vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{B} = \tilde{\mu}\vec{H} \quad (2.7)$$

Donde  $\tilde{\sigma}$  es la conductividad del medio;  $\tilde{\epsilon}$  es la permitividad dielectrica;  $\tilde{\mu}$  es la permeabilidad magnética.

Las 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  $\tilde{\epsilon}$ , la conductividad del medio  $\tilde{\sigma}$  y la permeabilidad magnética  $\tilde{\mu}$  del material [Dios *et al*, 1998].

Los medios en los que se usa el GPR, por lo general, son anisótropos, donde los tensores  $\tilde{\epsilon}$ ,  $\tilde{\sigma}$  y  $\tilde{\mu}$  pueden ser constantes o no lineales. En la práctica, estas cantidades se tratan como escalares independientes, donde la respuesta es en la misma dirección que el campo de excitación y es independiente de la intensidad de campo; aunque esta suposición rara vez es totalmente válida, hasta la fecha, los investigadores aún no han sido capaces de discernir tal complejidad [Jol, 2009]. La relación que existe entre las magnitudes se expresa a través de los tensores de permitividad, permeabilidad y conductividad y se expresan de la siguiente forma:

$$\vec{D} = \tilde{\epsilon} * \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.8)$$

$$\vec{B} = \tilde{\mu}\vec{H} \quad (2.9)$$

$$\vec{J} = \tilde{\sigma} * \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J}_m \quad (2.10)$$

Donde  $\vec{J}_m$  es la densidad de corriente generada por la polarización y magnetización del material por consecuencia de los campos eléctricos y magnéticos aplicados, y las expresiones  $\vec{\epsilon}$ ,  $\vec{\sigma}$  y  $\vec{\mu}$  suelen aproximarse por tres tensores de dimensión 3x3 [Pérez, 2001].

### 2.3.2. Propiedades Electromagnéticas de un medio.

Las propiedades electromagnéticas de un medio, conductividad ( $\sigma$ ), permitividad dieléctrica ( $\epsilon$ ) y permeabilidad magnética ( $\mu$ ), lo definen al paso de una onda electromagnética.

#### 2.3.2.1. Conductividad.

La conductividad de un medio proporciona una medida de la respuesta de sus cargas en presencia de un campo eléctrico externo, siendo el factor de proporcionalidad entre el campo libre y la densidad de volumen de corriente eléctrica, es decir:

$$\vec{J}_f = \sigma \vec{E} \quad (\text{Ley de Ohm}) \quad (2.11)$$

Donde  $\vec{J}_f$  es la densidad de volumen de corriente debido a las cargas libres,  $\vec{E}$  es el campo eléctrico aplicado y  $\sigma$  es la conductividad del material (mho/m o  $1/\Omega m$ ).

En general se pueden distinguir materiales conductores, semiconductores y aislante. Se considera un conductor a un material cuando su conductividad es mayor a  $10^5 1/\Omega m$ , mientras que los materiales con una conductividad inferior a  $10^{-8} 1/\Omega m$  se clasifican como aislantes y los que se encuentran entre estos dos valores son semiconductores [Pérez, 2001]. Algunos valores típicos de conductores, semiconductores y aislantes están dados en la tabla 2.1.

Los conductores se pueden distinguir entre buen conductor y conductor perfecto. Éste último es un medio idealizado en que  $\sigma \rightarrow \infty$ , es decir, en que no hay colisiones y la velocidad de los electrones es infinita. Un buen conductor se define como un medio en el que el

efecto de la conductividad es predominante frente a la constante dieléctrica [Dios *et al*, 1998].

En muchos medios, lo que determina su conductividad no es la composición mineral del material sino que es el contenido de agua y la composición química de esta. Así también, al cambiar la temperatura de los medios, la conductividad puede verse afectada. En general la conductividad es muy

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD
	$\left(\frac{1}{\Omega m}\right)$
Plata	$6,1 \times 10^7$
Cobre	$5,7 \times 10^7$
Oro	$4,1 \times 10^7$
Aluminio	$3,5 \times 10^7$
Agua del Mar	4
Silicio	$3,9 \times 10^{-17}$
Agua Destilada	$10^{-4}$
Vidrio	$10^{-12}$
Cera	$10^{-17}$

**Tabla 2.1** conductividad de algunos materiales [Fuente: Dios *et al*, 1998]

variable y puede cambiar dentro de una misma formación, ya que no depende sólo del cambio del material.

La conductividad se presenta como un valor complejo:

$$\sigma = \sigma' - i\sigma'' \quad (2.12)$$

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, 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 [Pérez, 2001].

### 2.3.2.2. Permitividad Dieléctrica.

La Permitividad Dieléctrica se describe como un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio. Está determinada por la tendencia de un material a polarizarse ante la aplicación de un campo eléctrico, anulando parcialmente el campo eléctrico interno del material [Dios *et al*, 1998].

La permitividad Dieléctrica absoluta es una constante de proporcionalidad entre la intensidad del campo eléctrico externo y el vector de desplazamiento.

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.13)$$

Donde  $\varepsilon$  se define como el producto de la permitividad relativa ( $\varepsilon_r$ ) del material por la permitividad del vacío ( $\varepsilon_0$ ).

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (2.14)$$

Donde,  $\varepsilon_r$  es una constante adimensional propia del material y  $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$  (F/M).

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.

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 permitividad dieléctrica relativa se encontraran entre 1 y 81, siendo la última la constante relativa del agua a 20° de temperatura [Pérez, 2001].

La permitividad se presenta en forma compleja.

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (2.15)$$

Donde la componente real  $\varepsilon'$  produce una corriente en fase respecto al campo eléctrico externo y la componente imaginaria  $\varepsilon''$  provoca una corriente en desfase respecto al campo eléctrico.

Para altas frecuencias (entre 10 MHz y 1000 MHz), en la mayor parte de los materiales del subsuelo, los fenómenos de 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 lo otro. Para frecuencias bajas (por debajo de los 100 hz) no se ha observado que este parámetro dependa de la frecuencia de pulso, pero para frecuencias más altas se aprecia una dependencia entre ambos [Pérez, 2001].

Para caracterizar esta dependencia, comúnmente los métodos más utilizados son los modelos de Debye (ecuación 2.16) y Maxwell-Wagner (ecuación 2.17).

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (i\omega\tau)} - i \frac{\sigma(0)}{\omega\varepsilon_0} \quad (2.16)$$

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (i\omega\tau)^{1-\xi}} - i \frac{\sigma(0)}{\omega\varepsilon_0} \quad (2.17)$$

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

### 2.3.2.3. Permeabilidad magnética.

La permeabilidad magnética indica que el campo magnético atraviesa con facilidad la materia y relaciona la inducción magnética con la intensidad de campo magnético.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.18)$$

Donde ( $\mu$ ) es el producto entre la permeabilidad relativa de la materia ( $\mu_r$ ) y la permeabilidad magnética del vacío ( $\mu_0$ ).

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (2.19)$$

Donde  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (H/m)$ , y  $\mu_r$  la permeabilidad relativa del material, que depende a su vez de la susceptibilidad magnética del mismo,  $x_m$ , que a su vez es la constante de proporcionalidad entre la imanación de un material y la intensidad de campo magnético externo:

$$\vec{M} = x_m \vec{H} \quad (2.20)$$

La permeabilidad magnética relativa se presenta en forma compleja:

$$\mu_r = \mu' - i\mu'' \quad (2.21)$$

La parte real se le denomina permeabilidad magnética elástica, mientras que la parte imaginaria se le llama permeabilidad magnética viscosa.

En la mayoría de los materiales que se encontrarán en los estudios con georadar se cumple que la permeabilidad magnética se aproxima a 1, con excepción de aquellos que contienen materiales ferromagnéticos, no dependiendo de la frecuencia del campo magnético. La mayoría de los materiales tienen un comportamiento isotrópico respecto a la permeabilidad magnética [Pérez, 2001].

La relación entre la permeabilidad magnética en el vacío y la permeabilidad dieléctrica en el vacío se expresa de la siguiente forma:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (2.22)$$

Donde  $c$  es la velocidad de propagación de una onda electromagnética en el vacío.

### 2.3.3. Naturaleza Ondulatoria de los Campos Electromagnéticos.

Las ecuaciones de Maxwell describen los campos eléctricos y magnéticos cuando varían en el tiempo. Esto, dependiendo de la pérdida de energía asociada a la conductividad y el almacenamiento de energía vinculada a la permitividad y permeabilidad, en que los campos se propagan como onda. El Radar De Penetración Terrestre explota el carácter ondulatorio de los campos electromagnéticos [Jol, 2009].

La ecuación de Maxwell, cuando se reescribe para eliminar los campos eléctricos o los campos magnético, hace evidente el carácter ondulatorio.

Utilizando el campo eléctrico, se obtiene la ecuación vectorial:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} + \mu\sigma \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.23)$$

El Radar de Penetración Terrestre es muy efectivo en materiales de baja pérdida, donde la disipación de energía (el segundo término de la ecuación 2.23) es pequeña en comparación con el almacenamiento de energía (el tercer término de la ecuación 2.23) [Jol, 2009].

Las soluciones a la ecuación 2.23 toman la forma que se muestra en la Imagen 2.1, que corresponden a las soluciones de onda plana a las ecuaciones de Maxwell. Donde el campo eléctrico  $\vec{E}$ , el campo magnético  $\vec{B}$  y la dirección espacial del movimiento  $\vec{K}$  son ortogonales.

Para el Radar de Penetración Terrestre, los campos eléctricos normalmente es el campo medio [Jol, 2009] y se expresan de tal forma:

$$\vec{E} = f(\vec{r} \cdot \vec{k}, t) \vec{u} \quad (2.24)$$

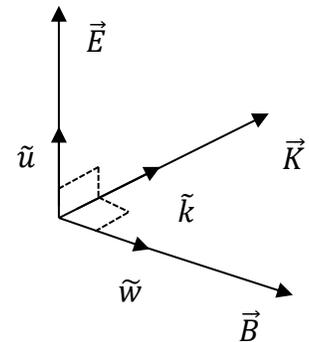
Donde  $\vec{r}$  es un vector que describe la posición espacial y  $f(\vec{r} \cdot \vec{k}, t)$  satisface la ecuación escalar:

$$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} f(\beta, t) - \mu\sigma \frac{\partial}{\partial t} f(\beta, t) - \mu\epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} f(\beta, t) \equiv 0 \quad (2.25)$$

Donde  $\beta = \vec{r} \cdot \vec{k}$  es la distancia en la dirección de propagación.

En condiciones de baja pérdida:

$$f(\beta, t) \approx f(\beta \pm vt) e^{\mp \alpha \beta} \quad (2.26)$$



**Imagen 2.1** El campo eléctrico  $\vec{E}$ , campo magnético  $\vec{B}$ , y la dirección de propagación  $\vec{K}$ , son vectores ortogonales.  $\vec{u}$ ,  $\vec{w}$ , y  $\vec{k}$  son vectores unitarios ortogonales [Fuente: Jol, 2009].

Donde  $v$  es la velocidad y  $\alpha$  es la atenuación.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (2.27)$$

$$\alpha = \frac{1}{2}\sigma\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.28)$$

La naturaleza de la onda está dada por la distribución espacial de los campos en la dirección  $\beta$  en el tiempo, como se muestra en la figura 2.2.

En muchas formulaciones se dan en términos de la excitación sinusoidal con frecuencia angular  $\omega$ .

$$f(\beta, t) = A \exp\left(-i\left(\frac{\beta}{v} - \omega t\right)\right) e^{-\alpha\beta} \quad (2.29)$$

Donde  $A$  es la amplitud de la señal.

Las señales sinusoidales se caracterizan por su longitud de onda  $\omega$  y por su longitud de onda espacial  $\lambda$ , donde

$$\lambda = 2\pi\frac{v}{\omega} \quad (2.30)$$

### 2.3.3.1. Propiedades de Onda.

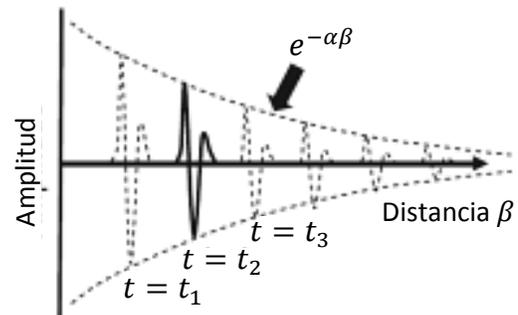
Las Propiedades de Onda son velocidad  $v$ , la atenuación  $\alpha$  y la impedancia electromagnética  $Z$ , para medios con permitividad, permeabilidad y conductividad fija se expresan más fácilmente si se supone una variación sinusoidal en el tiempo.

Todas las propiedades de onda presentan un comportamiento similar. A baja frecuencia, dependen de  $\sqrt{\omega}$ , lo que indica un comportamiento del campo difuso. A altas frecuencia, las propiedades de onda se vuelven independientes de la frecuencia (si  $\epsilon$ ,  $\mu$  y  $\omega$  son independiente de la frecuencia) [Jol, 2009].

Cuando la señal viaja con su forma intacta -que es la propagación sin dispersión-, la velocidad, la atenuación y la impedancia se pueden escribir de la siguiente manera:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\cdot\mu}} = \frac{c}{\sqrt{k}} \quad (2.31)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cdot \frac{\sigma}{2} = Z_0 \cdot \frac{\sigma}{2\cdot\sqrt{k}} \quad (2.32)$$



**Imagen 2.2** en ambiente de baja pérdidas, las ondas electromagnéticas se propagan a una velocidad finita y el decaimiento de la amplitud con un mínimo pulso cambia de forma [Fuente: Jol, 2009].

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{Z_0}{\sqrt{k}} \quad (2.33)$$

Estas expresiones son validas cuando las variaciones de las propiedades magnéticas se suponen despreciables, haciendo  $\mu = \mu_0$ , donde  $\mu_0 = 1,25 \times 10^{-6} \text{ H/m}$  es la permeabilidad magnética en el espacio libre.  $c$  es la velocidad de la luz  $2 \times 10^8 \text{ m/s}$  y  $Z_0$  es la impedancia en el espacio libre.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377\Omega \quad (2.34)$$

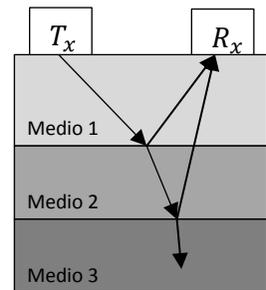
La velocidad de onda en un medio material con propiedades electromagnéticas  $\sigma$ ,  $\epsilon$  y  $\mu$ , se expresa:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1}} \quad (2.35)$$

### 2.3.3.2. Reflexión y Refracción.

Cuando la energía electromagnética alcanza una discontinuidad en los parámetros electromagnéticos del medio se producen los fenómenos de refracción y reflexión.

El Radar de Penetración Terrestre, cuando envía una señal electromagnética a través de su antena y al encontrarse con una discontinuidad en las propiedades dieléctricas en el medio por el cual se propaga, se refracta y otra parte se refleja. Luego la parte refractada al continuar su trayectoria, en una nueva discontinuidad, la nueva señal se volverá a refractar y otra parte se reflejará, como se muestra en la imagen 2.3.



**Imagen 2.3** Esquema del efecto de refracción y reflexión de la onda electromagnética que incidente sobre medios de distintas características. [Fuente: Elaboración Propia]

La amplitud de onda que recibe la antena del GPR es dependiente del porcentaje de energía que se refleja en cada discontinuidad del medio. Donde los coeficientes de refracción y reflexión son el porcentaje de energía refractada y reflejada.

La ley de Snell relaciona los ángulos de incidencia, reflexión y refracción con la velocidad de propagación en los medios en contacto. En la imagen 2.4 se muestran esquemáticamente la incidencia de una onda electromagnética plana en el contacto entre dos materiales con propiedades dieléctricas diferentes. La polarización es perpendicular al contacto como se muestra en la imagen 2.4b y paralela al mismo en el caso de la imagen 2.4a.

La energía incidente es dependiente de la impedancia electromagnética de los campos incidentes y refractados o incidente y reflejado, así también con los ángulos de incidencia y refracción.

El porcentaje de energía reflejada depende del contraste existente entre los parámetros electromagnéticos de los medios, esto define los coeficientes de transmisión y reflexión de la energía [Pérez, 2001].

Para estimar el nivel de la señal recibida se deben considerar los coeficientes de reflexión y transmisión cuando la onda pasa a través del dieléctrico al objeto. Para lo cual es necesario considerar la impedancia intrínseca de los materiales la cual es el cociente entre los campos eléctricos  $\vec{E}$  y magnéticos  $\vec{H}$ . Donde se define una impedancia para el campo electromagnético incidente  $Z_1$ , que coincide con el reflejado y otro para el campo magnético refractado  $Z_2$ , es decir, transmitido:

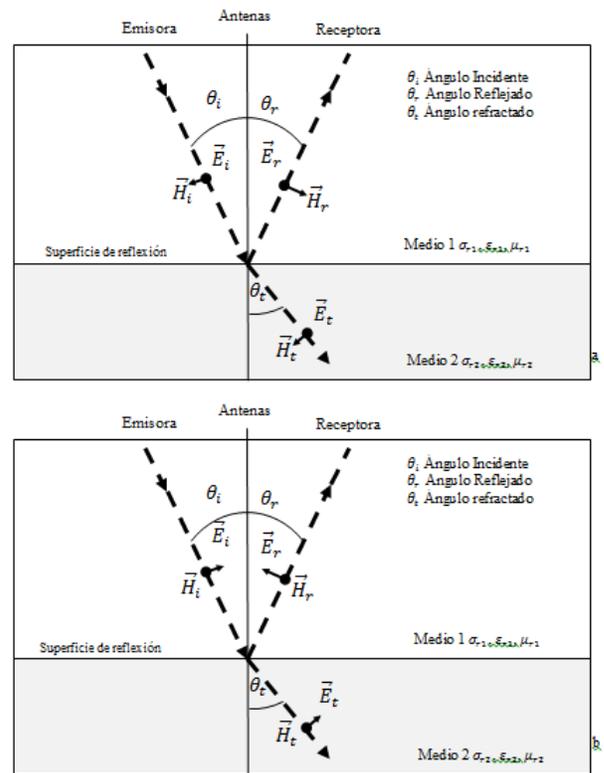
$$Z_1 = \frac{\vec{E}_i}{\vec{H}_i} = \frac{\vec{E}_r}{\vec{H}_r} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{r1}}{\epsilon_0 \epsilon_{r1}}} \quad (2.36)$$

La energía incidente es dependiente de la impedancia electromagnética de los campos incidentes y refractados o incidentes y reflejados, así también con los ángulos de incidencia y refracción.

El porcentaje de energía reflejada depende del contraste existente entre los parámetros electromagnéticos de los medios, esto define los coeficientes de transmisión y reflexión de la energía [Pérez, 2001].

Para estimar el nivel de la señal recibida se deben considerar los coeficientes de reflexión y transmisión cuando la onda pasa a través del dieléctrico al objeto. Para lo cual es necesario considerar la impedancia intrínseca de los materiales la cual es el cociente entre los campos eléctricos  $\vec{E}$  y magnéticos  $\vec{H}$ . Donde se define una impedancia para el campo electromagnético incidente  $Z_1$ , que coincide con el reflejado y otro para el campo magnético refractado  $Z_2$ , es decir, transmitido:

$$Z_1 = \frac{\vec{E}_i}{\vec{H}_i} = \frac{\vec{E}_r}{\vec{H}_r} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{r1}}{\epsilon_0 \epsilon_{r1}}} \quad (2.36)$$



**Imagen 2.4** Refracción y reflexión de la onda incidente. a) Polarizada horizontalmente, paralela al plano de incidencia. b) Polarizada verticalmente, perpendicular al plano de contacto. [Fuente Elaboración Propia].

$$Z_2 = \frac{\vec{E}_t}{\vec{H}_t} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{r2}}{\epsilon_0 \epsilon_{r2}}} \quad (2.37)$$

A partir de esto se pueden obtener los coeficientes de transmisión y reflexión de Fresnel, como el cociente entre el campo incidente y el campo refractado, y el cociente entre el campo incidente y el campo reflejado respectivamente [Pérez, 2001]. Si  $\theta_i$  es el ángulo de incidencia y  $\theta_t$  es el ángulo de refracción, estos coeficientes se expresan así:

$$R_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_r}{\vec{E}_i} = \frac{Z_2 \cos \theta_t - Z_1 \cos \theta_i}{Z_1 \cos \theta_i + Z_2 \cos \theta_t} \quad (2.38)$$

$$T_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_t}{\vec{E}_i} = \frac{2Z_2 \cos \theta_t}{Z_1 \cos \theta_i + Z_2 \cos \theta_t} \quad (2.39)$$

Donde  $R_{1 \rightarrow 2}$  es el coeficiente de Fresnel de reflexión en el contacto entre el medio 1 y el medio 2,  $T_{1 \rightarrow 2}$  es coeficiente de Fresnel de refracción entre un medio superior 1 y un medio inferior 2,  $\vec{E}_i$  es el campo incidente,  $\vec{E}_r$  es el campo reflejado y  $\vec{E}_t$  es el campo refractado o transmitido.

### 2.3.3.3. Atenuación.

La atenuación de una onda electromagnética se debe a las características del medio por el que se propaga.

El factor de atenuación  $\alpha$ , caracteriza el grado de disminución de la amplitud de onda de acuerdo al aumento de la distancia desde el punto de origen. Donde su unidad es  $m^{-1}$ :

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \text{Im} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (2.40)$$

La atenuación depende de la componente imaginaria de la permitividad dieléctrica relativa y 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 por una distancia  $\vec{r}$ .

$$\frac{\vec{E}_0}{\vec{E}(\vec{r})} = e^{\alpha \vec{r}} \quad (2.41)$$

Al considerar el logaritmo neperiano, se podrá medir el grado de atenuación en nepers:

$$L = \ln \left( \frac{\vec{E}_0}{\vec{E}(\vec{r})} \right) = \alpha \vec{r} \quad (2.42)$$

Al considerar logaritmos decimales, se podrá medir el grado de atenuación en decibelios:

$$L = 20 \log \left( \frac{\vec{E}_0}{\vec{E}(\vec{r})} \right) = 20(\log e) \alpha \vec{r} = 8,686 \alpha \vec{r} \quad (2.43)$$

La atenuación específica es el grado de atenuación por unidad de longitud, lo que permite obtener el grado de decaimiento de la amplitud de la onda y conforme a esta se propaga por un medio. Y se expresa así:

$$\Gamma = \frac{1}{r}L = 8.68\alpha = \frac{54.6}{\lambda} \text{Im}\sqrt{\epsilon_r\mu_r} \quad (2.44)$$

#### 2.3.3.4. Dispersión.

Las señales del Radar de Penetración Terrestre se transmiten a través de medios complejos, donde se encuentran con propiedades eléctricas y magnéticas muy heterogéneas en diferentes escalas. Éstas, a pequeña escala generan respuestas débiles o indetectables pero su presencia tiene un impacto en las señales que pasan por el medio. Lo que hace es tomar la energía de los campos electromagnéticos y dispersarla en todas direcciones [Jol, 2009].

En cualquier punto del frente de onda, la señal incide con una potencia por unidad de área. La dispersión a pequeña escala se caracteriza por el tamaño espacial  $a$ , y el número por unidad de volumen  $N$ .

El campo eléctrico o magnético se atenúa con coeficiente de atenuación  $\alpha_s$ . Donde el campo eléctrico disminuye con la distancia  $r$ :

$$E = E_0 e^{-\alpha_s r} \quad (2.45)$$

Donde

$$\alpha_s = \frac{NA}{2} \quad (2.46)$$

Y  $A$  es la sección transversal de la dispersión.

Examinando la respuesta de las pequeñas dispersiones, se hace referencia a la dispersión de Rayleigh, donde, la sección transversal de la dispersión de Rayleigh de un pulso se expresa de tal forma:

$$A = Ca^6 f^4 \quad (2.47)$$

Donde  $C$  es una constante con unidades  $1/m^4 Hz^4$ ,  $a$  es el radio de la esfera y  $f$  es la frecuencia.

La atenuación por dispersión debe ser añadida a la atenuación producto de las propiedades del medio material para obtener la atenuación completa que verá la señal del Radar de Penetración Terrestre que viajará a través de un medio dieléctrico con pérdidas heterogéneas [Jol, 2009].

$$\alpha_{total} = \alpha_{material} + \alpha_{dispersion} \quad (2.48)$$

## 2.4. Sistema de Radar.

### 2.4.1. Sistema GPR.

El Radar de Penetración Terrestre, es un sistema electromagnético utilizado en el estudio no destructivo del subsuelo y básicamente están compuestos por una antena transmisora, una antena receptora y un controlador, además de algunos accesorios que se utilizan para el posicionamiento, almacenamiento y posterior tratamiento de los datos adquiridos.

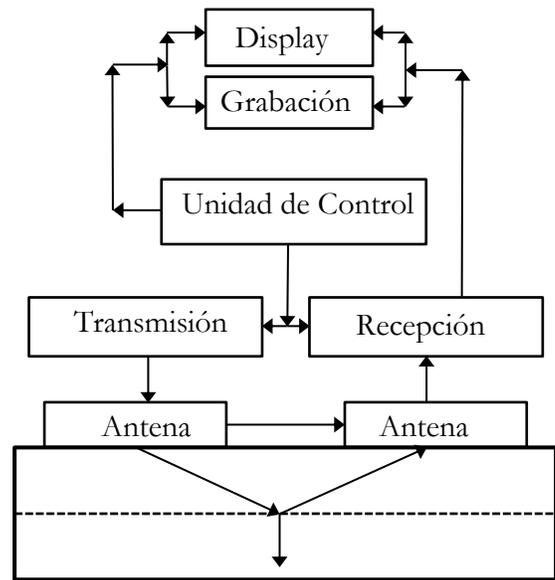
La antena transmisora irradia la onda electromagnética, que viaja a través del material a una velocidad que se determina por la permitividad del material. La onda se propaga y se desplaza hasta que choca con un objeto que tiene propiedades eléctricas diferentes a las del medio circundante, donde parte de la energía se refracta y continua su trayectoria, otra se dispersa, y una parte se refleja a la superficie la que es capturada por una antena de recepción, y finalmente se graba en un dispositivo digital para su posterior interpretación.

La representación gráfica de las mediciones son conocidos como “Radargramas”, que consisten en una representación de las trazas generadas cada vez que se produce un pulso electromagnético.

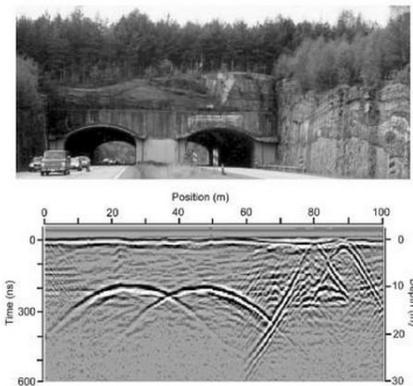
Las trazas corresponden a un vector de energía recibida por reflexión v/s tiempo transcurrido desde la generación del pulso. En la imagen 2.6 se muestra un Radargrama de la sección transversal de dos túneles.

### 2.4.2. Antena.

Las antenas son parte fundamental del Radar de Penetración Terrestre ya que son los encargados de transmitir la señal electromagnética y de captar la señal reflejada que regresa a la superficie.



**Imagen 2.5** Esquema de los componentes del sistema GPR. [Fuente: Elaboración Propia].



**Imagen 2.6** El Radar de Penetración Terrestre aplicado con una frecuencia de 50 MHz obtiene un Radargrama de la sección transversal de dos túneles. Las reflexiones obtenidas se muestran en la representación gráfica, en el eje horizontal en función de la posición y el eje vertical en función del tiempo [Fuente: Jol, 2009].

En los equipos GPR se hace una diferenciación entre antenas: si se trata de una única antena (transmisora y receptora) se llama monoestática; y consiste de dos antenas (una transmisora y otra receptora) se denomina biestática.

Las antenas se encuentran conectadas al controlador del cual se emite un pulso eléctrico y la antena transmisora lo transforma en un pulso electromagnético. Éstas captan el pulso electromagnético reflejado, luego lo transforman en un pulso eléctrico y lo envían al controlador que los procesa y los almacena como información.

Las antenas utilizadas en los sistemas de radar de penetración generalmente son eléctricamente pequeñas y por lo tanto exhiben una baja ganancia, donde probablemente sea el único sistema de radar con una ganancia tan baja. Sin embargo, el ancho de banda es mucho mayor que el utilizado normalmente en los sistemas de radar convencionales, y con esto tienen una resolución muy alta [Daniels, 2004].

Cuando utilizamos las antenas en estudio de prospección es importante que la mayor parte de la energía radiada lo haga en una única dirección. Esto permite mejorar la relación señal/ruido, permitiendo obtener registros nítidos con un rango más elevado. La disminución del ruido se produce porque al emitir la energía únicamente hacia el interior del medio de estudio se evita las reflexiones en objetos externos [Pérez 2001].

Los elementos de la antena tales como monopolos, dipolos, antenas cónicas y antenas bow-tie han sido ampliamente utilizados para la aplicación del Radar de Penetración Terrestre [Daniels, 2004]. Generalmente se caracterizan por su polarización lineal, de baja directividad y ancho de banda relativamente limitado, a menos que, se empleen técnicas de carga distribuidas donde el ancho de banda aumenta a expensas de la eficiencia de radiación.

Se han utilizado diversas disposiciones de los elementos de la antena, como el dipolo paralelo y el dipolo cruzado, que es una disposición que proporciona un gran aislamiento y detección de la señal de polarización cruzada de reflectores lineales [Daniels, 2004].

#### **2.4.2.1. Directividad.**

La direccionalidad o directividad de una antena se define como el cociente entre la densidad de potencia que se tiene a una cierta distancia de la antena direccional emisora y la densidad de potencia que se tendría en ese mismo punto si la antena emisora fuese isotrópica y radiase la misma cantidad de potencia [Jol, 2009].

#### 2.4.2.2. Ganancia.

La ganancia de la antena determina la efectividad de una antena, definido como el cociente entre la máxima potencia radiada por unidad de ángulo sólido y la potencia total que distribuye en todo el espacio [Jol, 2009].

Se trata de amplificaciones que se introducen a la señal. Se utiliza para corregir los efectos de la disminución de energía producida durante la propagación de la señal por el medio. La ganancia está definida por la siguiente expresión:

$$G = \eta D \quad (2.49)$$

Donde  $G$  es la ganancia,  $\eta$  es la eficiencia de la antena involucrada y  $D$  es la directivita máxima.

#### 2.4.2.3. Polarización.

La polarización de una antena es la polarización de una onda electromagnética en una dirección dada. Una onda electromagnética emitida por una antena puede estar polarizada horizontalmente, donde el vector del campo eléctrico es horizontal, y puede estar polarizada verticalmente, donde se rota el patrón en  $90^\circ$  y el vector del campo eléctrico será vertical. Generalmente el campo magnético es perpendicular al campo eléctrico y la dirección de propagación es perpendicular a la dirección de ambos campos [Daniels, 2004].

El Radar de Penetración Terrestre –si bien usa sus antenas linealmente polarizadas-, tiene los campos eléctricos de las antenas transmisora y receptora alineados en paralelo uno al otro y a la superficie; y con la dirección de desplazamiento perpendicular a la dirección del campo eléctrico resulta una onda propagada perpendicularmente a la superficie y hacia su interior [Daniels, 2004].

#### 2.4.2.4. Antena Monoestática.

De acuerdo a lo que publica [Daniels, 2004] la antena monoestática consta de un modulo único, que funciona, a la vez, como receptora y transmisora de la energía. Estas pueden ser antenas de conmutación y antenas de dos dipolos.

La antena de conmutación tiene una sola espira que actúa como emisora y receptora de energía. Para ello se incluye un conmutador que va modificando su actuación. La antena, al inicio emite un pulso de energía de corta duración, pasando inmediatamente a funcionar como receptora, tras un tiempo de recepción, vuelve a conmutar la función.

Cuando se trabajan con este tipo de antena habrá que tener en cuenta no superar el tiempo de conmutación cuando se seleccione el rango de estudio.

La antena de dos dipolos, como el nombre lo sita, contiene dos dipolos separados en el interior de su carcasa. Uno de ellos funciona como emisor, mientras el otro es un receptor. Las espiras se desplazan juntas y su separación es constante.

Este tipo de antena permite realizar perfiles con facilidad, pudiendo utilizarse en trabajos que requieran mayor rapidez.

Con las antenas monoestáticas pueden efectuarse las adquisiciones sobre superficies y en pozos de sondeo. Las adquisiciones de datos sobre superficie pueden ser mediante perfiles o puntales.

#### **2.4.2.5. Antena Biestática.**

De acuerdo a lo que publica [Daniels, 2004] la antena biestática se compone de dos módulos separados, donde uno corresponde a la antena emisora y la otra a la antena receptora, ambas independientes que permiten variar la distancia entre ambas.

Esta característica permite calcular velocidades aparentes de propagación de la onda, utilizando técnicas iguales a las que se emplean en prospección sísmica con estudio de punto medio común (CMP), además pueden aplicarse técnicas de transiluminación o reflexión de gran ángulo (WARR) que permite realizar estudio entre dos pozos (cross-hole) y también se pueden aplicar las técnicas que se utilizan con las antenas monoestáticas.

#### **2.4.3. Unidad Control.**

De acuerdo a lo que publica [Pérez, 2001] la unidad central o unidad de control consiste básicamente en una consola que funciona a través de un procesador central, donde se realiza la coordinación y control de las antenas, la señal emitida y los accesorios que se pueden añadir al equipo. También coordina el almacenamiento de la señal en algún tipo de soporte digital o fotográfico y en algunos casos, se puede realizar un tratamiento básico de las señales durante la adquisición de datos.

Las antenas se conectan a la unidad de control por medio de cables, de preferencia ópticos. Así también suele ir conectado un monitor para visualizar la señal que se está adquiriendo. En algunos equipos la unidad central es un computador portátil al que se le carga un programa para efectuar el control de las antenas y el procesado básico de las señales.

La emisión de pulsos es coordinado desde esta unidad hacia la antena. Cada uno de estos pulsos activa el o los dipolos de la antena para emitir la señal a la frecuencia central que corresponde al modelo de antena utilizado.

#### **2.4.4. Accesorios y Equipos Complementarios.**

El sistema de radar consta de una unidad central, con una o varias antenas y una unidad de registro de datos. A esto, se pueden añadir algunos accesorios y equipos complementarios para facilitar las tareas de aplicación del sistema y obtención de datos.

Los equipos complementarios que se utilizan generalmente para posicionar al GPR de acuerdo a una frecuencia topográfica dada son:

- Odómetro: se utiliza para una ubicación lineal sobre la superficie en estudio.
- GPS: se utiliza para tener una ubicación espacial sobre la superficie en estudio.

Los accesorios o equipos complementarios para la visualización y almacenamiento de los registros incluyen los siguientes elementos:

- Una pantalla que se conecta a la unidad central para tener una visión de los registros que se adquieren.
- Unidad de almacenamiento de datos adquiridos en soporte digital.

Dentro de los equipos o sistemas para el tratamiento de datos y visualización de radargramas se puede incluir todo el material informático para el tratamiento y visualización gráfica post adquisición de datos.

#### **2.5. Equipos GPR.**

Tradicionalmente han existido seis patentes comerciales mundiales de equipos de Radar de Penetración Terrestre, los cuales son:

- GSSI, Estados Unidos.
- MALA, Suecia.
- IDS, Italia.
- SENSORS AND SOFTWARE, Canadá.
- UTSI ELECTRONICS, Reino Unido.
- OKO-2, Rusia.

Donde las marcas con mayor presencia mundial y que destacan por su uso académico profesional son GSSI de procedencia americana y MALA de Suecia (ver anexo N° 1).

#### **2.6. Adquisición de Datos.**

De acuerdo a lo que publica [Pérez, 2001], [Daniels, 2004] y [Jol, 2009], con el Radar de Penetración Terrestre se pueden efectuar varios tipos de adquisición de datos, las que pueden ser:

- Adquisición en perfiles

- Adquisición puntuales
- Punto medio común (Common Mid Point, CMP)
- Transiluminación y tomografía
- Reflexión y refracción de gran ángulo (Wide Angle Reflexión and Refraction, WARR)
- Sondeos

Como se mencionó en un apartado anterior todos estos métodos de adquisición se pueden utilizar en equipos con antenas biestáticas y en unidades con las antenas monoestáticas; y pueden efectuarse tres tipos de adquisición de datos, mediante perfiles, puntuales y de sondeo.

Cada método se debe seleccionar en función del problema que se quiere estudiar y los resultados que se desean obtener.

### 2.6.1. Adquisición en Perfiles.

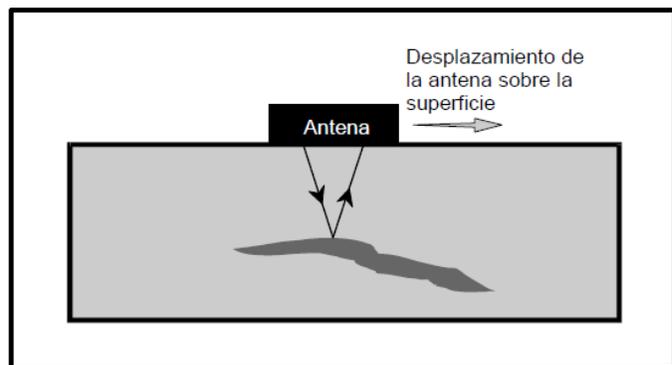
Para la adquisición en perfiles, la antena biestática –formada por dos antenas– se desplaza sin variar la separación; y la monoestática solo se desplaza a lo largo de una línea, como se muestra en la imagen 2.15.

Se emite un elevado número de pulsos por segundo que pueden ser desde 1 hasta 100, aunque la adquisición de datos sea en realidad puntual, se puede considerar

continua por la cantidad de trazas que se tienen en todo el perfil, dependiendo siempre, de la velocidad de desplazamiento de la antena la cual debe ser lo más constante posible, siendo conveniente la utilización de un odómetro durante la adquisición de datos.

### 2.6.2. Adquisiciones Puntuales.

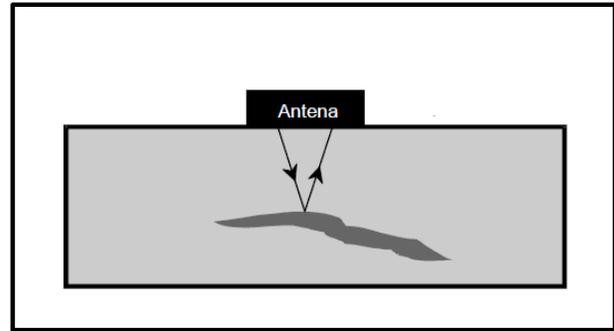
La adquisición de datos de forma puntual para la antena monoestática implica posicionar a ésta en un punto dado de la zona de estudio; mientras que la antena biestática se sitúan los dipolos a una distancia determinada entre si. En el punto, se realiza la emisión de energía y la adquisición de datos, sin realizar ningún desplazamiento, como se muestra en la imagen 2.16.



**Imagen 2.15** Esquema de adquisición de datos mediante perfiles. [Fuente: Pérez, 2001].

De esta forma se obtiene la información del interior del medio ubicado en la vertical del punto donde se ha instalado la antena. Para el caso de la antena biestática esta traza corresponde a la zona media entre ambos dipolos.

Esta manera de adquisición de datos se suele utilizar cuando no se puede usar algunos de los métodos con desplazamiento de antena, producto de las características propias de las zonas de prospección.

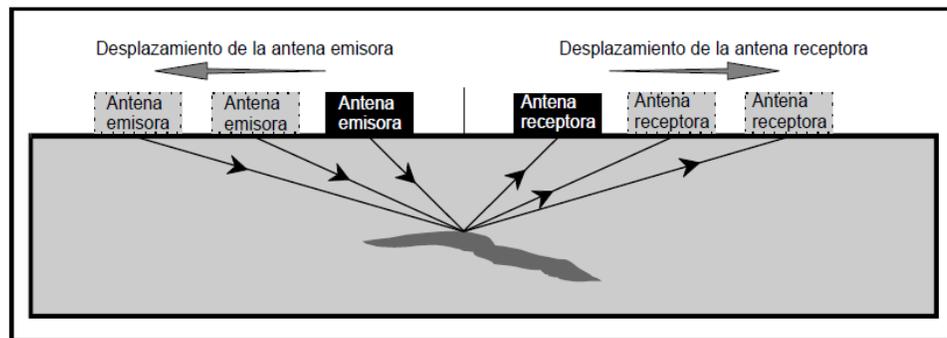


**Imagen 2.16** Esquema de adquisición de datos puntuales. [Fuente: Pérez, 2001].

### 2.6.3. Punto Medio Común (Common Mid Point, CMP)

Este método se realiza con antenas biestáticas, y consiste en ir desplazando la antena emisora y la receptora en direcciones opuestas, respecto a un punto central, quedando ambas equidistantes al punto central, como se muestra en la imagen 2.17.

Al realizar la adquisición de datos y al representarlo en una gráfica distancia v/s tiempo, tiene la forma de una hipérbola si únicamente hay un reflector bajo las antenas. La ecuación de



**Imagen 2.17** Esquema de la obtención de datos con CMP. [Fuente: Pérez, 2001].

esta hipérbola depende de las características electromagnéticas, de la distancia entre antenas, del tiempo de propagación y de la profundidad donde se encuentra la superficie reflectora. En el caso de tener más de una superficie reflectora bajo la antena, el resultado de la gráfica distancia v/s tiempo es una hipérbola por cada una de las superficies reflectoras.

Este método de prospección permite determinar una aproximación de las velocidades efectivas de propagación de la onda en diferentes materiales.

Los registros contienen información de diferentes ondas electromagnéticas, de manera que se puede analizar la onda directa que se ha propagado por el aire, la que recorre por el primer medio y todas las reflexiones que registran con forma de hipérbola.

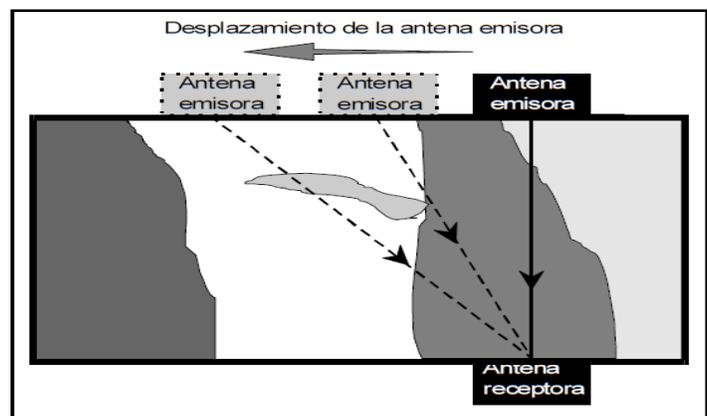
Las refracción de las ondas que han incidido en discontinuidades con ángulo crítico se registran como rectas. Con estas se pueden estimar las velocidades de propagación como la inversa de la pendiente de las rectas registradas. Hay que considerar que sólo se producen estas ondas cuando la velocidad de los medios en contacto aumenta con la profundidad. No se produce si en el medio inferior la velocidad del medio es menor que la del medio superior.

#### 2.6.4. Transiluminación y Tomografía.

Estos métodos se aplican a muros y medios que tienen dos superficies paralelas en las que se puedan situar las antenas. Suele aplicarse con antenas de alta frecuencia a elementos constructivos, y con antena de baja frecuencia a túneles, a minas, etc.

En la transiluminación se coloca la antena emisora sobre una de las superficies y la receptora en la superficie opuesta, una de las antenas queda fija y la otra se desplaza a lo largo de la superficie opuesta, donde la antena receptora capta la onda que se propaga de forma directa, como se muestra en la imagen 2.18. Las variaciones en la velocidad de propagación dan información de los cambios laterales. La posición y la distancia de ambas antenas deben ser conocidas en todo momento, para saber la velocidad de la onda en todas las posiciones y también es posible calcular las atenuaciones si además se efectúan medidas de amplitud de las ondas.

Este método permite realizar tomografías con el Radar de Penetración Terrestre. Con esto se pueden obtener imágenes bidimensionales de variaciones de velocidad dentro de un mismo medio. Estas variaciones corresponden a variaciones de permitividad dieléctrica, producto de cambios de material o variaciones de las condiciones, humedad, fracturas, compactación, entre otras. Además se pueden analizar los cambios de amplitud en la onda trabajando sobre las atenuaciones. Para obtener estos resultados se miden los tiempos de propagación de la onda entre el receptor y el emisor.



**Imagen 2.18** Esquema de la transiluminación, las antenas emisora y receptora se sitúan en superficies opuestas. [Fuente: Pérez, 2001]

En estudios tomográficos el plano entre la antena emisora y la receptora se divide en celdas. Cada registro es una función de la velocidad y de la longitud de onda de cada celda que atraviesa la onda durante la propagación. Partiendo de unos valores iniciales para las velocidades de cada celda y los

tiempos de propagación dentro de cada una de ellas, se realiza la inversión de datos. Es necesario un sistema de ecuaciones sobredimensionado que se obtiene efectuando una medida para cada posición de la antena emisora y de la receptora.

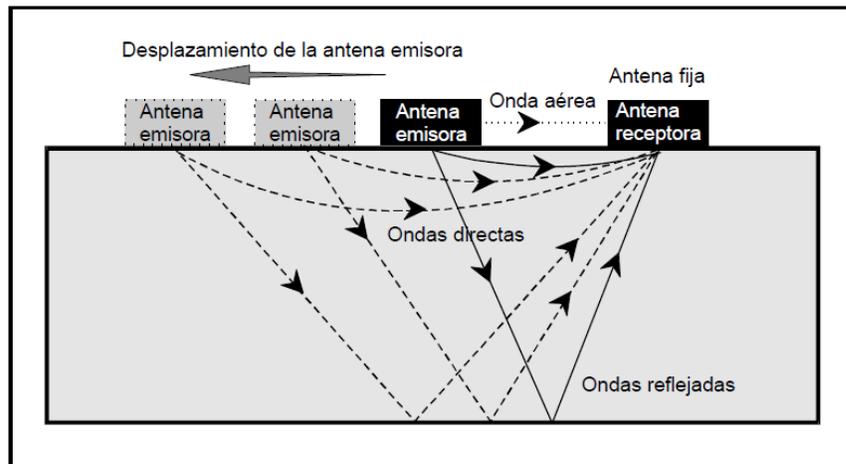
Los valores de la velocidad asociada a cada celda base se ajustan mediante un proceso iterativo realizando la suma de tiempos esperados para cada trayectoria según el modelo de celdas y comparado con el resultado experimental.

El resultado final de distribución de velocidades por el interior del medio se obtiene cuando la diferencia entre los tiempos calculados y observados es mínima. Mientras que el resultado final es un corte bidimensional del medio, entre la zona de emisión y la de recepción, en el que se aprecian las variaciones de velocidad.

### 2.6.5. Reflexión y refracción de gran ángulo (Wide Angle Reflexión and Refraction, WARR).

Este método consiste en dejar fija una de las antenas, puede ser la emisora o la receptora, y desplazar la otra aumentando la distancia entre ambas, como se muestra en la imagen 2.19.

Este tipo de aplicación del GPR se realiza en medios donde las superficies de reflexión son planas y paralelas a la superficie -donde se aplica la hipótesis que son medios homogéneos, que no tienen variaciones diferenciales de velocidad en la propagación- y que permiten estimar las velocidades verticales de propagación de cada material.



**Imagen 2.19** esquema de un perfil de reflexión y refracción de gran ángulo. [Fuente: Pérez, 2001].

La permitividad dieléctrica efectiva del medio se calcula una vez conocida la velocidad de propagación de la onda.

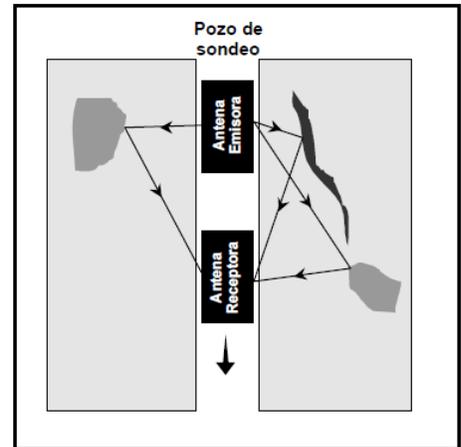
Con el método de reflexión de gran ángulo, los registros contienen diferentes eventos: la onda aérea, la onda directa, las ondas reflejadas y las ondas refractadas críticamente, considerando que existan las condiciones adecuadas para que se generen.

La onda aérea se desplaza con la velocidad de propagación en el aire  $c = 30 \text{ cm/ns}$ . La onda directa lo hace con la velocidad del primer medio, al igual que la primera reflexión. Las reflexiones posteriores registradas contienen información acerca de la velocidad de todos los medios que atraviesan durante la propagación. Los datos se procesan de forma similar a los de sismica de reflexión y se representan en gráficas tiempo  $v/s$  distancia.

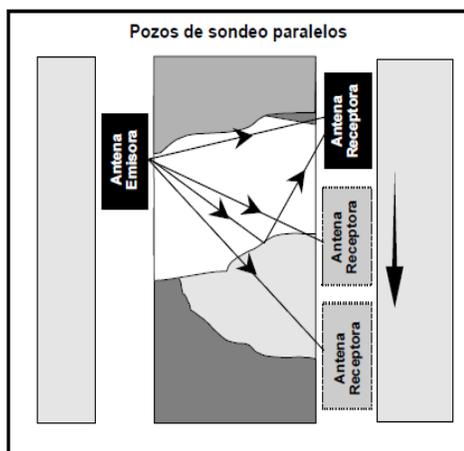
### 2.6.6. Sondeos

El método consiste en introducir por el pozo la antena o las antenas, según sean monoestática o biestática, como se muestran en las imágenes 2.20 y 2.21. Los registros se realizan de forma similar a los del método de perfiles. Hay que tener en cuenta la direccionalidad de la antena, ya que los Radargramas pueden ser el resultado de las reflexiones en una única dirección o en todas direcciones.

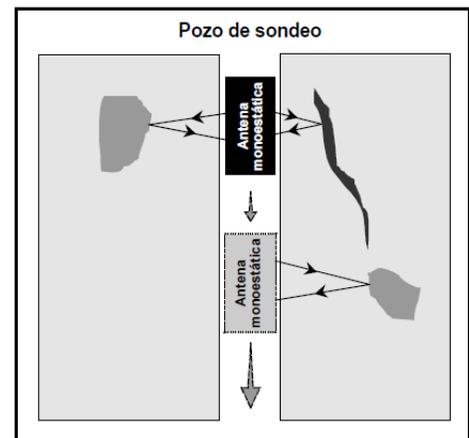
En el caso de que sean dos pozos paralelos se puede proceder de la misma manera que para una tomografía o transiluminación. Como se muestra en el esquema de la imagen 2.22.



**Imagen 2.20** Esquema de un sondeo con antena monoestática. [Fuente: Pérez, 2001].



**Imagen 2.22** Esquema de sondeo de dos pozos paralelos con antena biestática. [Fuente: Pérez, 2001].



**Imagen 2.21** Esquema de un sondeo con antena biestática. [Fuente: Pérez, 2001].

## 2.7. Procesamiento de Datos.

El procesamiento de señales es un medio para reducir el desorden [Daniels, 2004].

Los autores [Pérez, 2001], [Gutierrez, 2004], [Daniels, 2004] y [Jol, 2009] señalaron que son muchos los factores que limitan el desempeño del Radar de Penetración Terrestre, como la atenuación

de las ondas irradiadas, ruidos instrumentales, ruidos externos, entre otros. Por esto, antes de cualquier tipo de interpretación es necesario realizar un procesamiento de datos, de acuerdo a la necesidad de los objetivos de la prospección, con el objeto de mejorar la imagen, resaltar algún evento, aumentar la resolución y la relación ruido-síñal.

Aunque los equipos de radar cuentan con filtros en la unidad de control -donde en algunas ocasiones es posible realizar las interpretaciones directamente en campo- es poco frecuente y por lo general es necesario procesar los datos en función de parámetros como, las características de la unidad GPR, el entorno geológico y los objetos a estudiar.

Los registros guardados en el dispositivo de almacenamiento -conocidos como Radargramas- son una representación gráfica de las trazas generadas cada vez que se produce un pulso electromagnético. En el eje horizontal se representan distancias sobre la superficie del medio por el que ha pasado la antena y en el eje vertical se representan los tiempos dobles de propagación de las ondas reflejadas. Las trazas corresponden a un vector de energía recibida por reflexión v/s tiempo transcurrido desde la generación del pulso.

El procesamiento de datos parte desde el instante que se dispone de los Radargramas. El autor [Pérez, 2001] considera los siguientes procesos para el procesamiento de estos:

- Análisis de la información que nos proporciona la cabecera de un registro.
- Interpretación del significado de los registros cuando se presentan en forma de trazas de amplitud o en forma de escalas de colores.
- Cálculo de los parámetros que serán necesarios para efectuar una correcta interpretación de los registros. Donde es importante conocer la velocidad de propagación.
- Tratamiento de señales:
  - Filtros de frecuencias horizontales o espaciales.
  - Filtros frecuencias verticales o temporales.
  - Deconvolución predictiva.
  - Migración.
  - Transformada de Fourier.
  - Transformada de Hilbert.
  - Corrección estática.
  - Ganancia.
  - Superposición de trazas.

En el procesamiento de señales de los Radargramas hay que tener en cuenta las limitaciones, los problemas y las posibilidades de cada tipo de procesado de datos. Para lograr el objetivo se realizan pruebas de los distintos tratamientos de señales posibles y se trabaja con aquel registro donde se observan más claramente las anomalías de interés.

### **2.7.1. Información de la Cabecera de una Traza.**

Todos los registros contienen una cabecera de texto con información sobre el Radargrama, que incluye el nombre del archivo, la fecha del registro y las fechas posteriores de modificaciones, su rango, la posición del inicio, el número de los pulsos emitidos por segundo durante la adquisición de datos y los filtros que se han aplicado sobre un Radargrama durante la adquisición o en posteriores tratamientos.

Estos parámetros están asociados a la adquisición de datos y algunos de estos hacen referencia a posteriores modificaciones de los registros

### **2.7.2. Parámetros para la Interpretación del Radargrama.**

Los Radargramas son registros gráficos de las trazas generadas cada vez que se produce un pulso electromagnético, donde en el eje horizontal se representan la distancia de la superficie y en el eje vertical los tiempos dobles de propagación de las ondas reflejadas.

Conociendo las velocidades de propagación de los medios y los tiempos dobles, se pueden obtener las distancias que pueden representar los espesores de los medios, distancia de una anomalía que puede ser algún objeto en estudio, entre otros.

Para obtener las velocidades hay que conocer los parámetros electromagnéticos, ya que para un estudio práctico los parámetros de mayor interés son los efectivos, que determinan la velocidad de propagación, la atenuación de la onda y la amplitud de reflexión. Estos parámetros son constantes para una misma frecuencia y en un medio material con el mismo contenido de agua, composición y porosidad.

Conocidos estos parámetros, obtener la velocidad es sencillo. Una vez conocida las velocidades y con los tiempos dobles  $t$ , se pueden determinar los espesores y la distancia de la superficie de los medios y las anomalías, con la siguiente ecuación:

$$x = v \frac{t}{2} = \frac{ct}{2\sqrt{\epsilon_{ef}}} \quad (2.50)$$

Donde  $x$  es la distancia que se desea obtener,  $v$  la velocidad al que se ha propagado la onda y  $\epsilon_{ef}$  la permitividad dieléctrica efectiva del medio.

Para obtener  $t$ , se puede transformar la distancia hasta la anomalía en tiempo, sabiendo la longitud total del registro  $L$ , que corresponde a un rango del Radargrama  $R$  y la distancia del origen hasta la anomalía  $l$  que se está analizando.

$$t = l \frac{R}{L} \quad (2.51)$$

Combinando la expresión 2.50 y la 2.51, se puede obtener la distancia donde se encuentra la anomalía de la superficie.

$$x = v \frac{t}{2} = \frac{c \cdot l \cdot R}{2 \cdot L \cdot \sqrt{\epsilon_{ef}}} \quad (2.52)$$

Existen diversos métodos para obtener la permitividad efectiva o la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas. A continuación, se citarán los tres métodos más utilizados por su rápida aplicación, descritos por [Pérez, 2001]:

- La utilización de valores tabulados, es el más sencillo y a la vez el menos preciso. Consiste en utilizar valores ya tabulados por otros autores, que mediante experimentación han obtenido, para varias frecuencias, rangos de la constante dieléctrica y de la conductividad del medio, a menudo diferenciando entre variaciones en el contenido en agua de diferentes materiales. Uno de los problemas que presenta esta forma de determinar valores es la constante dieléctrica en su amplio rango de valores para un mismo material en función de las condiciones a las que está sometido (grado de humedad, porosidad y granulometría). La mayor o menor precisión depende de lo parecido que sea el medio analizado con el medio para el que se ha efectuado la media.

- La obtención de parámetros efectivos mediante la experimentación en laboratorio. Con este método se obtienen velocidades de propagación en muestras de los materiales de la zona de estudio. Con estos resultados se interpretan los registros adquiridos en el área de estudio, transformando el tiempo doble de propagación en profundidad y localizando la distancia a cada reflector. Una vez que se tiene la muestra en laboratorio, se sitúa una antena sobre una de las caras planas de la muestra, que se procura sea lo suficientemente grande para poder obtener registros claros con poco o ningún efecto de contorno. La muestra ha de tener dos superficies planas y paralelas entre si. En la cara opuesta, se coloca un material fuertemente reflector. Con esto se pretende que el coeficiente de reflexión en la cara posterior de la muestra sea el más alto posible. Como el espesor de la muestra es conocido y además se realiza también un registro colocando la placa metálica sobre la antena, es sencillo determinar el tiempo de propagación de la señal en el material y, junto al dato del espesor, obtener la velocidad de propagación y la constante dieléctrica efectiva. El problema que presenta este método es que al tomar la

muestra y trasladarla al laboratorio se alteran, en parte, sus propiedades (compactación y grado de humedad).

- Se relaciona el conocimiento de la estratigrafía del medio en algún sector con los tiempos dobles de propagación a las anomalías del Radargrama registrado en este sector. Para aplicarlo se deben trazar algunos perfiles en las áreas de estratigrafía conocida, por ejemplo, en zonas en las que se ha efectuado un sondeo mecánico. El Radargrama resultante se compara con el espesor de los materiales estratigráficos y se correlacionan las discontinuidades en el medio con los eventos registrados como reflexiones. Esta correlación permite conocer el tiempo doble de propagación y la distancia, lo que proporciona directamente la velocidad de propagación en cada material. El inconveniente que presenta este método es que no siempre se dispone de la información estratigráfica que proporciona una columna de sondeo en la zona de estudio.

### **2.7.3. Filtros Horizontales y Verticales.**

#### ***Filtros Horizontales o Espaciales.***

Este tipo de tratamiento de datos consiste básicamente en que unos filtros pueden ser pasa alta, pasa bajas o pasa banda, aplicados horizontalmente sobre el registro. Permiten el paso de las componentes frecuenciales de las señales que se sitúan entre unos valores dados.

Los filtros pasa bajas disminuyen los efectos de ruido de fondo que se observan en pocas trazas consecutivas. Los filtros pasa altas disminuyen los efectos de líneas continuas que se observan en los registros durante un número elevado de trazas.

El objetivo de este filtro es eliminar el fondo de ruido de las señales. Puede tratarse tanto de ruido de alta frecuencia ocasionado por una superficie irregular sobre la que se desplaza la antena, o bien puede tratarse de ruido de baja frecuencia debido a un reflector externo, como puede ser la persona que maneja la antena. El tratamiento del filtro horizontal es eliminar las mencionadas señales registradas como ruido, superpuestas a las que provienen de anomalías de interés, dejando únicamente aquellas señales que presentan las frecuencias horizontales seleccionadas. El resultado de aplicar este tipo de filtros es la eliminación de lo que serían un fondo del registro.

Este tipo de tratamiento de datos puede realizarse con dos tipos de filtros: los denominados Filtros de Respuesta Finita (FIR) y los denominados Filtros de Respuesta Infinita (IIR).

Un Filtro de Respuesta Finita se caracteriza por ser un sistema lineal discreto e invariante en el tiempo que presentan una respuesta a la señal de un pulso que tiene una longitud finita. Este tipo de señal funciona convolucionando la señal del radar con una función de longitud finita. Este tipo de filtro consiste en un promedio de una cierta región del registro, donde podemos tener filtros cuadrados o

triangulares, dependiendo de la forma de las ventanas utilizadas. La salida del filtro es un valor promedio como único punto, asociado al centro de la región seleccionada.

Los filtros de respuesta finita, eliminan ruidos de fondo en el caso de pasa alta y realizan una especie de suma de las señales en el caso de paso baja.

Los Filtros de Respuesta Infinita corresponden a los filtros analógicos como la deconvolución predictiva, comunes en el tratamiento de señales, donde el operador es igual al producto de una función impulso de respuesta infinita por una función de los datos. El resultado es una función que decae exponencialmente hasta el valor cero. Son filtros que se denominan predictivos o recursivos porque el resultado de filtrar un cierto evento depende de los datos pasados anteriores a este, es decir, de la historia.

Los Filtros de Respuesta Finita tienen la desventaja de ser lentos para el filtrado de bajas frecuencias ya que se procesan operadores muy largos. La ventaja es que la señal de salida se corresponde con la señal de entrada, tanto temporal como espacialmente, cosa que no pasa con los filtros de respuesta infinita, que presentan un cierto sesgo.

Para los filtros horizontales, las frecuencias de corte se determinan a partir de una constante Temporal de Corte (TC). Para un filtro pasa baja tiene que ser menor que el cuerpo anómalo más pequeño que interese detectar. Un filtro pasa alta debe tener una constante TC de valor superior al tamaño de la mayor de las anomalías de interés que se desea detectar. El tamaño de las anomalías de interés se determina dividiendo la longitud del registro por el tamaño que presenta las anomalías en dicho registro, obteniendo el número de trazas por anomalía.

### ***Filtros Verticales o Temporales.***

Este tipo de tratamiento consiste en unos filtros que pueden ser pasa alta, pasa baja o pasa banda que se aplica verticalmente sobre el registro, sobre cada una de las trazas adquiridas. Se trata de un filtrado frecuencial aplicado sobre cada una de las trazas que componen el Radargrama.

El objetivo es disminuir el ruido de fondo para mejorar la relación señal-ruido y destacar la información correspondiente a las anomalías que se pretenden investigar.

El filtro puede ser pasa altas, pasa bajas o pasa banda, dependiendo de las frecuencias de corte introducidas. Estas frecuencias se pueden determinar conociendo las frecuencias de los datos y de los eventos que se desean filtrar.

Este tipo de tratamiento de datos puede realizarse con dos tipos de filtro: los denominados Filtros de Respuesta Finita (FIR) y los denominados Filtros de Respuesta Infinita (IIR).

Con los Filtros de Respuesta Finita verticales, en caso de paso alta, se eliminan las bajas frecuencias de cada traza, mientras que en el caso de pasa baja el filtro realiza un promedio de una muestra alrededor de un punto central, a lo largo de toda la traza. El resultado del promedio es un valor que se asocia en el tiempo con el punto central de la muestra.

Los Filtros de Respuesta Infinita verticales, multiplican la señal por un operador que tiene amplitud máxima igual a 1 para la banda de frecuencias que corresponde a la señal que desea analizar, siendo una función que decae, a partir de esta banda, hacia un valor cero. Estos son filtros recursivos que se corresponden con los conocidos filtros análogos.

Para seleccionar la frecuencia o las frecuencias de corte, es necesario obtener el espectro frecuencial de varias trazas del registro. Para ello se realiza una transformada de Fourier y se representan los espectros de amplitud de las trazas. Se seleccionan las frecuencias que pertenecen a la señal y se analizan los contenidos frecuenciales que se desean filtrar porque introducen ruido en el registro. Las frecuencias de corte seleccionadas deben incluir entre ellas toda la banda de frecuencias que no se desean eliminar.

Aplicando dos filtros frecuenciales verticales, un paso alto y otro paso bajas, a un mismo registro, se obtiene un efecto de filtro pasa banda, disminuyendo las componentes frecuenciales que se encuentran fuera del intervalo comprendido entre los dos tiempos de corte seleccionado.

#### **2.7.4. Deconvolución Predictiva.**

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

$$r(t) = p_i(t) * s(t) + n(t) \quad (2.53)$$

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

La Deconvolución es una técnica de procesado muy utilizada en los estudios sísmicos. Su objetivo es separar los efectos que forman la onda para eliminar los debidos al medio en el pulso inicial, convirtiendo el registro obtenido en el campo en un Radargrama donde las señales registradas representan únicamente la reflexión primaria, de tal manera que las trazas no presentan los efectos debidos a la propagación del pulso por el medio.

El resultado es un registro -donde la forma de los pulsos ha sido modificada-, se utiliza para transformar una onda en un pulso único que representa la forma de la onda tras sufrir una reflexión primaria antes de que el medio filtre durante su propagación. Durante este procesado, lo que hace la Deconvolución a la respuesta del terreno y a la onda emitida, es descomprimir las componentes de esta, eliminando las reflexiones múltiples, y dejando únicamente las reflexiones primarias producidas en las discontinuidades.

Durante el diseño del filtro, se suele añadir un pequeño porcentaje de ruido blanco a la señal. Este proceso se conoce como Preblanqueado. El porcentaje de ruido blanco que se introduce suele estar entre el 0,1% y 1%.

El ruido blanco se añade únicamente a efectos de diseños del filtro para solventar este inconveniente, y su presencia en una señal, indica que el ruido generado por la Deconvolución en la señal resultante tras el procesado, es menor de forma que la función de salida de la Deconvolución, se suaviza y se estabiliza.

Cuando se ha diseñado el filtro se procede a la Deconvolución predictiva de la señal. El proceso consiste, dada la traza, en un determinado tiempo  $t$ , que predice el valor de la misma en un tiempo  $t + a$ , siendo  $a$  el denominado intervalo de predicción, donde el parámetro  $a$  debe ser igual o similar a intervalo temporal entre las múltiples que determina la longitud deseada del pulso de salida del filtro.

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

La selección de estos dos parámetros,  $a$  y  $l$ , debe realizarse cuidadosamente ya que normalmente se desconoce la forma del pulso no convolucionado. Hay que considerar también que al desconocimiento frecuente de la forma original del pulso transmitido se añade que la señal registrada normalmente contiene ruido que no puede despreciarse, sobre todo, en el caso de medios complicados. Para elaborar el filtro se parte del supuesto de que es posible despreciar el ruido. Estos dos problemas pueden ocasionar que un registro tratado con deconvolución haya sido modificado de forma que se podría decir irreal.

En casos sencillos los parámetros  $a$  y  $l$  son relativamente simples de determinar, y el proceso de deconvolución mejora los radargramas originales, simplifica algunos registros y permite una interpretación más sencilla.

Para aplicar este tipo de tratamiento hay que ir con mucho cuidado para evitar eliminar señales que pueden interesar y sobre todo para no obtener imágenes irreales que puedan provocar una interpretación incorrecta. En el caso de registros obtenidos en medios complejos, la aplicación de una deconvolución es complicada y no aporta resultados satisfactorios. En caso de registros sencillos, en los que tenemos pocos reflectores, es más sencillo seleccionar la distancia a la reflexión primaria para determinar el parámetro  $l$ , así como la longitud de salía del pulso que puede interesar. En estas condiciones la deconvolución ofrece resultados más satisfactorios.

### **2.7.5. Migración.**

La migración de señales es también un procesado de datos ampliamente utilizado en estudios sísmicos con los objetivos de trasladar a su posición real las reflexiones registradas corrigiendo los efectos de la inclinación de los reflectores y colapsar las difracciones registradas.

Al pasar el radar por encima de un objeto pequeño, comparado con la longitud de onda del pulso que se ha emitido, lo que se obtiene es una hipérbola. El vértice de la hipérbola marca la posición de la anomalía y lo deseable sería obtener un punto no una hipérbola. Es aquí donde entra en función la migración, la que opera eliminando los brazos de la hipérbola debido a objetos pequeños dejando sólo los vértices que es lo que indica la verdadera posición de los objetos.

Para su utilización se debe conocer la velocidad de propagación de la señal en el medio donde se ha generado la hipérbola, siendo utilizada en muchas ocasiones una velocidad media obtenida experimentalmente.

El objetivo de la migración es facilitar la interpretación de los Radargramas, aclarando los registros de campo, intentando para ello obtener un registro de georadar cuyo perfil coincida con el de los objetos detectados.

Para efectuar la corrección por migración se necesita calcular la ecuación de la hipérbola. Para esto se estima la velocidad media de propagación de la onda en el material y, a partir de ella, se conoce su constante dieléctrica efectiva. Una vez determinados estos parámetros se procede a efectuar la corrección.

### **2.7.6. Transformada Rápida de Fourier y Transformada de Hilbert.**

#### ***Transformada Rápida de Fourier.***

Se utiliza para pasar los registros del dominio temporal al frecuencial, lo que permite analizar las distintas contribuciones frecuenciales que componen la señal registrada.

Para una función real temporal  $f(t)$  que cumpla las condiciones de Dirichlet, su transformada de Fourier,  $F(\omega)$  se define como:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2.54)$$

La transformada inversa que nos devuelve la señal temporal a partir de su transformada de Fourier se define como:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{-i\omega t} d\omega \quad (2.55)$$

La transformada de Fourier es una función compleja. Si se representa la exponencial como una suma de funciones sinusoidales se puede separa la parte imaginaria de la transformada de su parte real:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\cos(\omega t)dt - i \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\sen(\omega t)dt \quad (2.56)$$

De esta expresión se obtienen las denominadas transformadas de Fourier en seno y coseno:

$$R(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\cos(\omega t)dt \quad (2.57)$$

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\sen(\omega t)dt \quad (2.58)$$

Estas funcione están relacionad con  $F(\omega)$  mediante:

$$F(\omega) = R(\omega) - iX(\omega) = M(\omega)e^{i\varphi(\omega)} \quad (2.59)$$

De forma que la transformada de la función temporal  $f(t)$  queda también representada por el modulo  $M(\omega)$  y una fase  $\varphi(\omega)$ . El modulo es el espectro de amplitud y se representa como:

$$M(\omega) = \sqrt{|R(\omega)|^2 + |X(\omega)|^2} \quad (2.60)$$

Mientras que el espectro de la fase se define por:

$$\varphi(\omega) = a \operatorname{tg} \left( \frac{X(\omega)}{R(\omega)} \right) \quad (2.61)$$

Se define la transformada discreta de Fourier para una señal  $f_k$  con frecuencia en un intervalo tal que  $\omega \in \left[ -\frac{\pi}{T}, \frac{\pi}{T} \right]$ , como:

$$\hat{F}(\omega_k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_k e^{-i\omega T n} \quad (2.62)$$

Donde la transformada inversa se calcula a partir de:

$$f_k = \frac{T}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{T}}^{\frac{\pi}{T}} \hat{F}_k e^{i\omega T k} d\omega \quad (2.63)$$

Sin embargo, como se trabaja con un intervalo finito de puntos se debe emplear la denominada transformada de Fourier finita. Para una función finita  $f_k$  formada por un número finito de  $N$  puntos de muestreo se define la transformada finita de Fourier como:

$$\hat{F}_N(n\Omega) = \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-\Omega T n k} \quad (2.64)$$

Siendo  $\Omega = (2\pi)/(nT)$  el intervalo frecuencial de muestreo.  $T$  el intervalo temporal de muestreo y  $n = 0, 1, \dots, N - 1$ .

La transformada inversa se calculo como:

$$f_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \hat{F}_N(n\Omega) e^{i\Omega Tnk} \quad (2.65)$$

Donde  $k = 0, 1, \dots, N - 1$ .

Uno de los algoritmos numéricos que se utiliza para calcular la transformada finita de Fourier es la denominada rápida de Fourier. Este ha sido comúnmente utilizado para el tratamiento de datos sísmico y se utiliza también en el procesado de datos de georadar. La gran ventaja, es el tiempo de cálculo. La limitación de este algoritmo es el número de puntos de muestreo, que debe ser una potencia entera de 2, y que además deben estar equiespaciados.

Las frecuencias consideradas serán:

$$f_n = \frac{1}{T} \frac{n}{N} \quad (2.66)$$

Donde  $N$  es el número de puntos de muestreo,  $n = 0, 1, \dots, N - 1$  y  $T$  es el intervalo de muestreo temporal, de forma que la frecuencia empezará en cero y alcanzará un valor límite denominado frecuencia de Shanon,  $f_s = 1/T$ . El algoritmo de la transformada rápida de Fourier solo calculara hasta la frecuencia de Shanon, con un intervalo de frecuencia equiespaciada  $\Delta f = 1/(TN)$ .

Este tipo de procesado permite pasar las trazas de georadar del espacio temporal al espacio frecuencial. Esta representación permite tanto seleccionar de forma adecuada los filtros frecuenciales a utilizar como comprobar si el proceso de filtrado ha sido correcto, eliminando aquellos contenidos frecuenciales considerados ruidos y dejando pasar los que se consideran señal.

### ***Transformada de Hilbert.***

La transformada de Hilbert es el procedimiento matemático que expresa la relación existente entre la parte real y la parte imaginaria de una función causa, o bien entre la fase y la amplitud de la misma. Mediante esta transformada se puede reconstruir la parte imaginaria, conociendo la parte real o viceversa, o reconstruir la amplitud de una señal a partir de su fase conocida o viceversa.

Las siguientes expresiones definen la transformada de Hilbert:

$$R(w) = X(w) \otimes \frac{1}{\pi w} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{X(y)}{w-y} dy \quad (2.67)$$

$$X(w) = -R(w) \otimes \frac{1}{\pi w} = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{R(y)}{w-y} dy \quad (2.68)$$

Donde el operador  $\otimes$  representa la convolución de dos funciones.

A partir de las expresiones 2.67 y 2.68 se pueden obtener la parte real de la función a partir de su parte imaginaria, y viceversa.

La transformada de Hilbert también permite obtener las amplitudes instantáneas de una señal, su amplitud, su fase y su frecuencia instantánea.

Una señal  $f(t)$  temporal real, puede considerarse como la parte real de una función temporal compleja:

$$Z(t) = A(t)e^{i\varphi(t)} \quad (2.69)$$

Donde  $A(t)$  es la amplitud temporal instantánea y  $\varphi(t)$  es la fase instantánea de la función.

A partir de la transformada de Hilbert puede calcularse la parte imaginaria  $y(t)$  de la función  $Z(t)$  en función de la parte real ya conocida (la señal  $f(t)$ ), además se puede obtener la amplitud instantánea  $A(t)$ , la fase instantánea  $\varphi(t)$ , y la frecuencia instantánea  $\omega(t)$ :

$$Z(t) = f(t) + iy(t) \quad (2.70)$$

$$A(t) = \sqrt{f^2(t) + y^2(t)} \quad (2.71)$$

$$\varphi(t) = a \operatorname{tg} \frac{y(t)}{f(t)} \quad (2.72)$$

$$\omega(t) = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{f(t)\frac{dy}{dt} - y(t)\frac{df}{dt}}{A^2(t)} \quad (2.73)$$

La amplitud  $A(t)$  es la envolvente de la señal  $Z(t)$ , y proporciona información acerca de la energía reflejada en cada objeto, ya que la forma e la onda de un registro de georradar no es un buen indicador de la energía reflejada porque suele estar compuesto de varios ciclos.

La frecuencia instantánea es un indicador del tipo de filtrado que está sufriendo la electromagnética al propagarse por el medio. Si se obtienen altas frecuencias se dice que el medio se comporta como un filtro pasa alta, mientras que si se obtienen bajas frecuencia el medio se comporta como un filtro pasa baja para la señal del georadar.

Al realizar una transformada de Hilbert se tiene una indicación del rango de frecuencias de interés en la señal analizada.

### 2.7.7. Correcciones Estáticas

Las correcciones estáticas son un tipo de procesado que tiene como objetivo corregir los efectos producidos en los registros por la topografía de la superficie en la que se han trazado los perfiles y también los efectos ocasionados por variaciones bruscas de la velocidad de propagación de la onda en el medio.

Estas correcciones consisten en determinar los desplazamientos temporales de los eventos registrados respecto de los que se registran si el perfil se hubiese trazado sobre una superficie totalmente plana y en el medio la permitividad dieléctrica fuese constante hasta el elemento reflector.

Estas correcciones se calculan considerando que las alteraciones se han producido en los datos más próximos a la superficie. El método consiste en desplazar todo en conjunto de trazas, según una ventana de anchura y forma determinada teniendo en cuenta las alteraciones esperadas, según el eje vertical o temporal. Con esto se corrigen estos efectos que en los registros se traducen como una alteración de los tiempos de propagación de la señal durante el recorrido por el perfil. Así también, se pueden aplicar las correcciones topográficas, que también pueden realizarse a partir de procedimientos de migración.

### **2.7.8. Ganancia.**

Este tratamiento se aplica a los registros temporales y consiste en multiplicar los datos del registro por una cierta función lineal que depende de la profundidad, es decir, del tiempo doble de propagación de la señal, y que amplifica la señal original. La ganancia suele medirse en decibelios.

La ganancia temporal amortigua el efecto de atenuación rápida de la señal, amplificando la energía procedente de distintas profundidades.

Las ondas electromagnéticas tienen una rápida atenuación producida al propagarse por los medios materiales, se le suma la atenuación por la expansión geométrica del frente de ondas, al final el resultado es que la amplitud de las reflexiones disminuye rápidamente con la profundidad.

No es usual corregir mediante ganancia la atenuación por absorción, ya que en la mayoría de los casos es difícil conocer la conductividad del medio y las variaciones que presenta. Sin embargo, se puede corregir el efecto de la expansión geométrica de manera sencilla. Este tratamiento permite remarcar los eventos más amortiguados, de manera que la ganancia se utiliza para mitigar los efectos de atenuación de la señal.

Para seleccionar la ganancia a aplicar se puede comparar la amplitud de la señal para diferentes tiempos de propagación y así obtener el grado de atenuación que sufre su propagación.

Este tipo de tratamiento puede aplicarse durante la adquisición de datos de campo como durante el procesamiento de datos para la interpretación.

### **2.7.9. Superposición de trazas (stacking).**

En sismica de reflexión, el proceso de stacking es la superposición de trazas que se realiza cuando se aplica el método de adquisición de datos punto medio común, tras haber realizado unas correcciones previas y los ajustes necesarios de tiempo, amplitud y fase.

Se realiza una superposición a todas las trazas que pertenezcan a un mismo CMP para mejorar la relación señal-ruido, enfatizando las señales coherentes y disminuyendo las señales incoherentes. Para

realizar correctamente el proceso, es necesario estimar adecuadamente la velocidad de stacking. Para ello debe realizarse la corrección Normal Move Out (NMO) apropiada para cada reflexión.

La aplicación de esta metodología a los estudios con el radar de penetración terrestre dependerá del tipo de antena utilizada y del tipo de adquisición de datos. Si se utiliza una metodología de punto medio común o CMP y una antena biestática, el equivalente con sismología de reflexión es casi inmediato.

Al utilizar el método CMP para adquisición, los mismos eventos registrados por la antena receptora tienen diferentes tiempos de propagación debido a que ésta se ubica a diferentes distancias de la emisora, según la configuración simétrica respecto a un punto central, de manera que se obtiene registros hiperbólicos para cada una de las superficies reflectoras que existen en el medio.

El tiempo extra de propagación que se registra entre dos puntos de esta superficie separados una cierta distancia, suponiendo un único reflector, está dado por:

$$\Delta t = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{v^2}} \quad (2.74)$$

Donde  $\Delta t$  es tiempo extra de propagación,  $t_0$  tiempo de reflexión vertical,  $x$  distancia en superficie entre emisor y receptor y  $v$  velocidad de onda en el medio.

Si se tiene más de un reflector la velocidad debe cambiarse por la velocidad cuadrática media  $V_{RMS}$ .

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}} \quad (2.75)$$

Donde  $n$  es el número de reflectores del medio,  $v_i$  es la velocidad del intervalo para cada espesor de capa  $h_i$  y para cada tiempo de tránsito por la capa  $t_i$ .

Por lo tanto el tiempo doble de propagación para una onda reflejada en la discontinuidad  $n$ -ésima a la profundidad  $h_n$ , es:

$$t_n = \frac{\sqrt{x^2 + 4h_n^2}}{V_{RMS}} \quad (2.76)$$

Una vez que se ha aplicado esta corrección temporal a cada uno de los diferentes grupos de trazas de un mismo CMP, se realiza la suma de trazas o superposición de trazas de un mismo grupo, mejorando la relación entre señal y el ruido del registro.

Cuando la adquisición se realiza con antenas monoestáticas o con antenas biestáticas con separación constante, no es necesario realizar la corrección temporal efectuada en caso del método del punto medio común. En este caso el proceso consiste en la suma de dos o más trazas adyacente. Como

en el caso anterior se utiliza para disminuir el efecto del ruido aleatorio, así como eventos pequeños que complican el registro.

Para seleccionar el número de trazas que se sumarán es necesario tener en cuenta el tamaño del evento más pequeño que se quiera registrar, la velocidad de adquisición de datos de la antena y su velocidad de desplazamiento. Con esta información se puede realizar un cálculo rápido y aproximado del número de trazas en las que se observa el objeto más pequeño de interés. Donde el número de trazas que se superpone no debe superar el número de trazas en las que se observa el objeto de interés.

Este tipo de procesado de datos, para antena monoestáticas, puede aplicarse durante la adquisición de datos cuando la velocidad de desplazamiento de la antena no es grande, ya que en estos casos se dispone de un elevado número de trazas cada metro de terreno analizado, de manera que es posible realizar la compresión de los registros sin perder información importante y consiguiendo que disminuya el ruido aleatorio que se superpone a la señal. En cambio, cuando la velocidad de desplazamiento de la antena es muy elevada el número de trazas por metro es muy bajo, no siendo conveniente realizar este tipo de procesado para no perder resolución en los registros.

## **2.8. Proceso en Estudio con Radar de Penetración Terrestre.**

En este apartado se indican los procesos para llegar a la representación gráfica final para la interpretación deseada.

### **I. Planificación**

- Definir objetivos.
- Adquisición de información relevante, previa.
  - Caracterizaciones anteriores.
  - Planimetría.
  - Mecánicas de suelo.
  - Geología superficial.
  - Mapas.
  - Fotografías, entre otras.
- Definir antena o antenas a utilizar.
- Planificación campaña.

### **II. Tareas preliminares.**

- Confirmar planificación con información previa comparándola con la información real in situ.

- Realizar correcciones in situ.
- Trazar y/o marcar perfiles.
- Marca e identificar puntos de referencia. Georeferenciación (GPS diferencial).
- Calibrar odómetro.
- Pruebas preliminares de calibración con GPR.
  - Estimar velocidad de propagación del medio.
  - Determinar filtros para visualización in situ.
  - Determinar velocidad de desplazamiento.
  - Determinar la frecuencia de disparo del pulso electromagnético en función de la velocidad de adquisición.

### III. Adquisición de datos.

- Aplicar algunos de los métodos de adquisición descrito en el apartado 2.7 necesario para satisfacer los objetivos de la prospección definidos en la planificación.
- Registrar eventos que afectan la obtención de datos.
- Registrar incidentes.

### IV. Análisis de datos.

- Ubicar Radargramas.
- Descartar anomalías producidas durante la medición.
- Selección de escala y paleta.
- Aplicar algunos de los tratamientos descritos en el apartado 2.8, de acuerdo a la necesidad de resolución que satisfaga los objetivos definidos en la planificación.

### V. Interpretación final de los Radargrama.

### **3. Aplicaciones del Radar de Penetración Terrestre.**

#### **3.1. Introducción.**

En la actualidad se han desarrollado varios métodos geofísicos para estudiar el interior de la tierra y estructuras, tales como: método sísmico, método de resistividad eléctrica, métodos magnéticos y gravimétricos, georadar o Radar de Penetración Terrestre (GPR), entre otros.

El Radar de Penetración Terrestre es un equipo versátil y de gran resolución, que funciona con un sistema electromagnético diseñado para la localización de objetos, exploración y el estudio no destructivo bajo la superficie de la tierra o al interior de estructuras visualmente opacas.

Desde la salida del primer prototipo al mercado -en la década de 1970- y con el rápido desarrollo de la electrónica, la informática, las técnicas de detección y amplificaciones de las señales electromagnéticas y del procesado de datos, han generado la expansión de su aplicación a distintas áreas, llegando a ser un dispositivo de uso multidisciplinario.

En su aplicación es muy importante la elección de la frecuencia de la antena, ya que la profundidad de penetración del GPR depende en gran medida del material investigado y la frecuencia de la antena utilizada; para un material, la baja frecuencia de antena aumentan la profundidad de penetración pero la resolución disminuye. El uso de antenas de alta frecuencia incrementa la resolución y disminuye su penetración [Moropoulou *et al*, 2013], es por esto que la selección del equipo, la frecuencia y el tipo de antena es muy importante y tiene mucha relación con los objetivos de la exploración. Así también, se debe tener cuidado con la interpretación de los Radargramas obtenidos.

Este capítulo contiene la revisión bibliográfica relativa a las aplicaciones del Radar de Penetración Terrestre en: arqueología y patrimonio; geotecnia; geología; sedimentología, estratigrafía y geomorfología; e ingeniería civil.

#### **3.2. Aplicación en Arqueología y Patrimonio.**

La arqueología es la ciencia que estudia los cambios físicos que se producen en las sociedades antiguas hasta las actuales, a través de los restos de materiales distribuidos en el espacio y conservados a través del tiempo. En tanto, el patrimonio es el conjunto de bienes y derechos heredables perteneciente a una persona o comunidad con la que ésta vive en la actualidad y es transmitida de generaciones pasadas a las presentes y futuras.

En la etapa de la prospección de un estudio arqueológico se realiza la exploración de una superficie o territorio sospechoso en busca de indicios materiales que muestren la existencia de un yacimiento. En el estudio de patrimonio, el mantenimiento sostenible, la preservación y revitalización del patrimonio cultural construido, y en particular, los sitios históricos y monumentos, son el foco de

estudio de los investigadores, pero por la antigüedad de las estructuras no existen registros de planimetría y especificaciones, además se desconoce el estado de la estructura interna afectada por el paso del tiempo, desastres naturales y la intervención humana.

Dado que esta información es fundamental a la hora de realizar trabajos de conservación, se han introducido técnicas no invasivas para realizar las exploraciones, de manera de no realizar intervenciones muy agresivas que puedan afectar negativamente a los restos arqueológicos y patrimoniales en estudio.

En los últimos años el Radar de Penetración Terrestre ha tomado un protagonismo importante, al ser un equipo diseñado para localizar objetos, realizar exploraciones no invasivas, de gran resolución y alcance, que están siendo utilizados en los estudios arqueológicos y patrimoniales.

Las aplicaciones que ha alcanzado el GPR en arqueología están el mapeo, delimitación y caracterización de estructuras para excavaciones en yacimientos arqueológicos, evaluación del estado de conservación de los sitios de arte rupestre, exploraciones de cementerios, etc. Así también, en la investigación para la restauración de monumentos patrimoniales, análisis del deterioro, identificación de cavidades, estudio de fracturas, entre otras.

### **3.2.1. Arqueología.**

El Radar de Penetración Terrestre es una técnica versátil, de alta resolución y no destructiva, que en las últimas décadas ha aumentado su aplicación en la arqueología, aplicándose en la prospección y descubrimiento de yacimientos arqueológicos, como cementerios antiguos, restos materiales de las sociedades pasadas, entre otras.

#### ***Prospección Arqueológica.***

Es la exploración de una zona o territorio en busca de indicios materiales que muestren la existencia de un yacimiento, es el paso previo a la excavación. Lo primero que se debe hacer es delimitar el terreno que se va a estudiar, para esto en general, se consideran los antecedentes históricos del territorio sospechoso y luego se realiza una prospección. Para esta etapa en un estudio arqueológico, los métodos geofísicos son de gran utilidad, al ser métodos no invasivos y de bajo impacto.

El Radar de Penetración Terrestre en combinación con otros métodos y por si solo, se ha aplicado en arqueología dando muy buenos resultados. Se puede revisar el trabajo de varios autores quienes han realizado prospecciones con el georadar en estudios arqueológicos, como [Pueyo *et al*, 2005], quien aplicó el GPR para delimitar y caracterizar ruinas arqueológicas del convento de Agustino de Fraga (Huesca) donde utilizó un equipo MALA RAMAC X3M, con una antena de 250 MHz.

[Barba *et al*, 2009] aplicó el Radar de Penetración Terrestre para detectar objetos arqueológicos bajo el centro histórico de Méridia, Yucatán, México, con un equipo GSSI SIR system con una antena biestática de 100 MHz y antenas monoestáticas de 200 MHz y 400 MHz.

[Shaaban *et al*, 2009] realizó una exploración con GPR a los monumentos antiguos en el valle de las Momias-Kilo 6 en el Oasis de Bahariya en Egipto, con un equipo GSSI SIR-2000 con una antena monoestática de 200MHz.

[Rodríguez *et al*, 2009a] publicó una exploración con GPR realizada en tres sitios arqueológicos en el estado de Santa Catarina, sur de Brasil, en Jabuticabeira II, Santa Marta IV, y Encantada III, con una antena blindada de 200 MHz.

[Yalçiner *et al*, 2009] llevó a cabo un estudio con un Radar de Penetración Terrestre en sitios específicos de la ciudad de Nisa en Turquía occidental, ocupando antenas blindadas de 250 MHz y 500 MHz, donde los resultados de las interpretaciones de los Radargramas reveló la existencia de paredes enterradas donde observaron sistemáticamente una firma característica, y pudieron describir en cierta medida la ubicación, la geometría y dimensiones, con las excavaciones posteriores al estudio confirmaron los resultados, concluyendo que las investigaciones geofísicas ayudan en la recolección de información arqueológica.

[Porsani *et al*, 2010] realizó un estudio con GPR en Lapa do Santo, en un yacimiento arqueológico, en el estado de Minas en Brasil con el fin de ayudar a los arqueólogos en su programa de excavaciones. Lo hizo con un equipo GSSI SIR-3000 con antenas de 200 MHz y 400 MHz.

[Sandweiss *et al*, 2010] utilizó el GPR para la identificación de un monumento en Los Morteros en el desierto de la costa peruana, con un antena de 100 MHz.

[Bonomo *et al*, 2009] publicó una prospección a un pueblo pre-hispánico en el sitio arqueológico Palo Blanco, Catamarca, Argentina, donde ubicaron dos edificios y estructuras no registradas. Para ello utilizó una antena de 400 MHz.

Así también, [Bonomo *et al*, 2010] describió una investigación realizada cerca del sitio arqueológico Palo Blanco en Argentina, donde aplicó el GPR para detectar nuevos edificios, alejados de los edificios conocidos previamente, obtuvo mapas de estos los que se confirmaron con las excavaciones.

[Chianese *et al*, 2010] desarrolló un estudio geofísico de alta resolución en el yacimiento arqueológico de Rossano di Vaglio en Basilicata, sur de Italia, que incluyó el Radar de Penetración Terrestre.

[Bavusi *et al*, 2010] combinó el estudio magnético y el GPR para la investigación de estructuras enterradas medievales en la región de Marche en Italia, usando un equipo GSSI SIR system con una antena de 400 MHz.

[Bini *et al*, 2010] aplicó el Radar de Penetración Terrestre en la parte inferior de la iglesia de San Miguel, perteneciente a un asentamiento fortificado abandonado del castillo de Benabbio, en Lucca, Italia, con el fin de identificar estructuras enterradas que confirmen la hipótesis de la historia de la arquitectura de la iglesia.

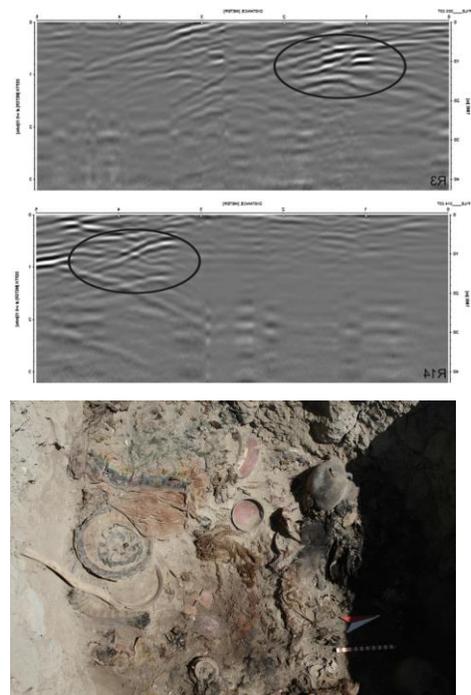
[Lasaponara *et al*, 2011] en su trabajo en la pirámide Naranjada en Cahuachi, Perú, utilizó un equipo GPR GSSI SIR-3000 con antena de 400 MHz para apoyar la actividad de excavación en curso en el lado oriental de la pirámide, donde con la interpretación de los Radargramas descubrieron una rica ofrenda ceremonial. En la imagen 3.1 se pueden ver dos Radargramas con las reflexiones y la excavación llevada en la zona estudiada con GPR.

[Pettinelli *et al*, 2012] estudió un área inexplorada en Pompeya, donde las ruinas romanas están parcialmente enterradas en los depósitos volcánicos. El método lo combinó con reflectometría de dominio de tiempo para estimar las propiedades dieléctricas de las diferentes unidades volcánicas, donde el GPR fue capaz de mostrar una imagen detallada de los sedimentos volcánicos y para localizar las estructuras arqueológicas ocultas.

[Tong *et al*, 2013] realizó una prospección con el Radar de Penetración Terrestre en el sitio arqueológico Peinan en Taiwán, considerado el mayor pueblo prehistórico en Taiwán,

donde solo está permitido realizar pequeñas excavaciones con fines de investigación dado que el lugar está protegido por la ley de preservación del patrimonio cultural. Este investigador utilizó un equipo GSSI SIR-10 con una antena de 500 MHz, y aplicó el GPR para comprender las firmas GPR de los restos del subsuelo como calibración.

Así, clasificó siete firmas basadas en la interpretación de Radargramas. Posterior a la calibración, en la zona norte, hizo un mapa de los edificios antiguos en el subsuelo. Y los resultados del estudio



**Imagen 3.1** En la imagen superior, dos perfiles de la zona investigada con GPR en la pirámide Naranjada en Cahuachi, Perú. Donde se destacan las zonas de reflexión. Y en la imagen inferior, excavación de la zona explorada con GPR en la pirámide Naranjada en Cahuachi, Perú. [Fuente: Lasaponara *et al*, 2011]

fueron verificados con dos pequeñas excavaciones. Concluyó, que el Radar de Penetración Terrestre va a ser muy útil para establecer la ubicación adecuada para las excavaciones de futuras investigaciones arqueológicas.

[Urban *et al*, 2014] descubrió y mapeo los restos de edificios subterráneos desconocidos con el Radar de Penetración Terrestre, de la Edad de Bronce tardía en Kalavassos-Ayios Dhimitrios al sur de Chipre. Aunque el sustrato calcáreo de grano fino en el sitio exhibió una alta fracción de arcilla y un contenido significativo de agua (factores que no son necesariamente ideales para aplicar el GPR), el autor señaló que los escombros de los edificios estudiados fueron visualizados en excelente resolución con suficiente detalle para indicar sus paredes, la forma de sus entradas y otros detalles arquitectónicos. Esto lo logró con un equipo de fabricación Sensors and Software con una antena de frecuencia 250 MHz.

El trabajo de [Urban *et al*, 2014] demostró que bajando la frecuencia de la antena en este tipo de sustratos se puede lograr una mejor resolución de los Radargramas.

[Urban *et al*, 2014] concluyó que los hallazgos resultantes de la exploración realizada con GPR, ofreció una nueva perspectiva sobre este importante sitio arqueológico, al tiempo que indicó que la selección de una antena adecuada no sólo es a veces justificado, sino que pueden ser cruciales en algunas investigaciones arqueológicas con GPR.

El Radar de Penetración Terrestre, como han publicado varios investigadores, es una herramienta que arroja muy buenos resultados en una prospección arqueológica. Así también, combinado con otros métodos geofísicos mejoran aun más los buenos resultados.

[Zheng *et al*, 2013] en su trabajo de aplicaciones de métodos geofísicos en estudios arqueológicos a las antiguas ruinas Shu, analizó la validez de cuatro métodos geofísicos para la detección de reliquias: el método de resistividad de alta densidad, polarización inducida, estudio electromagnético multi-frecuencia y Radar de Penetración Terrestre. Con ello examinó la validez de estos métodos de detección y técnicas; y estableció una escala múltiple y un sistema de detección multi-método para la detección no destructiva.

El trabajo realizado por [Zheng *et al*, 2013] es el primero en establecer un nuevo sistema tecnológico para la detección no destructiva de elementos patrimoniales en pequeña y gran escala que utilizan diferentes métodos y enfoques de detección.

Las aplicaciones del GPR en arqueología han aumentado en el último tiempo, extendiendo su aplicación a casi todas las latitudes. Considerando las características de los materiales en donde se pretende aplicar y con los estudios previos de calibración adecuados, el GPR ha demostrado ser una

buena herramienta en la prospección de yacimientos arqueológicos y un gran apoyo en las excavaciones. Con la interpretación de los Radargramas se pueden hacer mapeos y delimitaciones de los yacimientos en estudios o descubiertos y esto también conllevó, como lo expresan algunos investigadores en sus publicaciones, a la disminución del costo de una exploración arqueológica.

Chile es un país rico en arqueología, muchas ya descubiertas y muchas más por descubrir y con una tarea mayor que es estudiarla y conservarla, pero herramientas como el Radar de Penetración Terrestre ya se están comenzando a utilizar pero sería interesante aumentar su aplicación.

En julio de 2014 el profesor Dr. Ing. Galo Valdebenito – Académico de la Universidad Austral de Chile – junto con el equipo de trabajo formado por el Ingeniero Industrial Josep Pedret – Profesor Asociado ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya – y los Ingenieros Civiles David Alvarado y Víctor Aguilar – ambos de la Universidad Austral de Chile – muestran los resultados de la campaña geofísica con Radar de Penetración Terrestre para soporte arqueológico de la Restauración Adquisición Castillo San Luis de Alba, Mariquina, Provincia de Valdivia, Región de los Ríos, Chile.

El objetivo fue orientar las prospecciones arqueológicas en zonas donde exista mayor probabilidad de encontrar objetos de interés histórico.

La campaña de prospección fue abordada considerando las zonas donde existe una mayor probabilidad de encontrar restos, teniendo presente la revisión de los antecedentes históricos y la información proporcionada por el equipo de arqueología. Donde definieron cuatro zonas principales de prospección: interior del castillo, foso perimetral, cementerio y sector obra nueva.

El equipo utilizado fue un sistema GPR MALA X3M. donde en el interior del Castillo y el sector del foso perimetral se utilizaron las antenas apantalladas de 250 MHz y 500 MHz. Por otra parte, en el sector cementerio y obra nueva las prospecciones se centran en zonas más superficiales en estos sectores utilizaron una antena apantallada de 500 MHz.

Donde concluyeron, en la zona del interior del castillo fue posible evidenciar que posiblemente existen vestigios de una estructura antigua, donde recomiendan centrar las exploraciones. La evidencia mas clara de la presencia de un cementerio lo constituye la interpretación de suelo removido de los radargramas, el autor señala que las condiciones de excesiva saturación producto de las intensas lluvias los días anteriores a la campaña, constituyen un factor negativo en la interpretación.

En el sector cementerio y obra nueva, observaron zonas donde existen multireflexiones hiperbólicas muy superficiales, la cuales pudieron ser raíces de arboles. Donde el autor recomienda explorar y verificar dicha condición, ya que si no fueran raíces, corresponderían a restos arqueológicos.

Además en una cantidad importante de perfiles observaron hipérbolas que evidencian la presencia de anomalías puntuales, y que para cada una de estas indicaron claramente la ubicación y profundidad estimada, dejaron a criterio del equipo de arqueología intensificar las prospecciones en las zonas de mayor interés.

### ***Arte Rupestre.***

El arte rupestre es todo dibujo o boceto prehistórico que existe en algunas rocas y cavernas. Se trata de una de las manifestaciones artísticas más antiguas de la que existe constancia y se puede ubicar en todas las épocas de la historia de la humanidad.

Dado su gran valor histórico, es importante conocer sus condiciones de conservación. El Radar de Penetración Terrestre presenta un gran potencial para esta aplicación, ya que cumple con los requisitos de maniobrabilidad, es poco invasiva y no destructiva, además, con el GPR se puede localizar y evaluar el desarrollo de las discontinuidades en la profundidad, detrás de la pared de roca, y dar una visión tridimensional de las fuentes potenciales de inestabilidad.

Por tanto, el Radar de Penetración Terrestre se presenta como una herramienta adecuada para la investigación de estabilidad de los abrigos rocosos pintados y para ayudar en el diseño de medidas eficaces de conservación tal como lo sostuvo [Hoerlé *et al*, 2007]. Además, indicó que las ondas electromagnéticas no tienen efectos nocivos sobre la roca y las pinturas.

En el trabajo realizado por [Hoerlé *et al*, 2007] en dos sitios de arte rupestre en las montañas de Drakensberg en la provincia de KwaaZulu-Natal en Sudáfrica: Game Pass Shelter (patrimonio de la humanidad declarado por la UNESCO en 2000) también se puede revisar el trabajo de [Huneau *et al*, 2008]; el denominado por el autor como LOM1 (del cual no se puede revelar su ubicación al no estar protegido por las medidas necesarias).

Para este estudio, el investigador utilizó un equipo GPR GSSI SIR-2000 modelo DC-2A/3400, con una antena de 1,5 GHz. La profundidad de la investigación estuvo comprendida entre los 0,04 m y 0,80 m, lo cual es suficiente para determinar si las paredes de roca arenisca local presentaban alguna fisura que podrían hacerla inestable.

También, realizó pruebas preliminares para establecer el uso del equipo sobre la arenisca clarens (característica del lugar en estudio) y establecer el valor más adecuado para la constante dieléctrica. Las mediciones las realizaron en secciones continuas o en un punto, de acuerdo con la fragilidad de la roca o la presencia de arte. Como resultado del trabajo realizado por [Hoerlé *et al*, 2007] destaca la escasa cohesión de estas articulaciones sedimentarias y el riesgo de daños a los paneles pintados que representan.

Como conclusión el autor señaló que el GPR se puede utilizar en abrigos rocosos de la formación de arenisca clarens para identificar los signos precursores de destacamientos escala y la apertura de las discontinuidades que aún no son visibles en la superficie. Añadió que esta técnica se completa con éxito al diagnóstico obtenido mediante observaciones visuales de las paredes y permite una nueva evaluación de los riesgos mediante la investigación detrás de la pared de roca, sin ningún tipo de peligro para las pinturas.

De acuerdo a lo señalado por [Hoerlé *et al*, 2007] y [Huneau *et al*, 2008] el Radar de Penetración Terrestre es una valiosa herramienta para obtener una buena comprensión de la condición de conservación de un sitio de arte rupestre.

Como se mencionó en apartados anteriores, el GPR es una herramienta aplicable en muchas disciplinas y se puede usar en diversas situaciones o aplicaciones en Chile. En la zona comprendida por las regiones Arica-Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama del norte de Chile, existe una gran cantidad de sitios con arte rupestre, donde algunos datan de 2500-1600 A.C. aproximadamente [Berguer, 1999].

### ***Exploraciones a Cementerios***

Un cementerio es un lugar donde se depositan los restos mortales o cadáveres de los difuntos. La manera de realizar los entierros y de ubicar los cementerios depende de la época y la cultura. Por ejemplo en la antigüedad los romanos sepultaban a sus muertos en sus casas; los primeros cristianos sepultaban a sus difuntos fuera de las ciudades y a sus mártires en catacumbas; en la cultura mapuche los cementerios se ubicaban generalmente en las faldas de los cerros y acostumbra sepultar a sus muertos con todas sus pertenencias y sobre el entierro se colocaba el chelmamüll, entre otras.

Con el pasar del tiempo muchas culturas han desaparecido y con ellas también sus cementerios, los cuales en la actualidad son reliquias arqueológicas que valen la pena que sean descubiertas y conservadas ya que son parte de la historia de las distintas sociedades.

Dependiendo de la cultura, muchos de los lugares que fueron cementerios ancestrales son zonas protegidas y otros lugares olvidados que son sospechosos de haberlo sido. A la hora de realizar un estudio no es conveniente utilizar sistemas que sean destructivos y es aquí donde los métodos geofísicos están tomando protagonismo, como es el caso del Radar de Penetración Terrestre al ser un método no destructivo, que se puede utilizar sin mayor intervención en los lugares en estudio.

[Fiedler *et al*, 2009] realizó un trabajo para ver la eficacia de la aplicación del Radar de Penetración Terrestre en la ubicación de entierros sin marcar en un cementerio moderno, con el fin de aumentar la identificación de tumbas anónimas, donde señaló que los resultados obtenidos con el GPR

deben ser verificados comparándolos con las propiedades del suelo y la vegetación de los sitios examinados. Ese equipo GPR utilizado fue fabricado por GSSI SIR-20 con una antena de 400 MHz.

Así también [Doolittle y Bellantoni, 2010] publicó un trabajo realizado durante varios años buscando tumbas anónimas en Connecticut, donde utilizó un equipo fabricado por GSSI TerraSIRch con una interface Sistem 3000 y con una antena de 400 MHz.

Las preocupaciones con respecto a los agentes patógenos y la contaminación llevó a [Ruffell *et al*, 2009] a la búsqueda y evaluación de un cementerio de 156 años de edad. Para localizar este lugar, utilizaron información histórica y anecdótica. Para evaluar y asignar los contenidos y colapsos superficiales utilizaron el Radar de Penetración Terrestre (GPR). Unas 170 anomalías compatibles con los entierros fueron identificados con una antena de 200 MHz, 84 de las cuales coincidían con colapsos de la superficie, relleno y varias inhumaciones. El autor concluyó que el trabajo sirvió como una aproximación a la localización y mapeo de tumbas anónimas recientes e históricos.

En Australia, en el cementerio Mapoon Mission en Cabo York, Queensland, [Suton y Conyers, 2013] realizó un trabajo utilizando el Radar de Penetración Terrestre para identificar 120 posibles fosas comunes y comprender las prácticas mortuorias en el cementerio, lo que integrado con la historia de la zona, generó nuevos conocimientos sobre la historia cultural de la región, sobre la ocupación aborigen y los cambios en las prácticas mortuorias desde el establecimiento de la Mision Mapoon. Para este estudio utilizó un equipo fabricado por GSSI con una interface Sistem 3000 y con una antena de 400 MHz.

En el norte de Islandia en Stóra-Seyla, [Damiata *et al*, 2013] realizó un trabajo aplicando el Radar de Penetración Terrestre para formar imágenes de restos óseos donde comparó dos tumbas de la época de los vikingo y medieval de esa zona. Este trabajo lo realizó en una zona, hasta entonces, desconocida que se encuentra sobre el valle de Skagafjörður. El equipo utilizado fue un radar MALA RAMAC X3M con una antena blindada de 500MHz, la velocidad de onda fue determinada con las pendientes de las colas de las hipérbolas de fuentes puntuales en diversos perfiles. En la imagen formada por los Radagramas tomados en el cementerio vikingo, se interpretaron diversos componentes del cementerio, como la ruptura de la estratigrafía producto de la excavación de la fosa y un muro circular que encierra los entierros.

En el estudio de los restos óseos el investigador realizó perfiles transversales a lo largo 2 m que corresponde a la longitud de un entierro de un adulto, donde pudo observar las hipérbolas que generó el cuerpo enterrado. Además indicó que se pudo observar hipérbolas más amplias correspondientes a la parte superior del cuerpo y más estrechas en la parte inferior del cuerpo. Ello se puede ver en la imagen

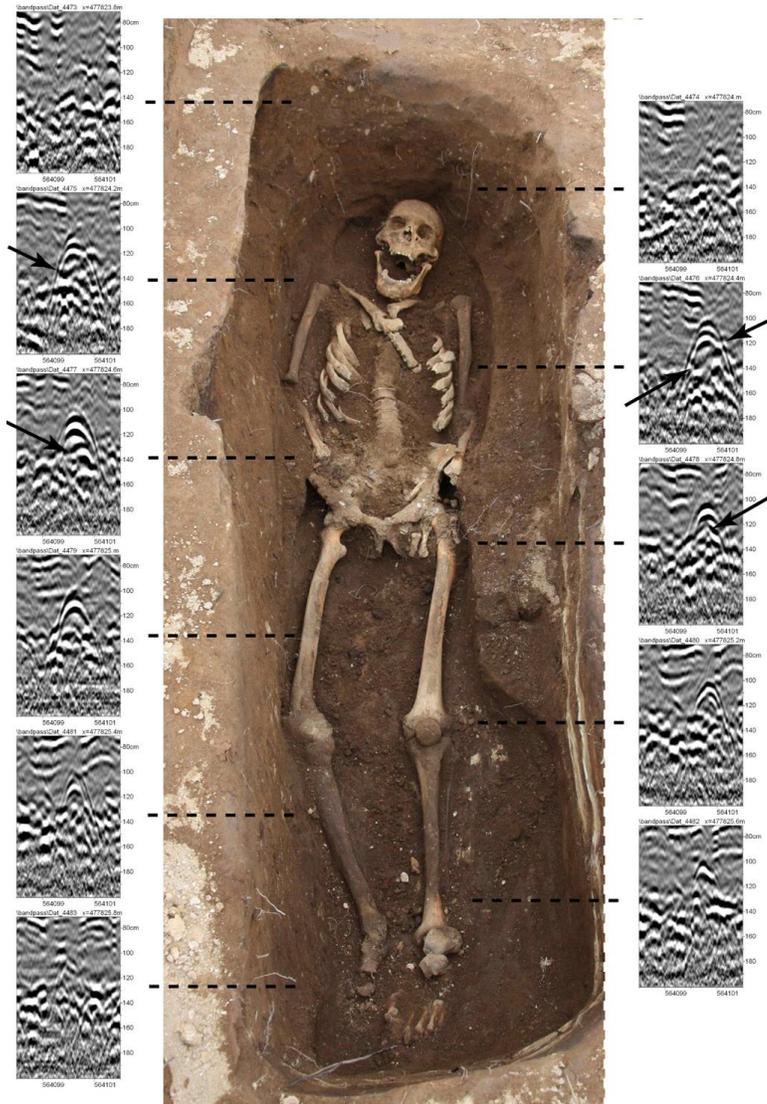
3.2. También identificó un vacío que correspondía a la caja torácica, lo cual confirmaron con la excavación.

En el cementerio medieval, el autor señaló que no observaron reflexiones hiperbólicas distintas como en la exploración al otro cementerio. Para mejorar la resolución realizaron una nueva muestra de datos más acotado donde en una zona del Radargrama el autor observó unas reflexiones débiles que estaban asociados con la alteración del suelo, el cual interpretó como un entierro. Al excavar encontraron una tuba donde solo recuperaron los dientes.

En su estudio [Damiata *et al*, 2013] obtuvo resultados muy diferentes de acuerdo al estado de conservación de los esqueletos, ante lo cual sugirió que el Radar de Penetración Terrestre se puede utilizar para evaluar el estado de los restos óseos en un entierro.

El año 2013 en Chile se realizó un proyecto financiado por el Centro de Estudio del Hombre Austral, del Instituto de la Patagonia, de la Universidad de Magallanes, para buscar un cementerio republicano en las cercanías del fuerte Bulnes, en la Región de Magallanes, el cual data de mediados del siglo XIX.

Para ello se utilizó un GPR, aplicación que estuvo a cargo del investigador de la Universidad Austral de Chile, Dr. Galo Valdebenito, quien acogido al convenio de Cooperación Académica suscrito entre la Universidad Austral de Chile y el Centro de Estudios del Hombre Austral del Instituto de la Patagonia, de la Universidad de Magallanes, realizó aplicaciones geofísicas mediante Sísmica Pasiva y Radar de



**Imagen 3.2** Secciones de los Radargramas que muestran las hipérbolas asociadas al entierro en el cementerio vikingo en el valle de Skagafjörður en el norte de Islandia. [Fuente: Damiata *et al*, 2013].

Penetración Terrestre en el reconocimiento y búsqueda arqueológica, en marco del proyecto restauración arqueológica y reconstrucción del sitio histórico parque rey Don Felipe, en la Región de Magallanes, Chile.

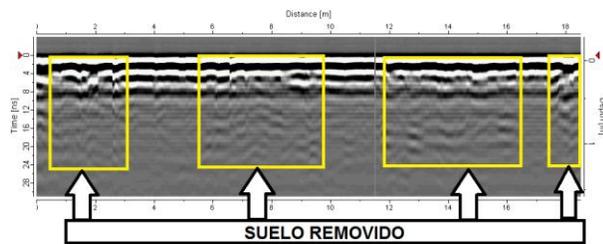
En este estudio se realizaron prospecciones con GPR en tres sectores, ya que de acuerdo con la investigación histórica, existía mayor probabilidad de encontrar el cementerio republicano y a partir de correlaciones e interpretaciones de Radargramas, orientaron las excavaciones arqueológicas.

Para determinar los patrones de visualización el investigador realizó una campaña de calibración en el cementerio de Los Ingleses, de la misma data y próximo a la zona de exploración (ver imagen 3.3 superior). A partir de esto pudo observar patrones de visualización de cuerpos y estimar profundidades de entierro sobre la base de áreas de suelo removido (detalles en imagen 3.3 inferior).

Una vez que concluyó la campaña de calibración, la prospección al Fuerte Bulnes fue abordada, y determinó que la zona identificada por los investigadores como sector 2 se visualizó el patrón de suelo removido, consistente con los patrones de los Radargramas observados en la calibración. Con esto concluyeron que las futuras campañas arqueológicas deberían concentrarse en esa zona en donde el patrón observado permitió inferir, con cierta precisión, la presencia de suelos removidos vinculados a la presencia del cementerio republicano.

Con posterioridad se realizó la campaña arqueológica de excavación, liderado por el arqueólogo Alfredo Prieto, de la Universidad de Magallanes, y en base a la indicación de los autores del estudio se confirmó la hipótesis de la campaña geofísica, donde se encontraron restos humanos en el sector indicado.

### 3.2.2. Patrimonio



**Imagen 3.3** En la imagen superior adquisición de datos GPR, para calibración en cementerio de los Ingleses. En la imagen inferior, firma de suelo removido obtenida en cementerio de los ingleses [Fuente: Elaboración Propia].

El radar de penetración de tierra es una técnica no destructiva que utiliza pulsos electromagnéticos para crear una imagen de la sub-superficie examinada, la frecuencia que se puede utilizar va de los 100 MHz a los 2,6 GHz para aplicaciones en patrimonio cultural [Moropoulou *et al*, 2013].

El GPR se utiliza cada vez más en el campo de la protección y evaluación del estado de conservación de las estructuras patrimoniales. Se usa para localizar la posición de cavidades, para incluir diferentes materiales, para calificar el estado de conservación del sistema estructural, para definir niveles de humedad, para revelar geometría de secciones de paredes, entre otros.

En los últimos años se han realizado diversos trabajos aplicando el Radar de Penetración Terrestre en estructuras patrimoniales como lo hizo [Ranalli *et al*, 2004] quien realizó investigaciones para la restauración de la basílica Collemaggio en L'aquila, Italia.

[Cataldo *et al*, 2005] y [Leucci *et al*, 2007] por otro lado aplicó métodos no destructivos, donde incluyó el GPR, para analizar el deterioro y grietas en algunas columnas de la Cripta de la Cattedrale di Otranto en el sur de Italia.

[Leucci, 2006] estudió la contribución del radar de penetración en la identificación de cavidades y fracturas en una aplicación en la principal Iglesia en Botrugno, Lecce, Italia.

[Arias *et al*, 2007], en tanto, combinó la fotogrametría digital, el GPR y el análisis computacional a los daños de un puente medieval de Fillaboia en Salvaterra do Miño, Galicia, España.

[García *et al*, 2007] utilizó el Radar de Penetración Terrestre como herramienta para la restauración del monasterio de San Miguel de los Reyes Jerónimo, del siglo XVI en Valencia, España.

[Barilaro *et al*, 2007] a través de la investigación con GPR, reveló la existencia de estructuras ocultas en las criptas de la iglesia de San Sebastiano en Catania, Sicilia.

[Pérez *et al*, 2008b] aplicó el GPR para estudiar la restauración de un monumento romano, el Teatro Romano de Sagunto en Valencia, España.

[Orlando y Slob, 2009] utilizó el georadar para monitorear grietas en un edificio histórico, causado por un deslizamiento de tierra lento e irregular en movimiento.

[Pérez *et al*, 2009] realizó una exploración a un edificio histórico, el palacio del Meques de Llió en Barcelona, España.

[Lubowiecka *et al*, 2009] realizó un trabajo donde presentó una metodología para evaluar una estructura de mampostería medieval antigua, la que integró un escaneo laser, Radar de Penetración Terrestre y el análisis de elementos finitos para elaborar un modelo para estudiar el comportamiento estructural. El GPR se utilizó para estimar la homogeneidad o heterogeneidad del material.

[Imposa *et al*, 2009] en su trabajo realizó estudios con el georadar en el interior de la iglesia de S. Agata Alla Badia, dañada en el terremoto que se produjo en el Este de Sicilia, el 13 de diciembre de 1990, con el objetivo de obtener información útil para su recuperación estructural.

[Kadioglu y Kadioglu, 2010] realizaron una representación de las fracturas internas de estatuas en el mausoleo de Mustafa Kemal Atatu RK en Ankara, en Turquía: 24 figuras de leones, tres de mujeres y tres hombres.

[Solla *et al*, 2011] realizó una evaluación con el Radar de Penetración Terrestre al arco del puente de Lugo, de fabricación romana en España.

Posteriormente [Solla *et al*, 2012a] realizó otro análisis estructural, esta vez, del puente romano Bibei en España, basado en los datos GPR y análisis numérico.

La evaluación del estado de conservación del sistema estructural de edificaciones histórica se basó en la experiencia adquirida en aplicaciones de ingeniería civil. El GPR se utilizó cada vez más en la evaluación del estado de decadencia de los edificios y estructuras históricas según [Moropoulou *et al*, 2013].

[Moropoulou *et al*, 2013] también señaló que la falta de conocimiento con respecto a las características estructurales, las técnicas de construcción de monumentos, la arquitectura detallada de todas las fases y los materiales históricos involucrados, de restauración e intervenciones, la degradación de los materiales, etc. a menudo hacen que la identificación de las características en un Radargrama sea una tarea difícil.

[Solla *et al*, 2012b] utilizó el Radar de Penetración Terrestre para inspeccionar 36 puentes antiguos de mampostería de piedra ubicados en Galicia, España.

Los antiguos puentes de arco de mampostería de piedra son, todavía, de uso común dentro de la infraestructura de transporte. Muchas de estas estructuras requieren especial atención y seguimiento, ya que no fueron diseñados para el aumento de la carga de tráfico y vibraciones intensas, y pueden dar lugar a la decadencia estructural.

El objetivo del trabajo realizado por [Solla *et al*, 2012b], fue analizar la viabilidad y la eficacia del GPR para obtener detalles interiores, previamente desconocidos, para la evaluación de estas estructuras. El conocimiento de esta información estructural es importante para los futuros trabajos de fortalecimiento y conservación.

[Solla *et al*, 2012b] señaló que hay muchos factores que pueden afectar negativamente las ondas del GPR. La interpretación de los datos pueden llegar a ser muy complejos debido a los eventos desfavorables. Por lo tanto, estos factores deben ser considerados para mejorar la interpretación de los

datos. Estos factores incluyen el establecimiento de objetivos del estudio, la recopilación de toda la información estructural y geométrica disponible sobre el puente, y el conocimiento de los materiales de construcción utilizados y posibles restauraciones del puente.

En el desarrollo de la investigación el autor determinó la velocidad de propagación de la onda en la mampostería para lo cual realizó pruebas en zonas conocidas de las estructuras.

Dado que el análisis de datos GPR de estructura de mampostería de piedra heterogénea puede ser complejo, el autor empleó modelos numéricos ya que pueden ayudar a la interpretación de los datos de entornos complejos.

La recopilación de datos la realizaron con un equipo MALA RAMAC X3M GPR, con antenas blindadas de 250 MHz y 500 MHz. La selección de estas dos antenas se hizo para lograr una buena resolución y penetración del material de relleno y las fundaciones de los puentes estudiados. Se recogieron dos perfiles paralelos en direcciones opuestas con ambas antenas. Fijaron la distancia entre los perfiles en un metro.

En la mayoría de los casos, para los datos obtenidos con la antena de 250 MHz, la distancia en línea y la ventana de tiempo total eran igual a 5 cm y 200 ns, respectivamente, y lo definieron en 516 muestras por traza.

Para los datos de la antena de 500 MHz, el espaciamiento en línea era igual a 2 cm, y la ventana de tiempo total se fijó a 100 ns, que también lo definieron en 678 muestras por traza. Utilizaron una rueda de odómetro conectado a la antena para medir las longitudes de los perfiles.

Los datos obtenidos de las exploraciones las procesaron con el software ReflexW v.5.6. Además, aplicaron correcciones de topografía para mejorar la precisión en la formación de imágenes características del subsuelo. En esos casos, realizaron un levantamiento topográfico para obtener variaciones de elevación de los perfiles de GPR.

Para algunos puentes, construyeron un modelo tridimensional de todo el puente utilizando los métodos de exploración fotogramétricos o láser. La información métrica obtenida les permitió calcular las velocidades de ondas de radar precisos para mampostería granítica en diferentes zonas de la estructura, donde [Solla *et al*, 2012] señaló que el conocimiento de la velocidad de la onda de radar más adecuado permitió una interpretación más exhaustiva de los datos de GPR. La velocidad la estimaron mediante la adaptación de una hipérbola de difracción a la reflexión hiperbólica producido por la interfaz de arco-aire.

Además, utilizaron la geometría precisa proporcionada por la creación de modelos sintéticos de GPR utilizando una versión paralelizada - basada en MPI y Open MP - de GprMax.

En el desarrollo de la investigación obtuvieron resultados que proporcionaron información de los puntos históricos, arqueológicos y estructurales.

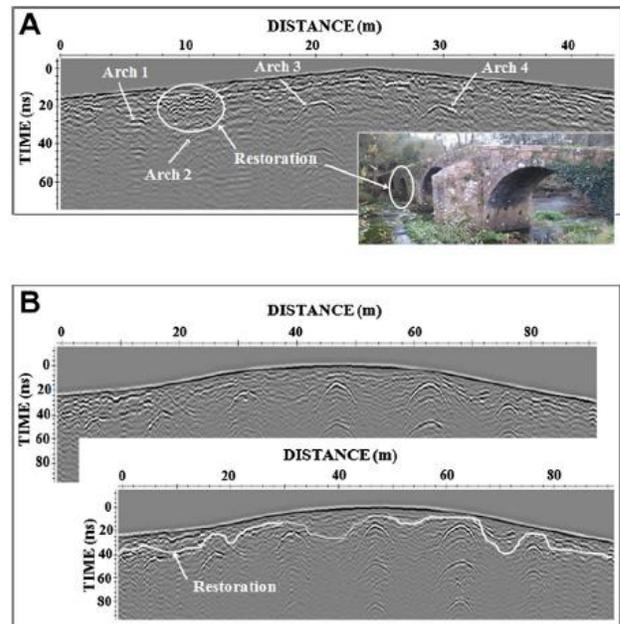
Mediante la observación de las anomalías en los patrones de reflexión, fue posible detectar y cartografiar los restos de restauraciones realizadas previamente de los puentes, tales como la reconstrucción de los arcos.

En la imagen 3.4 se muestran los resultados de los Radargramas procesados obtenidos con la antena de 500 MHz en el puente Lubians y los datos procesados obtenidos con la antena de 250 MHz en el puente Monforte, donde se aprecian los arcos del puente y las restauraciones.

Desde el punto de vista arqueológico, el autor pudo identificar otros aspectos interesantes, como la presencia de posibles arcos ocultos o una forma histórica diferente de la estructura.

En el caso de un arco oculto, la respuesta de la señal es un reflejo hiperbólico (el mismo identificado en la interface aire-arco de arcos visibles), y la polaridad de la señal puede mostrar si el arco está vacío o lleno. En algunos puentes medievales, el antiguo perfil doble vertiente se había llenado para crear un camino horizontal usando un material de relleno diferente que presenta propiedades dieléctricas con un contraste suficiente, con respecto al material original, para distinguir los datos. En estos casos, observaron un reflector constante ligeramente inclinada en ambos márgenes de la estructura del puente.

También interpretaron la información estructural, donde identificaron muelles sólidos como una reflexión constante entre la mampostería y el granito sólido. Detectaron la variación en los materiales internos por su alto contraste dieléctrico, también se señaló que en la mayoría de los casos, la interfaz de relleno se caracteriza por una buena señal debido al menor contraste dieléctrico entre los medios de comunicación y a veces obtuvieron información sobre la naturaleza de las fundaciones del puente.



**Imagen 3.4** Resultados GPR. (A) Radargrama procesado adquirido con la antena 500 MHz en el puente de Lubians, que muestra el efecto de una restauración realizada sobre el segundo arco y (b) los datos procesados obtenido en el puente de Monforte usando la antena de 250 MHz, que ilustra la reflexión producida por una restauración en la vía. [Fuente: Solla *et al*, 2012(2)]

La velocidad media de la mampostería granítica la calcularon en diferentes zonas de las estructuras, y estimaron estos valores de velocidad utilizando la geometría externa del puente. La velocidad promedio se determinó para cada puente que variaron desde 8,0 *cm/ns* hasta 13,5 *cm/ns*. Estas diferencias de velocidad pueden ser una consecuencia de la falta de homogeneidad en la mampostería (tales como las diferencias en la composición y densidad), además de la probable presencia de zonas húmedas en la piedra.

En este trabajo, la identificación de las grietas y huecos dentro de la estructura del puente no era posible utilizando GPR debido a la confluencia de las reflexiones desde el material de relleno no homogéneo. Sin embargo, la existencia de áreas húmedas puede estar relacionada con defectos existentes en la piedra.

Obtuvieron información estructural adicional de los datos de GPR, incluyendo la identificación de materiales modernos, tales como hormigón armado, que se utiliza con frecuencia en la construcción de la vía para reforzar el subsuelo puente. Un patrón de reflexión se diferenció en forma de pequeñas hipérbolas consecutivas. Estos nuevos materiales utilizados para la restauración, de acuerdo a lo que señala el autor, podrían ser una causa importante de atenuación de la señal y la pérdida de resolución del destino. Toda esta información puede ser útil para los ingenieros civiles en el desarrollo de futuras medidas de fortalecimiento.

Otros factores que pueden afectar negativamente a una encuesta GPR, y por lo tanto la interpretación de datos, incluyen timbrar eventos que probablemente son causadas cuando las señales de GPR interactúan con un objeto metálico, como por ejemplo sistemas de drenaje de tuberías enterradas en el puente. Fueron capaces de eliminar todas las firmas GPR no deseados mediante la aplicación de técnicas de procesamiento de señales apropiadas. Desarrollaron modelos sintéticos considerando la geometría externa del puente producida por los datos de escaneo láser o fotogramétricos. Utilizaron estos modelos sintéticos para extraer información útil y para ayudar en la interpretación de los datos de campo GPR. Todas estas reflexiones complejas, si no se reconoce, puede dificultar la detección de otros reflectores interesantes.

[Solla *et al*, 2012b] concluyó que la interpretación de los datos GPR era a veces complicado. Algunos materiales modernos utilizados para la restauración, como el hormigón armado, así como timbre eventos de ruido y de ondas aéreas, pueden ser las causas adicionales de atenuación de la señal GPR y la pérdida de resolución del blanco. Para el procesamiento de datos fue necesario crear imágenes exactas de puentes que permitieron extraer información significativa. La calidad de los datos de campo se mejoraron mediante el procesamiento de la señal. La atenuación de la señal GPR la corrigieron

utilizando un filtro de ganancia, que consiste en la amplificación de la señal recibida. Tanto el ruido de baja y alta frecuencia en los datos en bruto se separó por filtración temporal y espacial. En algunos casos, el procesamiento fue una herramienta esencial para la reducción del ruido y una mejor interpretación de los datos. La identificación de otras reflexiones interesantes era difícil sin esta corrección.

El autor señaló que es importante tener en cuenta que el procesamiento de señal adecuada debe elegirse cuidadosamente, y se aplica de una manera que los datos no están extremadamente distorsionados. Además, las correcciones estáticas fueron consideradas en arcos apuntados para mejorar la precisión de la formación de imágenes características del subsuelo. El conocimiento de las dimensiones estructurales precisas permitió la estimación de velocidades de las ondas de radar más apropiados en mampostería. Los cambios en la velocidad observada aquí potencialmente delimitan la presencia de diferentes rellenos o áreas húmedas en la mampostería.

Además señaló, que los modelos sintéticos pueden proporcionar información sutilmente útil que puede ayudar con la interpretación de datos.

[Labropoulos y Moropoulou, 2013] utilizó el Radar de Penetración Terrestre, como parte de un estudio de diagnóstico preliminar, y demostró la capacidad de la técnica para evaluar el estado de las grietas estructurales del campanario de la iglesia del Santo Sepulcro.

Este recinto, también conocido como Iglesia de la Resurrección, en la ciudad de Jerusalén es uno de los sitios históricos más importantes de la cristiandad y de acuerdo a la tradición es la escena de la muerte y resurrección de Jesucristo. La iglesia data de 325 DC, cuando el emperador Constantino I ordenó la construcción de una basílica que incorpora la tumba de Cristo y de la colina del Gólgota.

El actual campanario de la Iglesia del Santo Sepulcro se remonta a 1179, y su parte inferior se incorporó en la Iglesia de los 40 Mártires. El campanario se construyó en el lado Oeste de la entrada de la Iglesia del Santo Sepulcro. Es una estructura de tres pisos con una altura de 27.40 m. El primer piso (planta baja) se incorporó en la Capilla de los 40 Mártires. Su lado Norte se encuentra junto a la Iglesia de la Resurrección, mientras que su fachada libre (Este) tiene un arco poligonal con mampostería y una ventana. El segundo piso es de libre caras en sus fachadas Este, Sur y Oeste, mientras que es adyacente en su lado norte con la Iglesia de la Resurrección a media altura. El tercer piso es la sala de la campana y tiene dos aberturas arqueadas en cada lado. El techo de la sala de la campana es de madera. La mayoría de los daños de la torre de la campana se atribuyen al terremoto de 1545, cuando la cúpula de la torre de la campana se derrumbó.

El trabajo de [Labropoulos y Moropoulou, 2013] es parte de un reciente trabajo de la Universidad Técnica Nacional de Atenas, que realizó un estudio preliminar de diagnóstico de la Iglesia del Santo Sepulcro en Jerusalén, donde se emplearon técnicas no destructivas para determinar y asignar los materiales incompatibles utilizados para su conservación y mantenimiento estructural.

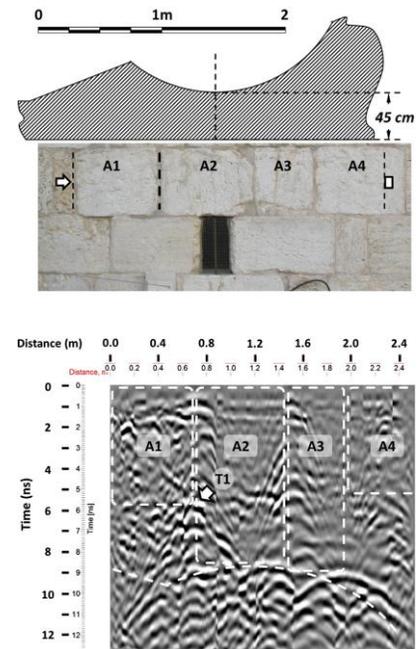
Este trabajo se centró en el uso del Radar de Penetración Terrestre (GPR) para evaluar la eficacia de las intervenciones de conservación y para evaluar el riesgo de grietas estructurales presentes en el campanario de la Iglesia del Santo Sepulcro.

Utilizaron un sistema Malá ProEx con antenas de 1,6 GHz y 2,3 GHz. El software para la adquisición de datos fue Groundvision 2, y para el procesamiento se utilizó el software RadExplorer v.1.41, ambos de Malá Geoscience.

Aplicaron el radar de penetración a la fachada Norte y Oeste de la torre del campanario de la iglesia del Santo Sepulcro en Jerusalén.

En la fachada Oeste, el autor estudió dos áreas en la parte baja de la torre. Una de las áreas se ubica en el extremo inferior de una grieta que fue descrita en trabajos realizados en 2001-2003, donde identificaron zonas en estas áreas que implican un riesgo, ya sea mecánica, la propagación de la grieta, y el incremento de la erosión. El autor propuso un escaneo más sistemático y un seguimiento a toda la fachada. En la imagen 3.5 se muestra el resultado de la exploración en una de las áreas de la fachada Oeste de la torre, que contiene un perfil obtenido con el GPR, una foto del área escaneada y un corte esquemático del muro.

En la fachada Norte, el estudio lo centró en el nivel superior de la torre, en tres áreas que fueron restauradas anteriormente. El objetivo del estudio en esta zona fue evaluar la eficacia de las intervenciones y evaluar el riesgo de fallas estructurales. En una zona conocían el espesor de la mampostería, 43,5 cm, y con esta información determinaron la velocidad de propagación de la piedra caliza  $v = 10,48 \text{ cm/ns}$ , de acuerdo con lo que señala el autor, ésta corresponde bien a la referencia bibliográfica.



**Imagen 3.5** En la imagen superior, corte esquemático de la mampostería a la altura del perfil. En la imagen en el medio, fotografía del área escaneada, indicación de la grieta marcada con una línea segmentada negra y gruesa, y el comienzo y final de la exploración con GPR. En la imagen inferior, el radargrama obtenido, donde se indican con línea segmentada blanca la sección transversal de la mampostería y la ubicación de la pared de la escalera interior. [Fuente: Labropoulos y Moropoulou, 2013].

Las observaciones con GPR indicaron que grietas estructurales, ubicadas sobre el arco superior de las ventanas, eran más amplias en el interior que lo que se observó en el exterior y el relleno aplicado en trabajos de reparación anteriores no tuvo éxito, y debido a la geometría y el estrés local, esta área implicaba un significativo fallo estructural y debía controlarse, como se muestra en la imagen 3.6.

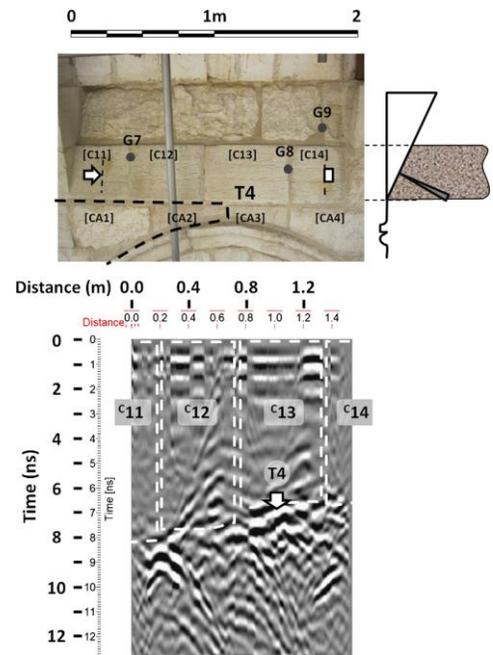
También se observaron en otras grietas, ubicadas en otra área sobre el arco de las ventanas, que no se rellenaron correctamente, y por lo tanto implicaba riesgo de fallo. En el área noroeste en la parte superior de la torre el autor lo evaluó como no crítico para la iniciación de grietas o propagación. A pesar de que observaron la presencia de posibles vacíos pequeños, la integridad estructural de la esquina noroeste superior del campanario parece ser satisfactorio.

[Labropoulos y Moropoulou, 2013] en su trabajo concluyó, que el estudio a la torre del campanario de la Iglesia del Santo Sepulcro demostró la capacidad del Radar de Penetración Terrestre para evaluar el estado de las grietas estructurales y para evaluar la eficiencia de las intervenciones de conservación.

### 3.3. Aplicaciones en Ingeniería Civil.

El Radar de Penetración Terrestre, es una herramienta tecnológica con un gran presente en aplicaciones en muchas áreas que necesitan un conocimiento preciso del sub-suelo o sub-superficie. Es un método seguro, eficaz, rápido, no destructiva y no invasivo. En ingeniería civil está teniendo diversas aplicaciones, como la caracterización de los materiales de construcción, evaluación de hormigones, análisis de estructura, diagnóstico de pavimentos, inspecciones de puente, entre otras.

[Maierhofer, 2003] en su trabajo mostró que el Radar de Penetración Terrestre se puede utilizar para la inspección regular, la búsqueda de la causa del daño y la evaluación de calidad de las estructuras de ingeniería civil.



**Imagen 3.6** En la imagen superior, se muestra la sección donde se traza el perfil, indica los puntos de inserción de mortero líquido en la intervención de conservación previa. En la imagen superior derecha, se muestra la sección transversal de la mampostería inclinada y el ángulo de la propagación de la señal del GPR. En la imagen inferior, el perfil obtenido de la exploración, se indica la sección de mampostería. [Labropoulos y Moropoulou, 2013].

Entre las posibles aplicaciones, puede ser utilizado para la inspección de carreteras, puente, detección de cavidades y además, se emplea ampliamente para controlar calidades del hormigón armados.

### ***Aplicaciones en Hormigón.***

El hormigón o concreto es un material compuesto, ampliamente utilizado en obras civiles, formado por un aglomerante (por lo general cemento portland), agregados áridos y pétreos, agua y algún aditivo específico. En obras civiles, se utiliza el hormigón reforzado con barras o mallas de acero, también llamadas armadura. Se utiliza en muros, losas, vigas, pilares, fundaciones, pavimentos, entre otros. Además, en el interior de las estructuras de hormigón se instalan conductos por donde pasan los diferentes servicios que se puedan requerir para el funcionamiento de la edificación.

Existen metodologías para evaluar la calidad, propiedades físicas y propiedades mecánicas del hormigón antes y durante la construcción de estructuras. En los últimos años se han estudiado y desarrollado métodos no destructivos para evaluar hormigones maduros, donde hoy en día está destacando el Radar de Penetración Terrestre, al ser un sistema versátil y de alta resolución, es útil para evaluar hormigones y estructuras de hormigón.

El GPR con antenas de 500 MHz a 2,5 GHz ha dado muy buenos resultados para la inspección de estructuras de hormigón [Maierhofer, 2003]. La imagen 3.7 muestra una campaña con un equipo GPR MALA X3M, con una antena de 800 MHz, a un muro de la piscina captación de agua de la planta hidroeléctrica Chivilingo, donde se aprecia la facilidad de aplicar el método, lo no destructivo y el bajo impacto.

Las aplicaciones del Radar de Penetración Terrestre en hormigón abarcan el estudio de grietas, estado del concreto, espesores, determinar el contenido de agua, caracterización física, entre otras. [Abraham y Dérobert, 2003] utilizó el GPR junto con el método de refracción sísmica, para estudiar con mayor detalle una zona dañada del túnel Mont-Blanc, donde utilizó un equipo de GSSI modelo SIR-10H.



**Imagen 3.7** aplicación GPR en muro de Planta Hidroeléctrica Chivilingo [Fuente: Elaboración Propia].

[Klisz *et al*, 2004] utilizó el análisis espectral de la onda superficial del Radar de Penetración Terrestre para evaluar las capas de hormigón, proporcionando resultados fiables del contenido de humedad.

[Shaari *et al*, 2004] realizó una modelización de una señal de GPR a través del concreto como filtro pasa baja, donde analizó el grado de atenuación y como se distorsionan los pulsos.

[Sbartai *et al*, 2006] estudió la capacidad de la onda directa del GPR en estructuras de hormigón para la caracterización física del hormigón, con el fin de estudiar la sensibilidad de la onda directa a la condición física del hormigón, donde concluye que el método de interpretación basado en la atenuación de la onda directa es capaz de detectar de manera rápida contrastes físicos en estructuras de hormigón-

[Klysz y Balayssac, 2007] utilizó el Radar de Penetración Terrestre para determinar la humedad de la cubierta del hormigón, donde demuestra que hay una relación lineal entre el volumen de agua y la velocidad de propagación de la onda directa, por un lado y la atenuación por otro. Utilizó un sistema GSSI SIR-2000 con dos antenas de 1,5 GHz acopladas.

[Sbartai *et al*, 2007] usa la onda directa del Radar de Penetración Terrestre para evaluar la condición física del concreto, que influye directamente en la corrosión de las barras de refuerzo en la estructura. Método validado mediante una comparación con el método de resistividad eléctrica. Los resultados de las pruebas mostraron que la onda directa de radar se ve afectada por las variaciones de humedad y contaminación de cloruros en el hormigón, por tanto, este método es útil para detectar las condiciones del concreto que puedan conducir a la corrosión de la armadura.

[Viriyametanont *et al*, 2008] presentó resultados experimentales sobre el efecto de las propiedades físicas del hormigón en el tiempo cero y la velocidad de propagación de las ondas radiadas: directa y reflejada por una antena de GPR. Los experimentos de laboratorio se llevaron a cabo en losas de hormigón armado, donde se involucraron porosidades, contenido de agua y profundidad de barras de acero de refuerzo, donde los resultados demostraron que la onda directa se propaga a misma velocidad que las ondas reflejadas. La implicación de este resultado es que la posición de tiempo de la onda directa no es constante y se ve afectada por la porosidad y el contenido de agua del hormigón, por ello el autor propone mejorar las condiciones de retardo mediante la aplicación de una corrección correspondiente a tiempo de viaje de la onda directa.

[Pérez *et al*, 2008a] realizó una evaluación con GPR de los daños en la base de hormigón armado de un block de viviendas en Valencia, España, donde las inundaciones son comunes, también tiene un gran número de grietas. Las mediciones las realizaron en dos temporadas diferentes para incluir un periodo donde se producen las inundaciones y otro sin inundaciones. El objetivo fue determinar si la

base se mantendrá impermeable en el futuro y analizar la profundidad de los daños observados en la superficie, los resultados proporcionaron un mapa detallado de los daños y las zonas que requieren un análisis más detallado, además detectaron la posible fuente que produce las inundaciones.

[Sbartai *et al*, 2009] utilizó el Radar de Penetración Terrestre y redes neuronales para evaluar la condición física del concreto, donde determinaron el contenido de agua y cloruros.

[Hugenschmidt y Kalogeropoulos, 2009] realizaron una inspección de muros de contención de caminos en zonas montañosas de Suiza;

[Zhang *et al*, 2010] aplicó el GPR para detectar el espesor de la lechada detrás de los segmentos de revestimiento de las líneas del metro en Shanghái, China, los objetos de detección fueron muro de hormigón, lechada y suelo, para determinar el espesor de la lechada. Los parámetros dieléctricos fueron obtenidos en laboratorio y los contrastes entre los tres materiales fueron suficientemente grandes, para ello utilizaron antenas de 250 MHz, 500 MHz y 1 GHz.

[Yehia *et al*, 2014] midieron la capacidad de detección del radar de penetración de los defectos del hormigón, donde realizaron una investigación experimental para evaluar las variaciones de la mezcla, los cambios de temperatura y la madurez. Prepararon dieciséis muestras y ocho de ellos con defectos simulados. Los parámetros considerados en la evaluación fueron tipo de hormigón, defecto y ubicación. La mayoría de los defectos fueron detectados por el radar en diferentes condiciones ambientales, en todas las mezclas los defectos fueron detectables a principio y finales de la edad de madurez, sin embargo, en mezcla de hormigón ligero, los defectos no son detectable tres meses después.

En estructuras, como se mencionó en un comienzo, se utilizó el hormigón reforzado y en su interior, además, existen conductos de los distintos servicios. El Radar de Penetración Terrestre también tiene algunas aplicaciones identificando estos elementos en el interior del concreto y determinando su ubicación.

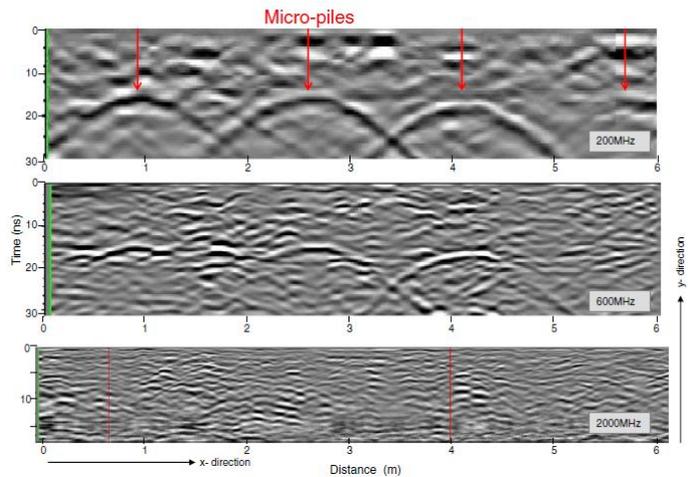
[Barrilea y Pucinottib, 2005] aplicó el Radar de Penetración Terrestre en estructura de hormigón armado, donde el objetivo fue presentar una metodología de funcionamiento y los resultados en el mapeo de los servicios públicos, la determinación de la morfología interna y la ubicación del acero de refuerzo. Concluyeron que el sistema es capaz de proporcionar una buena planimetría de los servicios públicos y la ubicación de los aceros de refuerzo.

[Shaw *et al*, 2005] utilizó el Radar de Penetración Terrestre para la ubicación del acero de refuerzo en el concreto y utilizó una red neuronal para automatizar y facilitar el procesamiento posterior de los datos del radar, concluyendo que los resultados del estudio podría ser muy eficaz, así también

señaló, que para una mejor precisión de la profundidad del acero de refuerzo se requiere un conocimiento fiable de las propiedades dieléctricas del hormigón.

[Gasitua, 2006] realizó un estudio con GPR como método de prospección no destructivo en estructuras de hormigón, permitiendo detectar armadura de acero así como tuberías u otros elementos.

[Orlando, 2012] aplicó el Radar de Penetración Terrestre para detectar barras de acero y micro-pilotes con un diámetro de 0,02 m y 0,13 m respectivamente en una antigua muralla que es un conjunto de piedras que varían en tamaño desde 1 cm a 50 cm, mortero y aire. Los datos fueron recogidos con antenas de 200 MHz, 600 MHz y 2000 MHz, los resultados del modelo indicaron que la resolución más baja puede resultar en una mejor compresión de la estructura como se ve en la imagen 3.8, en que los perfiles de alta



**Imagen 3.8** Perfil adquirido con antena de 200 MHz, 600 MHz y 2000 MHz, donde se aprecia la resolución de micro-pilotes. [Fuente: Orlando, 2012].

resolución mostraron anomalías causados por heterogeneidades en el material huésped, dificultando la interpretación. El autor señaló que la selección de la frecuencia y el ancho de banda óptimo dependen de la dimensión del objetivo.

[Srinivasan *et al*, 2012] realizó una evaluación de estructura de hormigón con el GPR, donde se centró en la detección de los refuerzos y los conductos que están en el interior del hormigón en muestras simuladas, donde señaló que el radar fue eficaz en la determinación de la profundidad exacta de refuerzos y conductos.

Con respecto al acero de refuerzo, existen estudios donde utilizan el Radar de Penetración Terrestre para medir el diámetro del acero de refuerzo en el hormigón armado, tal como lo hizo [Zhan y Xie, 2009] con el GPR para realizar mediciones del diámetro de las barras de acero de refuerzo en probetas de hormigón, utilizando la transformada de Wavelet estacionaria como filtro, donde señaló que es un método eficaz para este propósito.

Así también [Way *et al*, 2009] utilizó imágenes digitales de GPR, para medir el radio de las barras de acero de refuerzo, esto se consigue sometiendo a los Radargramas a una serie de etapas de procesamiento de imágenes. La distancia entre la reflectividad variante y el radio de la dimensión larga

de una huella de energía puede considerarse al calcular el radio de la barra de armadura, los resultados indicaron que, este modelo es capaz de estimar el radio de la barra de acero de refuerzo dentro de 7%.

Por otra parte [Zanzi y Orosi, 2013] estudió la precisión en la medidas de diámetro de barras de refuerzo de las armaduras de hormigón a partir de datos GPR, en la prueba que realizó en laboratorio donde observó que muchos problemas deben ser resueltos para obtener mediciones confiables y estables a partir de datos reales, para esto optimizaron una secuencia de procedimientos para obtener el mejor ajuste entre los resultados y las expectativas teóricas, donde propuso una selección óptima de la frecuencia de la antena en comparación con el diámetro de las barras de refuerzo para preservar la sensibilidad más alta y el uso de antenas de doble polarización. Además señaló que con antenas en un rango de frecuencia de 600 MHz a 2 GHz es suficiente para tener una buena sensibilidad para cualquier diámetro de barra hasta 40 mm aproximadamente.

Concluyó que los resultados obtenidos en el laboratorio son alentadores y señaló que el siguiente paso consiste en aplicar la metodología ampliamente a situaciones reales con diferentes limitaciones, diseño de refuerzo diferente, diferente calidad del hormigón y para validar la precisión de los resultados con pruebas destructivas locales.

Así también existen trabajos que proponen métodos para medir el adelgazamiento del acero de refuerzo del hormigón armado producto de la corrosión con el GPR. La corrosión es generalmente causada por exposición a la humedad y cloruro iónico.

En el trabajo realizado por [Kalogeropoulos *et al*, 2013] proporcionó metodologías para el calculo de los parámetros electromagnético a partir de datos GPR que representan el contenido de cloruro y su distribución en el hormigón armado.

La corrosión de las armaduras es problemático, ya que reduce la capacidad de carga de la estructura, además los productos de oxidación ocupan un volumen mayor que el acero original, lo que puede producir tenciones internas expansivas y una consecuencia a largo plazo puede ser una falla estructural.

El autor [Eisenmann *et al*, 2013] en su trabajo investigó el uso el Radar de Penetración Terrestre para detectar el adelgazamiento inducido por la corrosión de las barras de refuerzo en estructuras de puente de hormigón. Postularon que la respuesta retrodispersada desde una barra de refuerzo adelgazada será menor que la respuesta de una barra de refuerzo intacta, donde utilizó un sistema GPR con una antena de 1600 MHz con la que demostraron, para la muestra de laboratorio, un adelgazamiento de un 50% en el diámetro de barra de refuerzo en una longitud corta, en una inspección posterior en un puente de carretera identificaron varias barras de refuerzo con amplitudes

inesperadamente bajas, señaló el posible adelgazamiento, además indicó que se debe ser capaz de cuantificar y evaluar los factores que pueden contribuir a las variaciones de amplitud de la señal, como el adelgazamiento y así también las propiedades del hormigón, la orientación de antena, entre otras.

Por otra lado [Hong *et al*, 2014] realizó un trabajo experimental para desarrollar una técnica de control de la corrosión en el acero de refuerzo del hormigón armado basado en el Radar de Penetración Terrestre. El experimento consistió en vigilar periódicamente el proceso de corrosión acelerado con GPR, los datos fueron procesados para investigar las tendencias de cambio de la señal relacionados con la corrosión, la humedad y la contaminación de cloruros, también propuso métodos de procesamiento de datos para visualizar la corrosión de las armaduras y la distribución de cloruros, emplearon espectroscopia, media-celda potencial e inducción laser para verificar las observaciones del GPR.

También, aplicando el radar en hormigón armado, se puede determinar la geometría y la disposición del acero de refuerzo, en el caso de que no exista o no se disponga de la documentación de la estructura como lo mostró en su trabajo [Beben *et al*, 2013] quien utilizó el Radar de Penetración Terrestre en vigas de hormigón armado, para determinar los parámetros del concreto reforzado de un viaducto, donde el propósito principal fue determinar los parámetros geométricos de las vigas y la disposición de las barras de refuerzo dentro de ellas, determinar distancia entre barra, posición y profundidad, ya que no existe documentación del refuerzo adoptado para la subestructura.

### ***Aplicaciones en Puentes.***

En los últimos años el uso del Radar de Penetración Terrestre ha dado muy buenos resultados para la inspección de estructuras de hormigón y la posibilidad de realizar mediciones no destructivas de forma rápida. Como señaló [Tarussov *et al*, 2013] a través de pruebas no destructivas y estudios en laboratorio son comúnmente utilizados por los consultores de ingeniería para llevar a cabo evaluaciones de puentes, entre los métodos de ensayo no destructivos típicos, se encuentra el Radar de Penetración Terrestre, que es uno de los más adecuados para realizar esta tarea.

Los sistemas de Radar de Penetración Terrestre son herramientas eficientes para la obtención de información bajo la superficie. [Hugenschmidt y Mastrangelo, 2006] pusieron a prueba la precisión del GPR, al aplicarlo en puentes antes de su demolición, posterior a esto, verificó los datos obtenidos con partes de los puentes, por lo tanto, la precisión y la fiabilidad de las mediciones de radar se cuantificó en circunstancias realistas, las diferencias medidas entre el resultado del radar y la realidad fue: recubrimiento de hormigón de la capa superior 10 mm, espesor de pavimento 9 mm, la posición de los ductos de los tensores se ubicaron con un error menor a 50 mm.

Un conocimiento detallado de la situación actual de los puentes es esencial para la planificación de mantenimiento y rehabilitación. En el trabajo de [Hugenschmidt, 2002] inspeccionó puentes de hormigón en Suiza, con un equipo GPR, donde el énfasis fue determinar los espesores de los pavimentos y profundidad de las barras de refuerzo.

[Cruz *et al*, 2010] aplicó el GPR para verificar el diseño y la detección de defectos en puentes de hormigón, el objetivo principal de la investigación fue mostrar la gran necesidad y la utilidad de estas técnicas, que pueden proporcionar la información no visible sobre la geometría estructural y la integridad necesaria para fines de rehabilitación y fortalecimiento.

[Alani *et al*, 2013] aplicó el Radar de Penetración Terrestre a dos puentes en el reino unido: el primero fue el puente Forth Road, donde el objetivo principal fue identificar posibles defectos estructurales que incluyeron barras de refuerzo dañado y la entrada de humedad en lugares específicos de la cubierta; el segundo caso fue la evaluación al puente Pentagon Road donde el objetivo fue identificar posibles grietas en el interior de la estructura de la cubierta y establecer la distribución y posición de las barras de refuerzo de todo el puente.

Este estudio presentó interesantes resultados en cuanto a la ubicación de las barras de refuerzo y una estimación precisa de la condición de la capa de hormigón, el autor señaló que los resultados obtenidos se benefician de las técnicas de procesamiento y presentación avanzada.

[Hasan y yazdani, 2014] tras la sospecha de errores de construcción en un puente en la cercanía de Roanoke, Texas, EEUU, supuso que la cubierta de concreto no se ajustaba a los planos y a las especificaciones técnicas, para verificar una evaluación a escala completa de la cubierta de hormigón utilizando un equipo GPR. Los resultados indicaron que el 48% de la superficie de la cubierta del puente no se ajusta al mínimo de la AASHTO, al ser un hormigón recién colocado y al tener un gran contenido de agua no pudieron visualizar el fierro de refuerzo.

Este estudio demostró la utilidad del GPR, por la rapidez y la comodidad para adquirir los datos y finalmente el post-procesado presentó los datos de fácil comprensión.

[Alani *et al*, 2014] aplicó varias técnicas no destructivas, donde incluyó el Radar de Penetración Terrestre en el puente Pentagon Road en Inglaterra, con el fin de identificar las partes con mayor deterioro.

También se han realizado trabajos en laboratorio como el que hizo [Yehia *et al*, 2007] quien realizó un estudio experimental de los métodos no destructivos utilizados en la evaluación de tableros de puentes, donde introdujo el Radar de Penetración Terrestre. Los resultados del estudio mostraron la

capacidad de los métodos para detectar los defectos con diferentes precisiones, además la capacidad de los métodos los verificaron e hicieron comparaciones entre ellos.

Así también [Udaya *et al*, 2007] investigó el uso del Radar de Penetración Terrestre para la detección de defectos bajo la superficie en tableros de puentes de polímero de fibra reforzada, en un estudio experimental, para ello utilizó antenas de 1,5 GHz y 2 GHz, y los resultados de ambas antenas fueron comparadas, dado que ambas tenían problema en la detección de defectos llenos de aire, pero podían detectar los defectos llenos de agua.

En tanto, [Dérobert *et al*, 2008] realizó pruebas experimentales utilizando el GPR y técnicas capacitivas para evaluar el contenido de agua de las losas de puente, y comparó los dos métodos con éxito durante una campaña experimental en varias losas de prueba.

En los últimos años, junto con las aplicaciones y estudios del Radar de Penetración Terrestre, los investigadores también están desarrollando nuevos métodos para automatizar, mejorar y facilitar la interpretación de los datos obtenidos con el GPR en la evaluación de estructuras de puente.

[Belli y Wadia-Fascetti, 2008] desarrollan un método integrado y lo utilizaron como herramienta en el modelado directo para generar las reflexiones realistas del GPR de una cubierta de puente de hormigón armado con defectos.

En el trabajo de [Wang *et al*, 2011] propuso un nuevo método utilizando ecuaciones diferenciales parciales para detectar barras de refuerzo de puentes de hormigón a partir de datos GPR, para localizar la delimitación en tableo del puente, el algoritmo propuesto lo probaron en imágenes sintéticas y reales de GPR. Los resultados experimentales demostraron precisión y fiabilidad, incluso para contraste de la imagen disminuida y baja relación señal-ruido. Por lo tanto, un mapa exacto del deterioro de la cubierta del puente se puede generar de forma automática.

Por otra parte [Benedetto *et al*, 2012b] presentó un novedoso sistema de GPR llamado RIS Hi Bright, desarrollado para aplicaciones en puente, además propuso un nuevo algoritmo para el seguimiento de las grietas, la eficacia y la precisión del procedimiento lo han calibrado y validado en cuatro puentes diferentes.

Además [Benedetto, 2013] propuso un enfoque novedoso para el seguimiento numérico de tres dimensiones y mapeo de grietas de puente de datos adquiridos con GPR. Las grietas a menudo están asociadas a los valores más altos de la constante dieléctrica que producen un aumento no insignificante de la amplitud de la señal; el algoritmo desarrollado analiza la señal comparando el valor de la amplitud en todo el dominio de la exploración de radar.

Así también [Tarussov *et al*, 2013] en su trabajo describió algunas limitaciones del análisis numérico de los perfiles GPR e introdujo un método alternativo desarrollado por los autores y la interpretación visual asistida por ordenador de los datos GPR. Realizó varias investigaciones de campo reales donde utilizaron el método desarrollado para validar y mejorar el nuevo enfoque del análisis, los resultados obtenidos a partir de las aplicaciones de campo sugiere que el uso de la metodología es eficaz y fiable que puede ser utilizada por los analistas experimentados de GPR.

Los ingenieros de puentes cada vez prefieren más utilizar la técnica del Radar de Penetración Terrestre ya que pueden obtener información detallada del estado actual del puente, los datos pueden ser adquiridos rápidamente e incluso durante el tráfico, causando muy baja interferencia en su funcionamiento. Dado esta necesidad, los investigadores se encuentran desarrollando nuevos métodos y técnicas para facilitar y automatizar el uso del GPR en evaluaciones de puentes.

### ***Aplicaciones en Pavimentos.***

En las últimas décadas, las inspecciones de carretera se han basado cada vez más en el uso de instrumentos no destructivos para la evaluación de las condiciones del camino. El Radar de Penetración Terrestre se ha utilizado en carreteras para medir el espesor de la capa, para detectar defectos bajo la superficie y evaluar calidades. Por lo que señala [Saarenketo y Scullion, 2000] el GPR es una técnica a desarrollar que tiene una gran potencial para ayudar en los diseños del pavimento y en la determinación de las estrategias óptimas de reparación de pavimentos deteriorados.

El Radar de Penetración Terrestre es una herramienta útil para realizar evaluaciones de pavimentos y sus componentes, como muestra los trabajos realizados por [Moropoulou *et al*, 2002] quien aplicó el GPR y termografía infrarroja para examinar el pavimento de asfalto situado en el aeropuerto internacional de Atenas, Grecia, con el fin de obtener una evaluación rápida del estado del pavimento aeroportuario.

[Kassem *et al*, 2008] utilizó el Radar de Penetración Terrestre junto con rayos-x y tomografía computacional, para evaluar un pavimento asfáltico.

[Evans *et al*, 2006] en su trabajo mostró como una recopilación detallada y extensa de datos GPR se puede utilizar para dirigir las investigaciones invasivas para optimizar el análisis de las estructuras de pavimento urbano.

[Plati y Loizos, 2012] se preocupó de documentar cómo la técnica GPR podría incorporarse con éxito en el proceso de evaluación de las necesidades estructurales de pavimentos asfálticos, desarrollando un marco, que se asocia principalmente con el uso eficiente del sistema para la inspección

de pavimento; y en segundo lugar el suministro de herramientas computacionales para ejecutar procesos complejos para definir las necesidades estructurales de los pavimentos.

La eficacia del marco que sugieren se demuestra en un estudio de caso para estimar el espesor de recubrimiento requerido en una carretera. Concluyó que el marco propuesto puede ser utilizado como una herramienta complementaria para el monitoreo y evaluación del pavimento.

La extracción de testigos es el método más común para medir el espesor de las capas en la construcción de pavimentos. Aunque este método proporciona una medición de espesores muy exacta, es destructiva, lleva mucho tiempo, y no proporciona una representación adecuada de la variabilidad del espesor en la totalidad del camino. La aplicación del Radar de Penetración Terrestre, es bastante beneficioso para este propósito, por su versatilidad y además es capaz de proporcionar mayor información, ya que se puede recorrer una gran distancia, sin mucha intervención en el funcionamiento de un camino, y se obtienen perfiles continuos del pavimento.

[Fauchard *et al*, 2003] con un equipo GPR GSSI, midió el espesor de la capa de asfalto de una pista de prueba de fatiga de pavimento, en las instalaciones de Laboratoire Central Ponts et Chaussées.

[Loizos y Plati, 2007] realizó una investigación que se centra en la estimación de espesores de las capas de asfalto de un pavimento utilizando GPR, mediante el empleo de diferentes enfoques basados en la estimación de la permitividad de los materiales.

[Huang y Kang, 2010] realizaron un estudio no destructivo a un pavimento de asfalto, donde incluyeron el GPR, para evaluar el espesor de la capa de pavimento. Concluyeron que el GPR puede ser utilizado para estimar espesores.

[Al-Qadi, y Lahouar, 2005] presentó una visión general de la aplicación de Radar de Penetración Terrestre para la estimación del espesor del pavimento. Utilizó datos de campo para evaluar el desempeño del radar en la estimación de espesores de las capas de diferentes casos, donde demostró que cuando el pavimento se compone de capas densas los resultados son aceptables y cuando al menos tiene una capa delgada la exactitud del espesor se degrada considerablemente. En este último caso, se deben aplicar técnicas de procesamiento de señal para mejorar la calidad del perfil antes de la interpretación.

Así también [Lahouar y Al-Qadi, 2008] desarrollaron un método para la detección automática de las capas de pavimento con datos GPR. Cuando éstas son finas con respecto a la anchura del pulso de sondeo, se produce el solapamiento entre los impulsos reflejados, lo que solucionan mediante la detección iterativa de las reflexiones fuertes presentes dentro de la señal del GPR utilizando un umbral o un detector de filtro adaptado. Esta técnica se aplicó con éxito en los datos recogidos en un sitio experimental de pavimento en el Road Smart Virginia.

Por otra parte, en el trabajo de [Morcoux y Erdogmus, 2010] realizó una investigación con el objetivo de analizar la exactitud y costo-efectividad del uso del Radar de Penetración Terrestre en la medición del espesor de pavimento de hormigón para garantizar calidad. Para esto utilizaron una antena de suelo de 1,6 GHz, para experimentos de laboratorio y de campo.

Los resultados de este estudio indicaron que para el uso de objetos de metal bajo la capa de hormigón era necesario una medición de espesor fiables, además, tomaron muestras para determinar las propiedades dieléctricas del hormigón. Lograron una exactitud de un 98,5%. Concluyeron que el GPR es una herramienta eficiente para medir espesores de hormigón, las refracciones en la interfaz entre el hormigón y la base son poco claras debido a la similitud de las permitividad, al contrario con una placa metálica en la interface, la permitividad del hormigón dependen de su edad, así también, los datos GPR se pueden utilizar para obtener información significativa adicional sobre otras propiedades del pavimento de hormigón como la resistencia, el contenido de aire, la segregación, entre otras.

Así también, se han desarrollado sistemas GPR para automatizar y optimizar las mediciones de espesores, como el sistema de Radar de Penetración Terrestre presentado por [Liu y Sato, 2014] que utilizó un array de antenas para la medición in situ del espesor y la permitividad dieléctrica de una capa de pavimento de asfalto.

El array de antena lo calibraron considerando el centro de fase de ésta y el desplazamiento de la antena. Los resultados de las mediciones de laboratorio demuestran que el método de calibración mejora la precisión de la estimación de la velocidad y de espesor en comparación con los métodos convencionales. En una medición de campo llevada a cabo en un pavimento de carretera el error de la estimación del espesor es de menos de 6 mm alrededor de 10%.

Dentro de las aplicaciones del GPR, se ha investigado su uso para determinar el contenido de humedad del pavimento. En el trabajo realizado por [Al-Qadi *et al*, 2004] aplicó un sistema GPR con una antena de bocina de 1 GHz, para cuantificar los beneficios de una membrana geocompuesta utilizada para actuar como una barrera contra la humedad en pavimentos flexibles y para medir cuantitativamente el contenido de humedad de los materiales granulares, donde los resultados arrojaron que se redujo en un 30% la infiltración de agua de acuerdo a los datos GPR.

[Grote *et al*, 2005] utilizó el Radar de Penetración Terrestre para controlar el contenido volumétrico de agua en las capas de sub-agregado de asfalto durante un experimento de infiltración extendida, donde los datos obtenidos revelaron variaciones significativas en el contenido de agua de las capas de agregados en las direcciones horizontal y vertical.

En la investigación de [Plati y Loizos, 2013] analizaron la estimación in-situ de la densidad y el contenido de humedad dentro de la capa de pavimento asfáltico de mezcla en caliente, de manera no destructiva usando el Radar de Penetración Terrestre y utilizaron una antena que funciona alternativamente a 1 GHz o a 2 GHz.

Esta investigación puso de manifiesto que el aumento de la profundidad de penetración de la antena de 1 GHz proporciona un aumento de la identificación de áreas potenciales de humedad y sugieren que las variaciones de la permitividad para las dos frecuencia se podrían utilizar para evaluar la homogeneidad de la densidad del material con la profundidad del material como un indicador de la compactación de la mezcla.

En pavimentos de hormigón, de igual manera que las estructuras, el GPR se utilizó para ubicar los refuerzos de acero, como se puede ver en el trabajo de [Al-Qadi y Elseifi, 2006] quien usó el Radar de Penetración Terrestre para determinar la ubicación de las barras de refuerzo en un pavimento de hormigón, con el fin de desarrollar un modelado del agrietamiento en pavimento de hormigón. También en el trabajo de [Stryk *et al*, 2013] describió un método para proporcionar mediciones rápidas, eficaces y suficientemente precisas de los pasadores de unión y posiciones de las barras en pavimentos de hormigón, utilizando una planta de dos canales de Radar de Penetración Terrestre.

El sistema GPR se aplica para diagnosticar deterioro en pavimentos, complementando la inspección visual que usualmente se utiliza para identificar zonas agrietadas, deterioradas, afectada por asentamiento, entre otros daños.

Como se puede ver en los trabajos realizados por [Chen y Wimsatt, 2009] con una antena de 400 MHz, caracteriza las condiciones subsuperficiales de tres pavimentos viales, donde las anomalías era visibles en las imágenes GPR, concluyendo que se puede utilizar la información del GPR para emprender acciones correctivas sobre pavimentos.

[Benedetto y Pensa, 2009] utilizó el GPR para el diagnóstico indirecto de los daños estructurales de pavimento, donde el método es eficaz en el diagnóstico de la presencia de arcilla o suelos cohesivos que comprometen la capacidad de soporte de la sub-base e induce daños.

[Chen *et al*, 2009] realizó una investigación utilizando métodos no destructivo y extracción de testigos, donde incluyó el Radar de Penetración Terrestre, para identificar las causas de los continuos problemas de bombeo y asentamiento, con el fin de desarrollar una estrategia óptima de reparación, para una sección de pavimento de hormigón articulado, en el distrito de París, Texas, el cual experimenta un severo problema de bombeo y asentamiento.

[Sudyka y Krysiński, 2011] analizó la calidad de unión de pavimentos de asfalto con el GPR, la medición de laboratorio la realizó con una antena de bocina de 2 GHz, para recoger los perfiles de muestras sintéticas que representan modelos idealizados de la delaminación horizontal. Con la misma antena realizaron las mediciones de campo y extrajeron testigos en lugares donde obtuvieron fuertes reflexiones dobles. Al estudiar los testigos comprendieron el porqué de las fuertes reflexiones, donde concluyeron que no necesariamente fue efecto de las grietas horizontales, también eran asociada al deterioro producto de la intemperie.

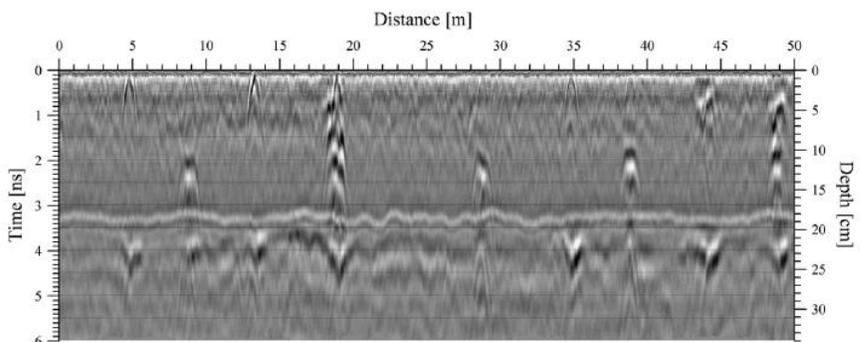
[Colagrande *et al*, 2012] utilizó el GPR para estudiar pavimentos de carreteras degradados donde utilizaron antenas de 600 MHz y 1600 MHz para recolectar perfiles en 40 sitios de pavimentos de carretera dañadas y sin daños, donde concluyó que la causa probable de degradación es la fatiga o la contracción térmica, si no lo son, la degradación es debido a la diferencia de compactación del suelo causada por la carga vehicular.

[Diamanti y Redman, 2012] en su trabajo muestra el potencial del GPR para detectar y caracterizar grietas verticales en pavimentos, donde recomiendan un enfoque multi-frecuencial de encuesta: de alta frecuencia para la caracterización de grietas y de frecuencia más baja para la detección.

[Tosti y Benedetto, 2012] en su trabajo propuso un método de inspección basado en técnicas de Radar de Penetración Terrestre para predecir el bombeo y reducir el riesgo de seguridad, desarrollaron diseños experimentales para medir el contenido de arcilla en suelos compactados, analizaron el material típico de caminos utilizando dos sistemas GPR diferentes. Las señales las analizaron tanto en dominio de tiempo y frecuencia, y la fiabilidad de los resultados los validaron con electromagnética y la teoría de dispersión de Rayleigh mostrando correlaciones prometedoras.

[Kyrskiński y Sudyka, 2013] describió los resultados de una investigación sobre las capacidades del GPR en el diagnóstico de grietas en el pavimento, para lo cual realizaron pruebas en laboratorio en prototipos que simulan grietas

idealizadas, posterior a esto, realizaron observaciones visuales y escaneo con GPR de tres caminos de construcción semirrígidos sometidos a tráfico pesado y a un camino de construcción rígido. Como resultado clasificaron varios



**Imagen 3.9** Radargrama longitudinal de un pavimento con grietas y juntas de dilatación. [ Fuente: Kyrskiński y Sudyka, 2013]

tipos de respuestas GPR vinculados a posibles categorías de estructuras de grietas, o carácter borroso de la zona dañada, o a los efectos relacionados con el grano grueso en la mezcla asfáltica.

De acuerdo a la investigación en el Radargrama de la figura 3.8 se puede ver en  $x= 9, 19, 29$  y  $49$  m la junta de dilatación, en  $x= 5, 13, 35$  y  $44$  m grietas.

[Aguilera, 2013] realizó una aproximación del Radar de Penetración Terrestre como ensayo para estimar el estado estructural de un pavimento bituminoso, donde pretende establecer una relación entre las deflexiones y los tiempos de reflexión y/o las velocidades de propagación, estableciendo, un modelo válido que permita utilizar el georadar para la medición de estado y el deterioro de un pavimento bituminoso causado por la fatiga.

[Solla *et al*, 2014] en su trabajo trató la aplicación combinada del Radar de Penetración Terrestre y termografía infrarroja para la detección y caracterización de las grietas en el pavimento. Los resultados del estudio muestran la idoneidad de la combinación de ambas técnicas en la inspección y caracterización de grietas en el asfalto, dado que los dos juntos permiten la estimación de la profundidad de la grieta, la detección de presencia de material de relleno y la severidad de la fisura.

[Pinel *et al*, 2011] realizó un estudio teórico de la influencia de la rugosidad del pavimento sobre el Radar de Penetración Terrestre, donde utilizó un método de propagación electromagnética llamado *propagation-inside-layer-expansion* (PILE), para simular la señal retrodispersada del GPR en el pavimento. Finalmente el modelo fue utilizado para evaluar el rendimiento de la estimación de parámetros de la señal a través de la técnica de invarianza rotacional, a través del cual concluyó que las variaciones espaciales de las amplitudes de los ecos son significativas.

[Krysiński y Sudyka, 2012] en su trabajo se dedicó a la descripción del tipo de reflexiones dobles y dio una introducción a la fenomenología de reflexiones alargadas en Radar de Penetración Terrestre en el diagnóstico de pavimentos bituminosos. Reflexiones alargadas es un nombre provisional de los efectos relacionados con la retrodispersión del impulso GPR en el límite de la interfaz, que tiene la estratificación continua de velocidad vertical. En este trabajo se debatieron numerosos ejemplos que muestran cómo el método permite comentar las propiedades de las reflexiones en el diagnóstico de pavimentos.

Con el propósito de obtener una interpretación más precisa de los registros del Radar de Penetración Terrestre en mezclas bituminosas en pavimento de carreteras [Pedret y Pérez, 2012] propuso algunas posibles correcciones, analizó el efecto del contenido de huecos en la composición en las mezclas bituminosas en la velocidad de propagación de ondas electromagnética. Para ello analizaron firmes que presentan diversos estados de conservación, en que los resultados permitieron asociar los

índices de huecos más elevados con velocidades de propagación superiores a las esperadas en materiales del medio.

También [Chen *et al*, 2014] presentó una técnica rápida y de ensayos no destructivos con Radar de Penetración Terrestre para caracterizar los vacíos de aire de la mezcla caliente de asfalto. Para establecer la relación entre los huecos de aire y la permitividad del medio medida por el GPR, utilizaron 92 testigos de tres proyectos. Para ello desarrollaron un modelo estadístico para expresar el valor del vacío de aire como una función de la permitividad. Los resultados se han utilizado como base para la selección de estrategias de reparación.

[Leng y Al-Qadi, 2014] desarrollaron un método innovador para mejorar la precisión del método tradicional para la estimación de la permitividad del pavimento, utilizando dos antenas de aire y el método extendida punto medio común. Desarrollaron las ecuaciones y algoritmo para el cálculo de la permitividad del materia del pavimento, y luego fue validado la precisión de este nuevo método con los datos obtenidos en un sitio de pruebas.

En un estudio de simulación, [Shangguan *et al*, 2014] desarrollaron un algoritmo para el reconocimiento de patrones con el fin de extraer la información de densidad de pavimentos asfálticos de señales del Radar de Penetración Terrestre simuladas, como parte de los esfuerzos de investigación en la aplicación del GPR para monitorear la densidad de pavimento de asfalto durante la compactación, la exactitud del sistema fue probado en conjunto de datos de prueba, mostrando la eficacia del método para predecir la densidad del asfalto.

Conocer el estado de los pavimentos es muy importante para los ingenieros civiles dedicados al diseño de éstos, ya que son de vital importancia para definir el estado actual de los pavimentos y sus componentes, y con esto, además, establecer los futuros trabajos de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos. Situación en que el Radar de Penetración Terrestre está tomando un rol fundamental, al aplicarlo para realizar evaluaciones de estos. Además, las mediciones pueden ser adquiridas rápidamente y durante el tráfico.

### ***Aplicaciones en Geotecnia***

La geotecnia es el estudio de las propiedades de los materiales provenientes de la tierra.

El Radar de Penetración Terrestre se aplica en esta área para evaluar la calidad del suelo, [Orlando, 2003] estudió una metodología a partir de los datos de georadar, que obtuvo con una antena de 200 MHz, que permitió una evaluación semicuantitativa de la calidad de la roca masiva; en una presa de la región de Basilicata en el sur de Italia.

[Loperte *et al*, 2011] utilizó el GPR para la vigilancia y diagnóstico de ésta, con el objetivo de detectar y localizar los bancos de piedra arenisca subterránea, donde concluyó que este método permite investigar grandes áreas con una buena resolución espacial dando la posibilidad de detectar la presencia de inhomogeneidades en el subsuelo debajo de la presa.

[Shaaban *et al*, 2013] caracterizó las variaciones en las propiedades del suelo en todo el centro comercial en la ciudad Estrella, en el este de El Cairo, donde en los últimos años un gran edificio se ha inclinado. Utilizaron una investigación geofísica integrada, que incluyó el Radar de Penetración Terrestre.

Los datos GPR mostraron una capa de suelo de relleno superponiendo una capa inferior gruesa de alto contenido de humedad en el Palacio de Habib Sakakini, El Cairo, Egipto.

[Hemeda, 2012] utilizó el GPR con antenas de 100 MHz y 500 MHz, para monitorear las condiciones del subsuelo, donde obtuvieron 800 m. de perfiles, 600 m. alrededor del palacio y 200 m. en el sótano, con el objetivo de monitorear las condiciones del subsuelo bajo y alrededor del palacio, para identificar las posibles discontinuidades geológicas, la presencia de fallas y cavidades.

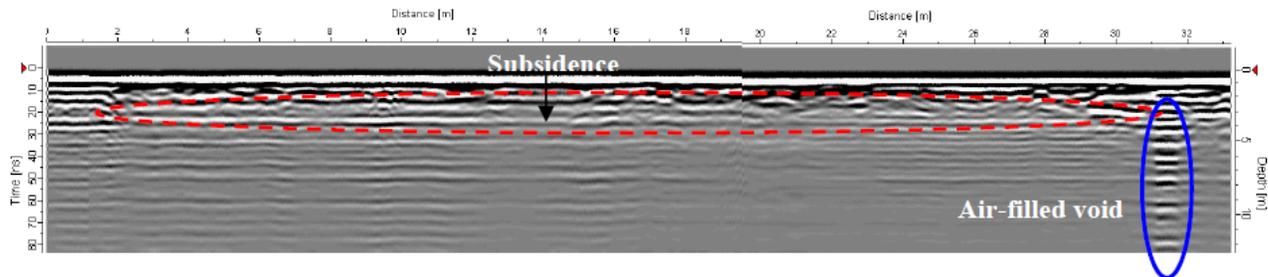
Mientras que [Beben *et al*, 2013] utilizaron el Radar de Penetración Terrestre para el diagnóstico de un muro de contención construido en 1912 y del cual no existen registros de su geometría, diseño y estudios geotécnicos del subsuelo. Dado la necesidad y al no poder aplicar análisis geotécnico tradicionales, utilizaron el Radar de Penetración Terrestre con el apoyo de afloramientos y minas a cielo abierto cercanas al muro para la calibración del equipo, con lo cual, obtuvieron datos importantes para el diseño del muro de contención.

En esta misma línea, el Radar de Penetración Terrestre se aplicó para la detección de cavidades en el subsuelo de la zonas karsticas para prevenir riesgos geotécnicos. [Gosar, 2012] en su estudio puso a prueba una antena de 50 MHz diseñada en forma de tubo para detectar la galería desconocidas un la cueva de Divača en Eslovenia, a una profundidad entre 12 m y 60 m de formación de piedra caliza krastificada.

[Gómez y Martín, 2012] utilizó el GPR con antenas de 200 MHz y 400 MHz, junto con tomografía de resistividad eléctrica para determinar la existencia y las características de las cavidades y galerías, así como para evaluar el riesgo de hundimiento del afloramiento de rocas de carbonato que se ven afectadas por procesos de karstificación en la sima de Madrona en la provincia de Segovia, España.

Los resultados mostraron que los riesgos asociados son evidentes debido a las cavidades, lo que afecta diversas estructuras antrópicas: una carretera y campos de cultivos.

[Ismail y Saad, 2012] con un equipo GPR MALA con una antena blindada de 250 MHz, realizó un estudio para identificar vacíos bajo la superficie e identificar las zonas de hundimiento del suelo. Con los perfiles obtenidos detectaron con éxito áreas de subsidencia, como el de la figura 3.10, que se aprecia una zona de subsidencia entre  $x=2$  y  $x=30$  y un vacío lleno de aire entre  $x=31$  y  $x=32$ .



**Imagen 3.10** Perfil obtenido con antena de 250 MHz, donde se ve una zona de subsidencia y un vacío lleno de aire. [Fuente: Ismail y Saad, 2012].

[Benedetto *et al*, 2012a] en su trabajo, propuso el uso del GPR para la inspección geotécnica de pavimento y subcapa de pavimento. Calibró un protocolo de tres pasos. El primero, se localiza la inestabilidad con una inspección en la velocidad del tráfico utilizando una antena de bocina de 1 GHz, en que los datos se procesan por procedimientos automáticos. El segundo paso consiste en una inspección GPR restringido a las secciones críticas, utilizando dos antenas acopladas, una de 1,6 GHz y otra de 600 MHz. La primera es para evaluar el pavimento y la segunda para estudiar la sub-base. Y el tercer paso, el post-procesado que sirve para identificar con precisión la geometría de la inestabilidad. El estudio de caso realizado mostró la potencialidad del protocolo aplicado a los caminos expuestos a un deslizamiento de tierra.

El comportamiento mecánico del suelo está en parte afectado por el contenido de arcilla [Tosti *et al*, 2013] realizó una evaluación del contenido de arcilla en los suelos a través de procesamiento de señales GPR, donde utilizó una antena de 500 MHz y un analizador vectorial de redes que abarcan la gama de frecuencias 1-3 GHz.

En el diseño experimental utilizó tres tipos de suelos adecuadamente compactados en cajas de prueba aislados eléctricamente e hidráulicamente y se agregaron gradualmente de un 2% a un 25% de su peso de arcilla de bentonita. Las señales fueron procesadas en ambos dominios de tiempo y frecuencia, y la consistencia de los resultados fue validada por el método de dispersión de Rayleigh. Se obtuvieron resultados prometedores para la detección de contenido de arcilla que afecta a la capacidad de soporte del suelo.

En geotecnia, también se contempla el estudio estratigráfico, en el apartado 3.4.1 se puede ver las aplicaciones del georadar en estratigrafía.

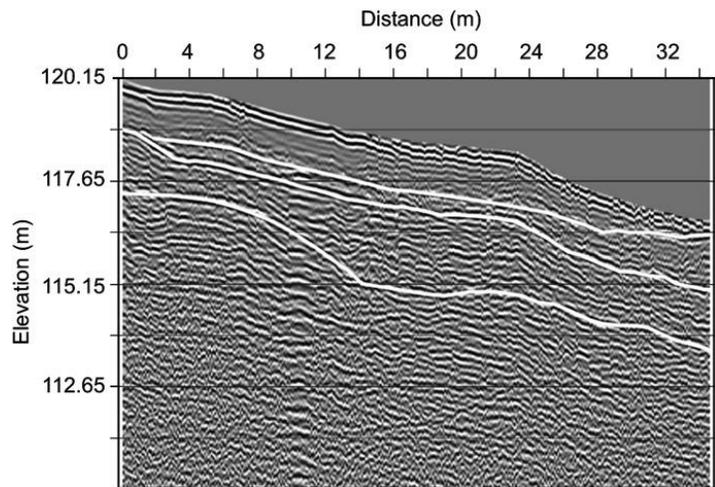
### 3.4. Geología

El Radar de Penetración Terrestre es una técnica geofísica no invasiva, versátil y de alta resolución que ayuda y mejora los estudios del subsuelo. Pudiendo realizar estratigrafías, estudiar procesos geomorfológicos, investigar la estructura interna de los sedimentos, entre otras aplicaciones.

#### 3.4.1. Estratigrafía.

La estratigrafía es una de las ramas de la geología, es la descripción de los cuerpos estratificados que forman la corteza terrestre y la identificación, descripción, secuencia, tanto vertical como horizontal, cartografía y correlación de las unidades estratigráficas.

La aplicación del Radar de Penetración Terrestre tiene muchas ventajas sobre los métodos tradicionales de exploración en un estudio estratigráfico, al ser un método no invasivo, de rápida interpretación y de bajo impacto. En la imagen 3.11 se muestra la interpretación de un Radargrama obtenido en una cueva cárstica al sur de Italia, donde se marcan con una línea blanca el límite de los estratos.



**Imagen 3.11** Interpretación de radargrama. [Fuente: Quarto *et al*, 2007].

En los últimos años, la aplicación del GPR en investigaciones de estratigrafía se ha expandido y aumentado. [Cagnoli y Russell, 2000] utilizó el radar para tomar imágenes de la estratigrafía del subsuelo en el campo hidrovulcanico Ubehebe en el Valle de la muerte, California, EEUU.

[Anderson *et al*, 2003] lo utilizó para obtener imágenes del subsuelo de las relaciones estratigráficas en múltiples sitios antes de la excavación, en un estudio realizado a una falla inversa en el sur de California.

[Carreón-Freyre *et al*, 2003] realizó una correlación estratigráfica cerca de la superficie en la Cuenca de Chalco, México, utilizando antenas de 900 MHz y 300 MHz, el análisis de los contrastes en las propiedades físicas les permitió identificar potenciales reflectores de las ondas del radar para los estratos.

[Helle, 2004] utilizó perfiles de Radar de Penetración Terrestre, secciones de afloramiento y datos de perforación, para reconstruir la estratigrafía de la morrena Hæreid de Hardangerfjorden al oeste de Noruega. [Sauer y Henningsen, 2004] lo probaron como un método para determinar el espesor de

los depósitos del Pleistoceno periglacial de la regiones montañosas en Alemania; [Quarto *et al*, 2007] en una cueva cárstica con restos prehistóricos, en el sur de Italia y utiliza imágenes de GPR de la estratigrafía del subsuelo, tanto dentro como fuera de la cueva, con el fin de ayudar a los arqueólogos con la excavación.

[Rice *et al*, 2009] en el estudio de la morfología y evolución de las barras en un río errante, bajo el río Fraser, Columbia británica, Canadá, utilizó el Radar de Penetración Terrestre para estudiar la estratigrafía de las barras.[Pauselli *et al*, 2010] determinó la estratigrafía de las fallas activas en la cuenca Norcia en el centro de Italia. Identificaron las firmas de radar en zonas donde la falla se encuentra expuesta, y las velocidades de propagación de la onda la obtuvieron mediante la comparación de dos exploraciones uno en una pared colgante y otra en el muro inferior de la falla.

[Idi y Kamarudin, 2012] desarrollaron un modelo para la delimitación de la secuencia estratigráficas de turberas con Radar de Penetración Terrestre. [Ismail *et al*, 2012] utilizaron el Radar de Penetración Terrestre con una antena de 100 Mhz, en la identificación del nivel freático y la estratigrafía de la arena de un aluvión marino en Seri Iskandar, Tronoh, Perak, Malasia.

[Gontz *et al*, 2013] para dilucidar la arquitectura bajo la superficie y establecer un marco geológico en la llanura Strand, playa Flinders, North Stradbroke Island, Queensland, Australia, utilizaron el Radar de Penetración Terrestre con una antena de 250 MHz, para un estudio estratigráfico; y [Proulx-McInnis *et al*, 2013] determinó el espesor de la turba en un pantano boreal en Quebec, Canadá.

### **3.4.2. Geomorfología.**

La geomorfología es una de las ramas de la geología, estudia el relieve o las formas superficiales de la tierra, describiéndolas, ordenándolas sistemáticamente e investigando su origen y desarrollo.

El uso de métodos geofísicos para la caracterización geomorfológica de las características del subsuelo tiene numerosas ventajas sobre los métodos tradicionales de exploración, debido a su naturaleza no invasiva y rápida.

[Liu y Li, 2001] usó el GPR con antenas de 400 MHz y 100 MHz en tres sitios a lo largo de la escarpa occidental de la Sikeston Ridge en Missouri para estudios de deformación cerca de la superficie, en la zona sísmica de Nuevo Madrid en EE.UU.

[Pelpola y Hickin, 2004] utilizó el radar para definir la morfología pre-deposicional de una cuenca de recepción en las montañas costeras de Columbia Británica; [Maurya *et al*, 2006] con una antena de 200 MHz, investigó dos grandes cráteres muy próximos entre sí, de diferentes morfologías con el fin de entender la deformación del subsuelo, cráteres formados en el terremoto de Bhuj en 2001 producto de la licuefacción de los sedimentos en Kachchh, en el Oeste de la India.

[Mulchandani *et al*, 2007] utilizó los datos del Radar de Penetración Terrestre para la comprensión de la evolución geomorfológica de la cuenca del drenaje Kim en respuesta a la inversión tectónica del bloque Narmada-Ankleshwar de la cuenca rift Cambay situado en el margen occidental de la india continental.

[Rodríguez *et al*, 2009b] en su trabajo presentó un análisis de la dinámica del campo de dunas en la punta del Fangar en Delta del Ebro en España. La estructura interna de las dunas la determinan utilizando el Radar de Penetración Terrestre y apoyo de GPS diferencial, la estructura interna muestra secuencias de acreción y propagación de más depósitos, que dependen de la morfología dunar.

[Switzer *et al*, 2010] en un estudio realizado en la playa en Batemans Bay, Nueva Gales del Sur, Australia, con una antena de 200 MHz, proporcionó evidencia geomorfológica, que indica que el nivel del mar a mediados del Holoceno tardío superaba entre 1 m a 1,5 m el nivel actual.

[Girardi y Davis, 2010] utilizó el radar de penetración terrestre con antenas de 200 MHz y 500 MHz e imágenes aéreas para estudiar la geomorfología eólica de dunas parabólicas en Napeague, Nueva York, EE.UU. [Bhatti *et al*, 2010] midió el desplazamiento de la gran ruptura producida en la zona Balakot por el terremoto de Cachemira en 2005 en Pakistán; y [Hausmann *et al*, 2013] hizo una caracterización geomorfológica bidimensional usando métodos geofísicos y muestreo de suelos de un meandro abandonado del río Mulde en el norte de Sajonia. En su estudio comparó la tomografía de resistividad eléctrica, refracción sísmica, Radar de Penetración Terrestre y el análisis de múltiples canales de ondas superficiales, donde señala que estos métodos se pueden utilizar para obtener imágenes del subsuelo. Sin embargo, solo fueron capaces de caracterizar y delimitar las características del subsuelo, combinado todos los métodos estudiados.

[Roqué *et al*, 2013] utilizó el Radar de Penetración Terrestre para caracterizar cavidades de granito en el noreste de España y señaló que tiene características similares a los taffoni encontrados en afloramientos de granito de los alrededores. Con estos datos apoyan un origen subterráneo de algunos taffoni y sustentan un nuevo método conceptual para la iniciación y crecimiento de cavidades en el granito. En que la erosión de la maza de roca, producto del flujo de aguas subterráneas a través de las fracturas, conduce a la exposición de estas cavidades en evolución como un taffoni típico. Finalmente concluyeron que los métodos geofísicos pueden ser considerados como un excelente complemento para la caracterización geomorfológica del paisaje y de la investigación del subsuelo mediante métodos directos.

[Parker *et al*, 2013] utilizó modelos digitales de elevación y de Radar de Penetración Terrestre para cuantificar la relación entre la morfodinámica de superficie y sedimentología del subsuelo en el

trenzado de arena del río South Saskatchewan, Canadá. Los datos los obtuvieron de los mismos lugares en 2004, 2005, 2006 y 2007, permitiendo establecer de manera explícita la morfodinámica de la superficie asociada a la evolución del producto depocional. Para esto utilizaron un equipo de Sensors & Software Inc. PulseEKKO Pro con una antena de 200 MHz.

[Monnier *et al*, 2013] utilizó el Radar de Penetración Terrestre para estudiar la estructura interna del glaciar de escombros, en el trabajo geomorfológico del accidente geográfico que se encuentra frente del glaciar Cerro Tapado en la cuenca superior del río Elqui, en Chile; concluyó que el conjunto esta fundamentalmente caracterizado por límites morfológicos, estructurales y dinámicos.

[Rey *et al*, 20013] realizaron un estudio geofísico en los niveles bajos de terrazas y la llanura de inundación del curso actual del río Guadalquivir, que pasa a través de la provincia de Jaén, España, donde una de las técnicas que utilizan es el Radar de Penetración Terrestre con antenas de 100 MHz y 250 MHz, indicando la morfología de las terrazas y el llenado de los cuerpos sedimentarios de una manera detallada. En una antigua cantera cercana realizaron una campaña para calibrar y obtener firmas de radar.

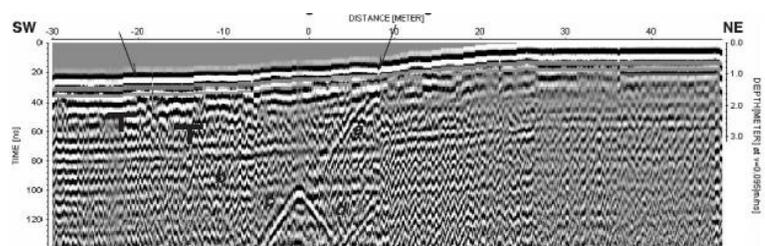
[Bubeck *et al*, 2014] utilizó el conjunto de datos combinados del Radar de Penetración Terrestre y escaneo laser, para documentar la variedad tectono-geomorfológico, características que contribuyen a la morfología de los escarpes de lecho de roca asociado a fallas activas en el centro de Italia. El uso del GPR y escaneo laser combinado demostró que las características tectono-geomorfológico estudiadas varían mucho en distancias cortas.

### 3.4.3. Fallas Sísmicas

Una falla es una fractura en el terreno a lo largo de la cual permite el movimiento de uno de los lados respecto del otro, y esta actividad puede producir terremotos.

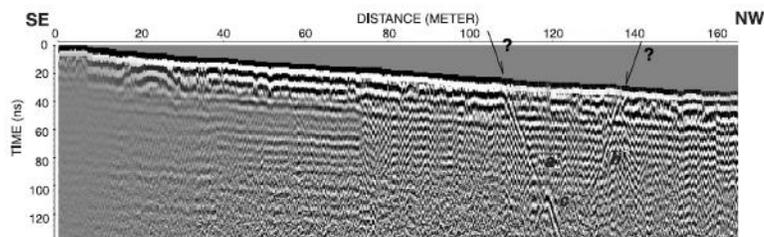
Las imágenes de alta resolución del radar de penetración terrestre, pueden ayudar en el estudio y detección de fallas activas, proporcionando información acerca de la estructura del subsuelo geológico, los patrones de deformación presente y evaluaciones de riesgo sísmico.

En el trabajo realizado por [Slater y Niemi, 2003] utilizó el radar para localizar una falla principal activa que atraviesa la ciudad de Aqaba en Jordania. En una falla transversal expuesta fuera de la ciudad realizó mediciones para identificar una firma,



**Imagen 3.12** firma GPR de una falla activa en Aqaba Jordania, obtenida en una zona expuesta fuera de la ciudad. [Fuente: Slater y Niemi, 2003].

imagen 3.12, y calibrar el equipo. Mide siete perfiles con GPR perpendicularmente en la zona donde supuestamente pasa la falla, en cinco perfiles obtuvieron una respuesta muy similar a la estudiada fuera de la ciudad, en la imagen 3.13 se muestra uno de los cinco perfiles donde se obtuvo coincidencia con la firma. Por lo que señala, este estudio tiene implicaciones importantes para el análisis de la amenaza sísmica en esta región tectónicamente activa y densamente poblada.



**Imagen 3.13** Radargrama de falla encontrada en Aqaba, Jordania. [Fuente: Slater y Niemi, 2003].

En Osaka, Japón [Rashed y Nakagawa, 2004] utilizaron el Radar de Penetración Terrestre junto con el método sísmico basados en ondas superficiales, para estudiar la evolución del sistema de fallas Uemachi.

Algunos de los fallos detectados se extienden a una profundidad de menos de 3 m por debajo de la superficie del suelo, lo que sugiere que la última actividad tectónica a lo largo del plano de falla puede haber ocurrido hace poco de acuerdo a lo que señalan.

En la fallas en Morelia, Michoacan, México [Avila y Garduño, 2008] utilizó el Radar de Penetración Terrestre con una antena de 50 MHz, para estudiar los procesos de subsidencia-fluencia; [Christie *et al*, 2009] realizó una evaluación de los desplazamientos de la falla y la deformación de las zonas de fallas activas, en la zona de Emigrant Peak Fault en Fish Lake Valley, Nevada, con el Radar de Penetración Terrestre, utilizando dos antenas una de 50 MHz para realizar una cuadrícula 3D de 500 m por 115 m sobre la falla, y una de 25 MHz para una medición 2D con un perfil de 1500 m perpendicular a la traza activa.

En este estudio señalaron que proporciona una prueba más de que las imágenes del subsuelo 3-D son necesaria para la determinación precisa de los desplazamientos de las fallas y la deformación de las zonas de fallas activas. [Pati *et al*, 2011] utilizaron el Radar de Penetración Terrestre para poner de manifiesto las actividades de empuje entre el Gandak y el área Kosi megafan en la llanura del Ganges Medio. [Yalçiner *et al*, 2013] aplicó el GPR con antenas de 250 MHz y 500 MHz en dos sitios a lo largo del Büyük Menderes Graben en Turquía occidental para localizar con precisión la zona de falla normal, en la superficie no hay evidencia clara de ruptura.

A partir de estas mediciones, determinaron lugares adecuados a las investigaciones paleosísmica y realizaron excavaciones que indicaron una buena correlación entre los métodos; [Feagin *et al*, 2013]

utilizó el GPR junto con imágenes de teledetección aérea, datos LIDAR, sísmica de poca profundidad, y la evidencia litoestratigráfica y bioestratigráfica para cuantificar el desplazamiento y la actividad de las fallas en un pantano de sal de los humedales al Este de la península de Matagorda, Texas. Los resultados apoyan la interpretación de que la falla de Matagorda está activa, y ha participado activamente en el pasado.

[Ercoli *et al*, 2014] aplicó el GPR para elaborar la primera imagen del subsuelo en 3D de una falla superficial activa, destacando la geometría de la falla y la secuencia estratigráfica hasta una profundidad de 5 m. en la cuenca el Piano di Casteluccio en el monte Vettore en los Apepinos centrales, Italia.

[Dujardin *et al*, 2014] presenta los resultados de la aplicación de GPR con antenas de 50 MHz y 500 MHz a lo largo de la falla Emeelt en las cercanías de Ulam Bator en Mongolia. Utilizaron la antena de 50 MHz para hacer un levantamiento 2D y la antena de 500 MHz para un pseudo-3D. Estos perfiles proporcionaron información complementaria sobre la falla, como su ubicación a poca profundidad, su ángulo de inclinación y permitió definir su extensión lateral.

Así también, los datos que se pueden obtener con el radar de penetración se utilizan para estudios de paleosísmica. Como se ve en el trabajo de [Anderson *et al*, 2003] que aplicó el Radar de Penetración Terrestre y análisis geomorfológico para la caracterización paleosísmica, en una falla inversa en el sur de California; también [Patidar *et al*, 2008] utilizó el GPR para realizar un análisis detallado de la falla de la colina Karol situado en la parte central de Kachchh, donde observaron que los sedimentos cuaternarios que recubren la falla de la colina Karol indican tres eventos de falla durante el cuaternario tardío.

De acuerdo a lo revelado por el radar, los cambios de geometría de la falla hacia la superficie indican una reactivación periódica de esta; [Pauselli *et al*, 2010] con el GPR estudió las fallas activas e investigó la estructura geológica superficial en la cuenca Norcia en el centro de Italia. Identificó una firma de radar zonas donde la falla se encuentra expuesta, conocido como un área de control y las velocidades de propagación de la onda la obtuvieron mediante la comparación de dos exploraciones uno en una pared colgante y otra en el muro inferior de la falla.

Este análisis hizo posible estimar el espesor de las capas sedimentarias que participan en el mecanismo de fallo y la estratigrafía de la falla. La información reunida la utilizaron para definir la ubicación de nuevas excavaciones. Concluyeron que el GPR puede ser utilizado en las investigaciones paleosismológicas, en particular, para una investigación preliminar donde el contexto geológico está mal definido.

En tanto, [Beauprêtre *et al*, 2012] utilizó el Radar de Penetración Terrestre con una antena de 100 MHz y una antena blindada de 250 MHz, para encontrar registros enterrados de terremotos pasados, paleosismología, en el sitio de Teraco en la falla de la Esperanza en Nueva Zelanda. El desarrollo de una nueva herramienta de este tipo en palaeoseismología proporciona información rica que pueden complementar las observaciones de superficie y ayudar a documentar los últimos terremotos en fallas.

#### 3.4.4. Sedimentología.

La sedimentología es la rama de geología que estudia los procesos de formación, transporte y deposición de material que se acumula como sedimento en ambientes continentales y marinos, y tratan de reconstruir los ambientes sedimentarios del pasado.

El Radar de Penetración Terrestre es ampliamente utilizado como una herramienta para obtener imágenes de las estructuras sedimentarias y la reconstrucción de la historia deposicional en una variedad de entornos, la imagen 3.15 contiene un perfil GPR y la interpretación de este, donde se puede ver las facies de los sedimentos y sus distribución.

[Fiore *et al*, 2002] realizó un estudio sedimentológico con GPR de los depósitos subglaciares del valle de Joux, Vaud, Suiza.

Utilizaron un dispositivo Mala Geoscience RAMAC system con antena de 100 MHz.

[Froese *et al*, 2005] utilizó el Radar de Penetración Terrestre junto con resistividad eléctrica, para caracterizar los sedimentos aluviales en el río Yukón medio en un tramo de 1000 km. -entre el territorio de Yucón occidental y de Alaska central-. Los resultados del estudio, indicaron que el transporte de sedimentos ha estado en equilibrio durante el holoceno, además, la cuenca sedimentaria del Yukón pudo haber estado en equilibrio desde finales del plioceno.

[Sambrook *et al*, 2006] utilizó el GPR con una antena de 200 MHz, para describir y cuantificar los depósitos sedimentarios de barras unitarias y compuestas dentro del trenzado de arena Sur en el Río Saskatchewan, Canadá.

[Carrivick *et al*, 2007] con antenas de 50 MHz y 100 MHz, las utilizó para obtener datos cuantitativos sobre el carácter sedimentario subsuperficial de alta magnitud, incluyendo arquitectura y

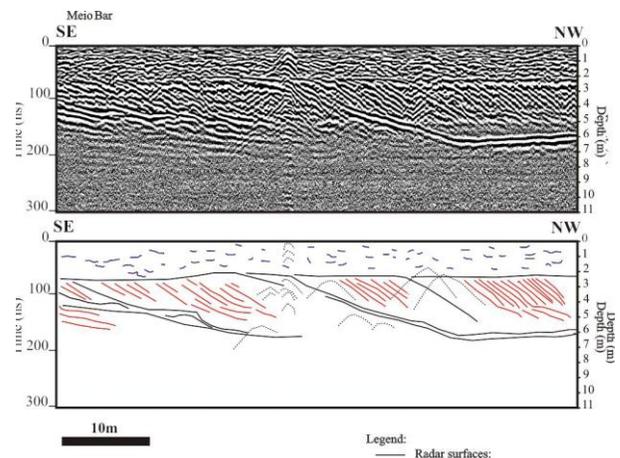


Imagen 3.15 Perfil GPR e interpretación de la barrera Meio del río Amazonas. [Fuente: López *et al*, 2014]

estratigrafía de las inundaciones Jökulhlaups y lahars, que comúnmente son una mezcla de agua de deshielo de los glaciares y sedimentos volcánicas, en Bedrock Valley System, Hraundalur, Islandia. Concluyeron que la arquitectura y estratigrafía sedimentaria es relativamente simple; [Sass *et al* 2007] investigan la capacidad del GPR para descifrar la historia sedimentaria de jóvenes llanuras aluviales.

Las cuencas de sedimentos que estudió, son el resultado del relleno de dos lagos, que fueron represados por desprendimientos de roca de gran magnitud hace 400-600 y 200 años en un valle a través de los Alpes. Aplicaron el GPR con antenas de 25 MHz, 50 MHz, 100 MHz y 200 MHz. donde el espesor y la estructura de los sedimentos represado derivan de una serie de perfiles longitudinales y transversales. Además los radargramas permitieron un análisis detallado de la historia del relleno aluvial.

[Shukla *et al*, 2008] con una antena de 200 MHz, realizó un estudio de la arquitectura sedimentaria, en el complejo de la playa Madwa entre Rawal Pir y Modwa, en la costa norte del Golfo de Kachchh.

[Viseras *et al*, 2009] aplicaron el GPR junto con una serie de zanjas poco profundas y geología superficial, a los sistemas sedimentarios que intervienen en la rápida colmatación de un embalse construido en 1974 en Alhama de Granada, España. Identificaron tres sistemas aluviales, dos transversales y una longitudinal, cuyas deltas han llenado el depósito.

[Nielsen *et al*, 2009] con una antena de 100 MHz, aplicó el GPR para elaborar imágenes tridimensionales de los montículos de Briozoo Daniano en la cantera de piedra caliza Limhamn, suroeste de Suecia, para estudiar el detalle la sedimentología y paleoecología, la que proporcionó nueva información de la arquitectura y el desarrollo de este tipo de montículos.

[Pueyo *et al*, 2009] en su trabajo mostró que la estructura interna de los sedimentos obtenidos a partir de encuestas GPR también se pueden utilizar como indicador de los procesos kársticos activos. Los ejemplos de campo muestran que es una técnica que ofrece una muy alta resolución y proporciona información estructural y sedimentológico del subsuelo. Sus relaciones con las características estructurales obtenidas de los perfiles, pueden ser utilizados como indicadores de los procesos kársticos.

[Hornung *et al*, 2010] utilizó el GPR para una investigación en tres dimensiones de la arquitectura sedimentaria de un abanico fluvial alpino con una superficie de 300.000 m<sup>2</sup> cerca de Samedá, en Suiza, donde usaron 9 km. de perfiles con una penetración de 10 m. La calibración y la toma de firmas de radar la obtuvieron de una larga sección de afloramiento de 300 m, donde seis grandes reflectores fueron identificados.

Todos estos datos fueron geo-referenciados para establecer un marco de tiempo estratigráfico 3-D cuantitativa completa, lo que les permitió calcular los volúmenes de sedimentos depositados y los flujos de sedimentos para diferentes intervalos de tiempo.

[Clemmensen y Nielsen, 2010] con una antena de 250 MHz, utilizó el Radar de Penetración Terrestre para estudiar la arquitectura interna de los sedimentos de un sistema de crestas elevadas de playa en Anholt, en Dinamarca, formadas durante un levantamiento isostático y una caída relativa en el nivel del mar en los últimos 7700 años.

[Gutiérrez *et al*, 2011] en su trabajo integró los métodos geomorfológicos convencionales con InSAR, GPR y zanjas para la identificación y caracterización de los sumideros o dolina en una zona kárstica bajo un manto de evaporita en el Valle del Ebro en el noreste de España. Los perfiles del GPR contribuyeron a la ubicación precisa de los bordes de los sumideros, proporcionaron información sobre la geometría y la deformación de la estructura.

[Ashworth *et al*, 2011] utilizó el GPR junto con imágenes aéreas, en el sur del río Saskatchewan, para abordar si las barras de depósitos y relleno de canal se pueden diferenciar fácilmente de uno al otro. Los resultados mostraron que en términos de tendencia granulométrica, facies y la escala de depósitos, existen diferencias sutiles entre el relleno de canales y los depósitos de barras, que las hace indistinguibles.

[Pellicer y Gibson, 2011] utilizó el Radar de Penetración Terrestre junto con resistividad eléctrica con el apoyo de métodos de campo tradicionales para el mapeo geológico, descripción e interpretación de sedimentos no consolidados del Cuaternario en un sitio ubicado en la región central de Irlanda. Cinco perfiles GPR fueron recogidos para representar la arquitectura interna de los sedimentos no consolidados de baja conductividad y ayudaron a la clasificación y caracterización de estructura.

[Chowksey *et al*, 2011] utilizó un equipo GPR GSSI SIR-20 con una antena de 200 MHz, para estudiar los depósitos coluviales del cuaternario en la falla Kachchh. Los depósitos forman una pendiente hacia el norte de 2 a 3 km de ancho superficial atribuido a la actividad neotectónica. La secciones del río a la vista y las secciones de zanja se correlacionan bien con los datos interpretados de los perfiles del GPR, las diferentes facies sedimentarias identificadas varían de grava de canto rodado a grava fina y arena grava. Concluyeron que el estudio demuestra la utilidad del GPR para estudiar los sedimentos de flujos coluviales.

[Vriend *et al*, 2012] hizo un investigación con GPR a dos grandes dunas del desierto de California, EE.UU.; una en el campo de Dumont y una lineal en la expansión de Eureka. Las imágenes del radar penetraron hasta 30 metros y mostraron una complicada estructura de estratificación interna

con estratificación cruzada y superficies delimitadoras de corte a través de capas, según lo revelado por los perfiles del GPR, el resultado directo del grainfall, grainflow y otros procesos sedimentarios en la dinámica de construcción de dunas.

[Deshraj *et al*, 2012] han estudiado mediante el uso de información sedimentológica y datos georadar, las dunas costeras situadas cerca de región Ashirmanta, al sur de la playa de Mandvi, Gujarat, India. En este estudio, los Radagramas muestran que las capas de arena homogéneas con paleosuelos en caras de deslizamiento de profundidad superficial se forman probablemente debido a la actividad de tormentas externas recientes.

[Okazaki *et al*, 2013] aplicaron el GPR con una antena de alta frecuencia, 1,6 GHz, para la reconstrucción de la arquitectura sedimentaria en un modelo 3D de canal de un sistema fluvial. Llevaron a cabo dos experimentos, uno para revelar la profundidad de penetración y la resolución de la antena y reconstruir la arquitectura 3D de los depósitos fluviales creadas en un canal, y el otro para examinar las características de los límites de reflexión. Los materiales experimentales fueron principalmente suelos arcillosos.

El primer experimento mostró que una antena de 1,6 GHz era adecuado para uso en laboratorio, que ofrece una resolución de profundidad de 2 cm a 3 cm en la penetración completa de una cama de 15 a 24 cm de espesor. El escaneo GPR produjo una reconstrucción exacta de la arquitectura 3D de un canal fluvial utilizando camas marcadores de magnetita. El segundo experimento también adquiere con éxito una arquitectura 3D usando arena de cuarzo en lugar de magnetita, y suelo arcilloso, que tienen diferentes permitividades relativas. Esta investigación muestra que la GPR es una técnica viable para el análisis 3D de depósitos fluviales experimentales.

[Rey *et al*, 2013] realizaron un estudio geofísico con GPR y resistividad eléctrica en los niveles bajos de las terrazas y en la llanura de inundación del curso actual del río Guadalquivir, España. En los afloramientos de una antigua cantera calibran los equipos. Con el GPR un equipo MALA con antenas de 100 MHz y 250 MHz fueron adquiridos 16 perfiles, indicando la morfología de las terrazas y el llenado de los cuerpos sedimentarios. El estudio permitió inferir en la existencia de la migración de canal, la acreción lateral de las barras y de la presencia de depósitos de acreción verticales atribuibles a las llanuras.

[López *et al*, 2013] utilizó el Radar de Penetración Terrestre para caracterizar y estudiar los depósitos fluviales de los ríos Amazonas y Tapajós. El radar proporcionó información para el estudio de la historia y la evolución de las barras fluviales de los ríos, la principal fuente de la cuenca hidrográfica más grande del planeta, el Amazonas. En la imagen 3.15 se muestra un Radargrama de la barrera Meio

del río Amazonas con la interpretación de este. En este estudio se concluyó que la aplicación mostró la potencialidad del método para estudiar los sistemas de depósitos fluviales.

En los últimos años, diversos avances de equipos y prácticas de campo y nuevas estrategias de tratamiento han mejorado la capacidad de GPR para proporcionar datos de alta resolución en una gama más amplia de entornos y escenarios. Los avances incluyen sistemas multi-canal para la recolección más eficiente de datos y para la mejora del procesamiento.

[Van Dam *et al*, 2014] en su trabajo discutió algunos de los avances metodológicos y los datos de campo de máxima resolución presentes desde un sitio fluvial altamente heterogénea en Mississippi, EE.UU. También, presentaron los datos GPR de un proyecto centrado en la reconstrucción de la historia de posicional del delta del Usumacinta-Grijalva en Tabasco, México. Utilizaron dos antenas para evaluar individualmente el espesor variable de la cubierta eólica de las crestas de la playa. También caracterizaron los cambios sistemáticos en la inmersión de la playa y los depósitos en la zona del límite de la marea alta y baja, para estudiar la posible relación con los cambios temporales en procesos costeros.

### ***Sedimentos Volcánicos***

El Radar de Penetración Terrestre es una técnica geofísica útil que se usa para caracterizar la naturaleza, geometría y distribución espacial de los materiales volcánicos del subsuelo, siendo estos datos valiosos para completar las observaciones de campo en las zonas donde la información obtenida de la superficie está restringida.

[Gomez *et al*, 2006] analizó la respuesta del radar en varios materiales volcánicos del Tenerife, Islas Canarias, España, con el fin de reconocer su ocurrencia y caracterizar su espesor, distribución espacial, estructura interna y discontinuidades, así como para evaluar las velocidades medias de las ondas electromagnéticas en estas rocas y depósitos. Los perfiles de GPR que obtuvo muestran que, la geometría de los reflectores depende de la naturaleza de los materiales. Concluyó que la velocidad de onda es más rápida en flujos de lava que en los depósitos de airfall, donde la atenuación fue mayor y la penetración menor. Con las estimaciones de velocidad de propagación permitió procesar los perfiles y llevar a cabo la conversión del tiempo a profundidad, con el fin de obtener representaciones realistas en 2D.

En el volcán Wushanting en el sudoeste de Taiwán [Jinder *et al*, 2006] realizó una campaña con GPR, con una antena de 500 MHz, en un campo de lodo sedimentario, con el objetivo de obtener las características de reflexión y modelos de los depósitos volcánicos, donde reconocen siete firmas de reflexiones. Las correspondientes a: un reciente lóbulo de lodo depositado encima de un lóbulo mayor

subyacente, un flujo de lodo reciente que se encontró con obstáculo, depósitos de lodo e fluidez limitada, baja velocidad y suave pendiente, las formadas por interdigitaciones de los últimos lóbulos de lodo en la construcción bajo tierra, rotura laterales de la continuidad de las grietas de lodo, entre otros. Los segmentos de tiempo de diferentes profundidades se representan como un modelo 3D. Concluyen que los modelos de este estudio pueden ser aplicados a paleoambiente y la evolución de deposiciones de los lodos volcánicos de ambientes geológicos similares.

[Abrams *et al*, 2007] utilizó el GPR para caracterizar la caída y depósitos piroclásticos desde la erupción del volcán Tambora en Indonesia en 1815. Utilizó el método punto medio común para estimar la velocidad de propagación de la onda del radar. Además hizo campañas de calibración a lo largo del borde de un barranco que expone aproximadamente 1 m a 2 m de la estratigrafía volcánica y en zanjas en el lodo expuesto al contacto entre la superficie y depósitos piroclásticos, anteriores a la erupción de 1815, en los volcanes Poás e Irazú en Costa Rica.

[Kruse *et al*, 2010] utilizó el Radar de Penetración Terrestre para obtener imágenes de la tefrostratigrafía reciente de los volcanes; en volcán Lascar en Chile; [Whelley *et al*, 2012] utilizó el Radar de Penetración Terrestre junto con teledetección y medición de campo directas, en el depósito no consolidados de flujos piroclásticos de la erupción de 1993, para estudiar las fracturas post-deposicional y el hundimiento de los depósitos de flujo de pómez.

Con el GPR pudieron observar las fracturas que se han propagado a profundidades de hasta 10 m., además, muestra que el hundimiento del depósito entre 1993 y 1996 fue a una velocidad de 1 cm/año, posterior a esto, el hundimiento continua ocurriendo a un ritmo más lento.

[Courtland *et al*, 2012] utilizó los datos GPR para mejorar la comprensión de los procesos de deposición de tefra en la rejilla de ventilación del volcán Cerro Negro, ubicado en Nicaragua, comparando los perfiles del GPR con los modelos de la caída tefra basado en la ecuación advección-difusión para pronosticar la sedimentación. De esta manera validó los modelos numéricos actuales de sedimentación tefra con los perfiles detallados de GPR.

[Ettinger *et al*, 2014] aplicó el GPR para estudiar la arquitectura del ventilador Rumipamba, en la desembocadura de la quebrada Burrohuaycu en el flanco suroeste del volcán Cotopaxi, Ecuador. Realizó una rejilla de 50 perfiles con una longitud total de 19,4 km. Cubriendo una superficie de 4 km<sup>2</sup>. Los sedimentos consistían en depósitos de arena y grava lahar, alternando con lluvia volcánica incluidas las cenizas y lapilli pómez, a veces redistribuidos por procesos fluviales; en el suroeste de la isla de Lanzarote en islas Canarias, España.

[Gómez *et al*, 2014] estudió la ubicación de los tubos de lava reciente, por análisis y la interpretación conjunta del GPR, microgravedad e inducción electromagnética a lo largo del mismo perfil en un área volcánica no estudiada previamente. La comparación de los resultados reveló que la interpretación conjunta de GPR, microgravedad y los métodos de inducción electromagnética proporcionó modelos fiables útiles para la detección de tubos de lava poco profundas desconocidas.

En 2006 el volcán Merapi en Java, Indonesia, entró en erupción por unos pocos meses, la producción de varios flujos de bloques y ceniza alcanzó una distancia máxima de 7.5 km de la ventilación principal.

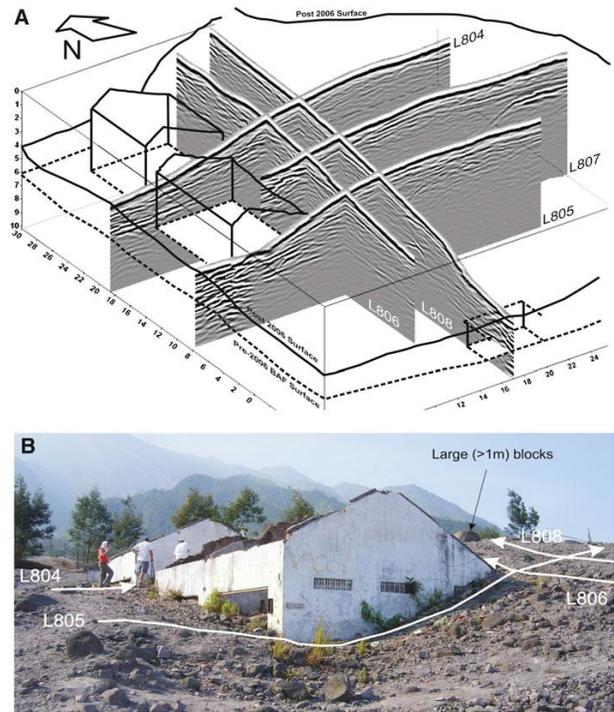
[Gomez *et al*, 2008] con un equipo GPR RAMAC con una antena de 100 MHz, estudió la estructura longitudinal de los depósitos de flujo piroclásticos en el valle Gendol en la aldea de Kaliadem. El depósito superior lo estudió en sus tramos distales, mientras que el inferior se hizo en sus alcances mediales. A partir de esto, determinó el espesor de los depósitos llegando a un máximo de 15 m y la arquitectura interna. Sin embargo señaló que la interpretación de los perfiles fue un poco precaria, debido a la ausencia de afloramientos, y que solo procedieron con analogías con otros estudios.

A pesar de estas limitaciones, concluyó que el GPR es una herramienta útil para entender la estructura de los depósitos piroclásticos, cuando no están disponibles observaciones visuales; en el mismo contexto [Gomez *et al*, 2009] publicó el estudio con GPR que incluyen topografía y un telemetro laser, en el lóbulo más distal del depósito de bloque y ceniza volcánica. Donde los datos del subsuelo revelaron una serie de capas, separadas por fuertes reflexiones.

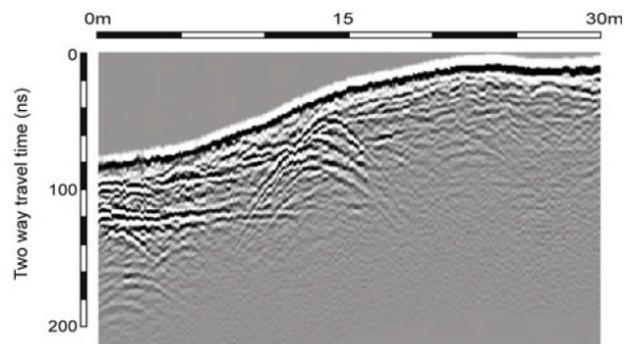
Estas reflexiones son la manifestación de intercalaciones de materiales finos en el medio de las capas gruesas. La arquitectura de estas capas presentan patrones de progradación, retrogradación y agradación que relacionaron con el proceso de deposición de bloques y ceniza. Basándose en estas observaciones propusieron una cronología relativa de la deposición y un modelo conceptual sencillo de la deposición. Además señaló que hay reflejos en el Radargrama que no pudieron identificar, y más estudios deben llevarse a cabo.

Y [Gertisser *et al*, 2012] aplicó el GPR y métodos tradicionales de vulcanología sobre los flujos de bloque y cenizas, resultantes de la erupción del volcán, que viajaron una distancia de siete kilómetros por un valle del río Incisa y desbordaron en el valle principal sepultando edificios y otras infraestructuras características del pueblo de Kaliadem, situado a cinco kilómetros de la cima del Merapi. Para estudiar la morfología y la arquitectura interna de estos depósitos, con el fin de evaluar en detalle el impacto destructivo de estos flujos en un contexto local. Para esto, elaboraron imágenes 3D y 2D con los perfiles adquiridos con GPR.

En la imagen 3.15, B es una fotografía de dos edificios sepultados por sedimentos del volcán, cenizas y bloques, y A es un 3D generados por radargramas obtenidos en el lugar, donde se puede ver la superficie antes de la erupción del 2006, línea segmentada, y post erupción, línea continua. Y en la imagen 3.16, un perfil identificado como L804, indicado en la imagen 3.15, donde se aprecian las reflexiones de los bloques de entre 1 m y 2m.



**Imagen 3.15** A) Perfil 3D de sedimentos de la erupción del volcán Merapi, Indonesia. B) fotografía de dos edificios sepultados por sedimentos de la erupción y la traza de los perfiles GPR adquiridos para armar el 3D. [Fuente: Gertisser *et al*, 2012].



**Imagen 3.16** Radargrama obtenido de la traza L804, identificado en la imagen 3.15. [Fuente: Gertisser *et al*, 2012]

## **4. Aplicación Práctica del Radar de Penetración Terrestre En Sedimentología Aplicación al Río Blanco, Chaitén.**

### **4.1. Introducción.**

El presente apartado muestra una aplicación del Radar de Penetración Terrestre en los sedimentos volcánicos acumulados en la ribera del río Blanco (comuna de Chaitén, provincia de Palena, Región de Los Lagos) posterior a la erupción del volcán Chaitén ocurrida entre los años 2008 y 2009.

El objetivo general de esta campaña es mostrar una aplicación práctica del Radar de Penetración Terrestre, realizada en los sedimentos acumulados en la ribera del río Blanco.

Para satisfacer el objetivo general se definen los siguientes objetivos específicos: ajustar la velocidad de propagación de la onda en ceniza volcánica seca y húmeda; obtener la firma GPR de madera enterrada en estos sedimentos. Para esto se aplica el GPR en dos medios idealizados in situ para realizar las calibraciones. Finalmente estudiar un perfil obtenido sobre los sedimentos volcánicos acumulados aguas abajo en la ribera del río Blanco próximo al delta.

A continuación se presenta una descripción general de la metodología de la campaña, la que incluye especificación de los equipos utilizados y la descripción de la campaña de la aplicación práctica. Posteriormente se muestran los resultados de la interpretación de los Radargramas obtenidos.

### **4.2. Zona de Exploración.**

En Chile existen más de dos mil volcanes, de los cuales alrededor de 80 registran 300 erupciones en los últimos 450 años, por lo cual se consideran geológicamente activos. Dentro de este grupo se encuentra el volcán Chaitén, el cual hizo erupción en 2008-2009.

El volcán Chaitén se encuentra ubicado en la provincia de Palena, región de Los Lagos, Chile, a diez kilómetros al noroeste de la ciudad de Chaitén

El 2 de mayo del 2008 se inició una erupción pliniana en el volcán Chaitén. Entre el 10 y 12 de mayo, se habría iniciado la construcción de un domo y el día 12, lahares e inundaciones afectaron la ciudad de Chaitén – la que fue evacuada principalmente durante la fase explosiva –. A fines de noviembre, la actividad eruptiva no había terminado por completo [Lara, 2009].

De acuerdo a lo que expuso [Pierson *et al*, 2014] en la fase explosiva de la erupción en 2008-2009 distribuyó ceniza volcánica vítrea de grano fino sobre un amplio sector al sureste de la rejilla de ventilación.

Además la cuenca del río Blanco (cuya superficie abarca 77 km<sup>2</sup>), situada al sur-sureste de la ventilación, exhibió rápidos cambios geomorfológicos y tasas extraordinarias de transporte de sedimentos en respuesta a la entrada de éstos.

Las precipitaciones en los días posteriores a la erupción provocaron una agradación de 4,5 metros del lecho del canal del río Blanco durante los primeros días y los siguientes, producto de un aumento de las lluvias, sumaron otros 2,5 metros por deposición fluvial.

A fines de 2008 y principios de 2009, después de la descarga inicial de tefra a la cuenca, dos flujos piroclásticos suministraron grandes aportaciones de sedimentos adicionales al valle y al río Blanco, donde éste último recibió el material más grueso.

La erosión y la movilización de estos nuevos depósitos elevó en aproximadamente 3 metros -por sobre el nivel anterior a la erupción- el lecho del río Blanco aguas abajo y mantiene –hasta ahora- un gran delta que crece en la desembocadura de este afluente.

En la imagen 4.1 se muestra una fotografía del río Blanco obtenida en el periodo octubre noviembre de 2009 por un equipo LiDAR (Light Detection and Ranging) posterior a la erupción del volcán Chaitén.



**Imagen 4.1** Imagen LiDAR de Chaitén tomada en 2009. [Fuente: Elaboración Propia]

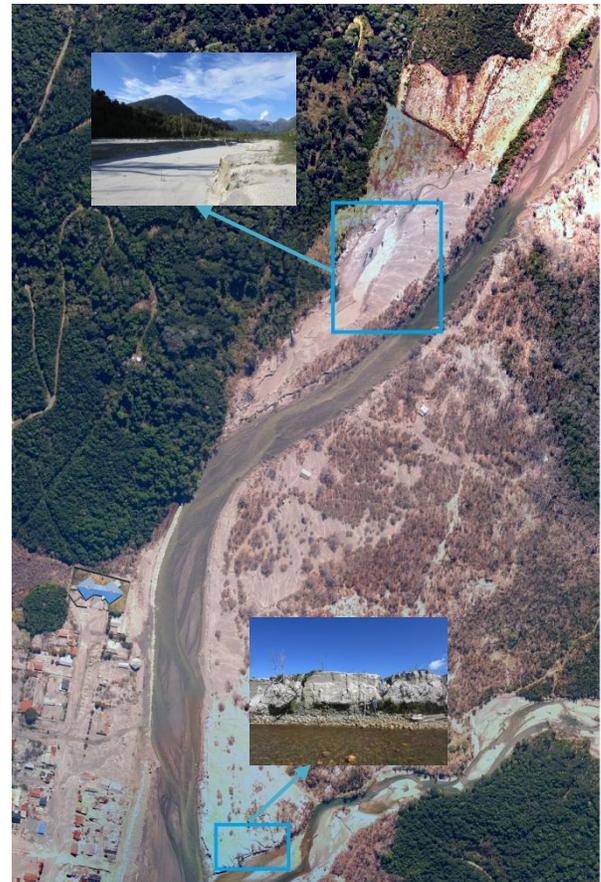
Finalmente [Pierson *et al*, 2014] señala que dentro de los cuatro años posteriores a la erupción, la cuenca del Chaitén volvió a elevaciones cercanas del canal-cama que tenía antes de la erupción: de material de lecho grueso dominante, una forma de canal de un solo hilo y bajos rendimientos de sedimentos.



**Imagen 4.2** Cuenca del río Blanco, cuatro años después de la erupción del volcán Chaitén. [Fuente: Elaboración Propia]

En la imagen 4.2 se puede ver la cuenca del río Blanco y los sedimentos volcánicos acumulados en la ribera de éste cuatro años después de la erupción del volcán del mismo nombre.

La aplicación práctica del Radar de Penetración Terrestre se llevó a cabo en los sedimentos volcánicos acumulados en la ribera del río Blanco, definiendo la zona de exploración de acuerdo a la información proporcionada por el investigador Dr. Andrés Iroumè a cargo del proyecto FONDECYT 1141064 “Effects of Vegetation on Channel Morphodynamics: A Multiscale Investigation in Chilean Gravel-Bed Rivers”, quien se encuentra realizando trabajos en esta zona. Considerando esta información se definió la zona de trabajo (ver imagen 4.3).



Zona de Exploración

Con el fin de satisfacer los objetivos, se trazaron tres perfiles de esta zona para aplicar el Radar de Penetración Terrestre.

El primer perfil (perfil01) fue emplazado en un sector muy cercano al río Blanco, y el segundo (perfil02) y tercer perfil (perfil03) en un sector mas alejado del afluente sobre una cárcava (ver imagen 4.4).

**Imagen 4.3** Zona de exploración. [Fuente: Elaboración propia]



**Imagen 4.4** En la imagen se muestran las trazas del perfil01, perfil02, y perfil03. [Fuente: Elaboración propia]

### 4.3. Metodología y Descripción de la Campaña.

#### 4.3.1. Descripción del Equipo.

En esta campaña de aplicación práctica del Radar de Penetración Terrestre se utilizó el equipo GPR MALA RAMAC X3M monocanal, con certificación ETSI EN 302 066-1. Se utilizaron dos antenas apantalladas de 250 MHz y 500 MHz. Y el software de adquisición Windows GroundVision de MALA. (En la imagen 4.5 se muestra el equipo GPR).

El sistema GPR RAMAC X3M es compacto, liviano, de bajo consumo de energía, versátil y fácil de usar, es una unidad de control de radar integrado, montado directamente sobre la antena y con alimentación externa.

Los fundamentos físicos, el funcionamiento y procesado de datos se describen en extenso en el capítulo 2 de esta tesis.

#### 4.3.2. Descripción de la Aplicación.

De la zona de exploración definida se obtuvieron tres perfiles.

El primero de una longitud de aproximadamente 4 metros -identificado como perfil01- se destinó para calibrar la velocidad de propagación de la onda en ceniza volcánica húmeda. En un sector próximo al río se idealizó un perfil donde se insertaron en las cenizas dos perfiles metálicos, uno a 1 metro de profundidad y el segundo a 0,5 metros de la superficie – como se muestra en la imagen 4.6 –. De esta manera, teniendo estos parámetros conocidos, se ajustó la



**Imagen 4.5** Sistema GPR RAMAC X3M con antenas de 250 MHz, 500 MHz y 800 MHz. [Fuente: Elaboración Propia].



**Imagen 4.6** incrustando perfiles metálicos en ceniza húmeda. [Fuente: Elaboración propia]

velocidad de propagación de la onda en ceniza volcánica húmeda del Radargrama obtenido en el lugar.

El segundo tiene una longitud aproximada de 43 metros – identificado como perfil02 – se realizó aprovechando la existencia de una cárcava (imagen 4.7) en la zona de exploración, se idealizó un perfil insertando a una profundidad conocida maderos de diferentes diámetros y un perfil metálico (este último para calibrar la velocidad de propagación de la onda en ceniza seca) que fueron georeferenciados con un GPS diferencial, así también el comienzo y final del perfil (los que se indican en la tabla 4.1).



**Imagen 4.7** Cárcava en la rivera del río Blanco. [Fuente: Elaboración Propia]

El tercero de un largo de 20 metros – identificado como perfil03 – se realizó sobre la cárcava que se muestra en la imagen 4.7.

La aplicación del Radar de Penetración Terrestre se efectuó en una campaña realizada el día 3 de diciembre de 2014, donde se obtuvieron tres perfiles GPR en la zona de exploración: el primero (perfil01) con la antena apantallada de 500 MHz, mientras que el segundo y tercero (perfil02 y perfil03 respectivamente) con la antena apantallada de 250 MHz.

	<b>Diámetro [cm]</b>	<b>Profundidad [m]</b>	<b>X [m]</b>	<b>Imagen</b>
Inicio	-	-	0,0	
Madero01	55 x 44	0,75	3,5	
Perfil Metálico	-	2,0	7,4	
Madero02	5,4	1,0	29,7	
Madero03	12,8	1,05	32,9	
Madero04	Grupo de madera	1,15	40,2	
Fin	-	-	43	

**Tabla 4.1** Tabulación del inicio y final del perfil02, posición de los maderos y perfil metálico incrustados en la cárcava.  
[Fuente: Elaboración propia]

En las imágenes 4.8, 4.9 y 4.10 se muestran fotografías de la campaña.



**Imagen 4.8** Campaña, exploración perfil01. [Fuente: Elaboración propia]



**Imagen 4.9** Campaña, trazado perfil02 y georeferenciación de los puntos de los maderos enterrados. [Fuente: Elaboración propia]



**Imagen 4.10** Campaña, exploración perfil02. [Fuente: Elaboración propia]

#### 4.4. Resultados.

Al analizar los perfiles adquiridos en la campaña –y en un procesado preliminar- se ajustaron los parámetros como la velocidad de propagación de la onda en ceniza húmeda (perfil01) y ceniza seca (perfil02). Además se pudo observar en el perfil idealizado (perfil02) como se ve la madera en un Radargrama. Y finalmente se interpretó un Radargrama (perfil03).

El procesado de los Radargrama se realizó con el software Windows GroundVision de MALA.

En los Radargramas, el eje horizontal indica la distancia de avance (en metros) desde el inicio de estos. En el eje vertical izquierdo se indica el tiempo de viaje de la onda, en microsegundo, y en el eje vertical derecho se indica la profundidad estimada, en metros.

##### 4.4.1. Calibración.

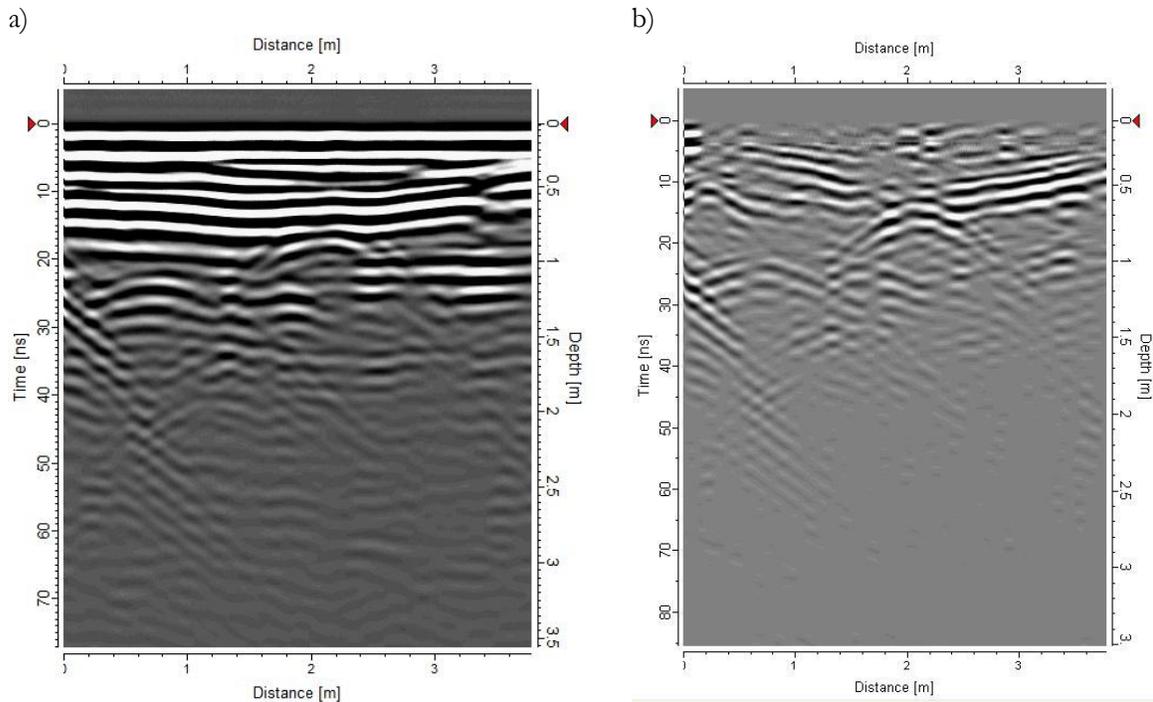
La velocidad de propagación de la onda se ajustó para ceniza seca y húmeda, las cuales se obtuvieron del perfil01 y perfil02 respectivamente (ver tabla 4.2).

Además se muestra como se ve en el Radargrama la madera enterrada en la ceniza. Esto se muestra en el perfil idealizado perfil02.

El perfil01 tiene una longitud aproximada de 4 metros, en la imagen 4.11 se muestra el Radargrama del perfil01 sin filtro (imagen 4.11a) y filtrado (imagen 4.11b). En ambos se puede ver las parábolas generadas por los perfiles metálicos incrustados en la ceniza húmeda.

	<b>Velocidad de Propagación de la Onda [m/μs]</b>
Ceniza Húmeda	90
Ceniza Seca	100

**Tabla 4.2** Velocidad de propagación de la onda en ceniza seca y húmeda. [Fuente: Elaboración propia]



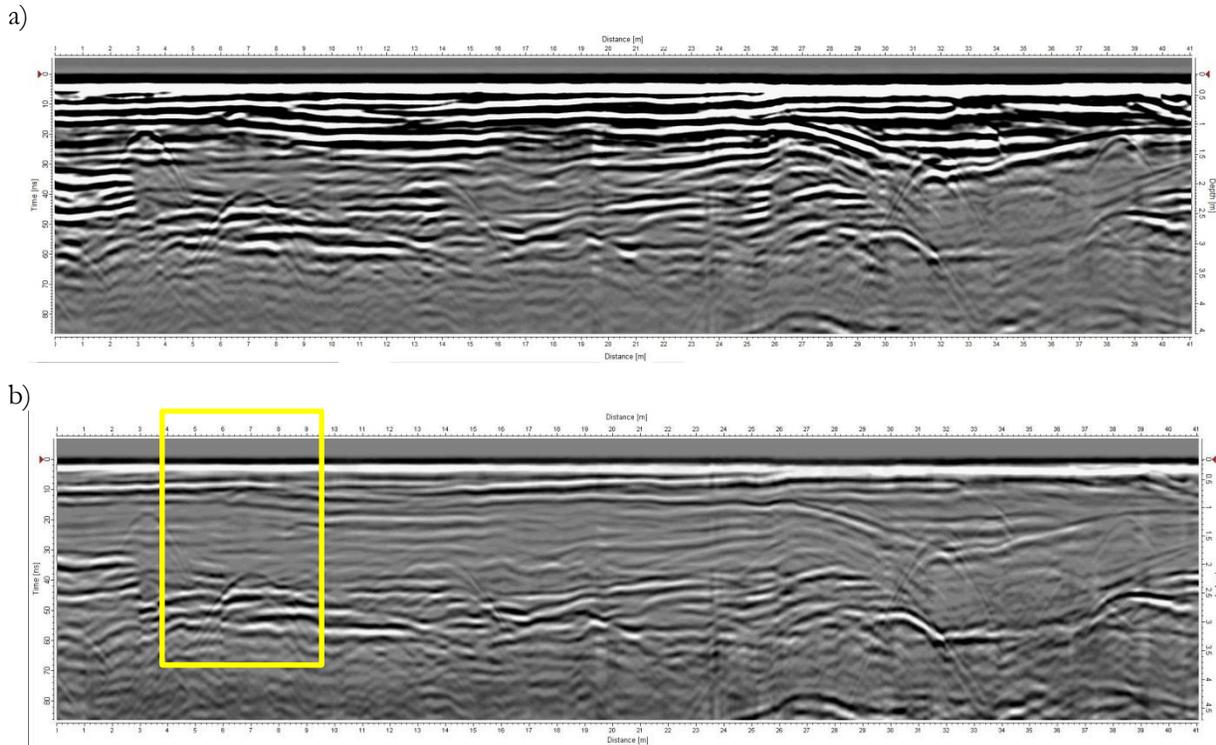
**Imagen 4.11** a) Radargrama perfil01sin filtros. b) Radargrama perfil01 aplicado filtros. [Fuente Elaboración Propia].

En el procesado al Radargrama del perfil01 (imagen 4.11b) se aplicaron los siguientes filtros: Band pass, Subtract mean trace, time Varying Gain y Running Overage. Disponible en el software.

En este Radargrama (imagen 4.11b) se pueden ver las parábolas generadas por los perfiles metálicos incrustados en la ceniza húmeda – la primera a los 0,8 metros a una profundidad de 1,0 m y la segunda a los 2,1 metros a una profundidad de 0,5 metros –, lo que coincide con la idealización del perfil, ajustando la velocidad en  $90 \text{ m}/\mu\text{s}$ .

El perfil02 tiene una longitud aproximada de 41 metros, en la imagen 4.12 se muestra el Radargrama del perfil02 sin filtro (imagen 4.12a) y filtrado (imagen 4.12b). Allí se observan las reflexiones parabólicas generadas por los maderos y el perfil metálico incrustados en la cárcava de ceniza seca.

En el procesado del Radargrama del perfil02 (imagen 4.12b) se aplicó el filtro Automatic Gain Control, disponible en el software.

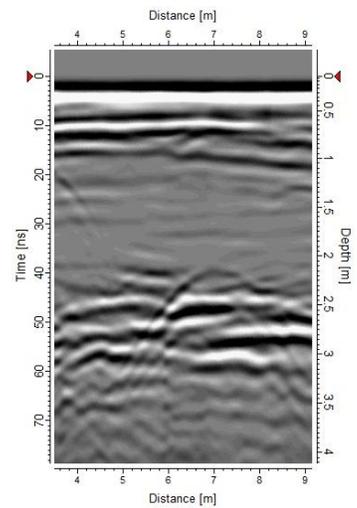


**Imagen 4.12** a) Radargrama perfil02 sin filtro. b) Radargrama perfil02 aplicado filtro. [Fuente: Elaboración Propia]

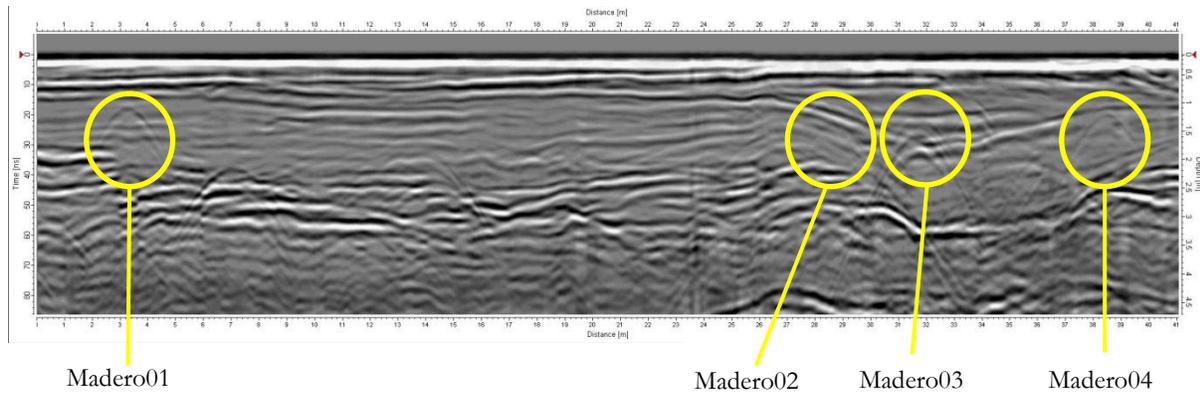
La velocidad de propagación de onda en la ceniza seca se ajustó utilizando la reflexión generada por el perfil metálico incrustado en la ceniza a dos metros de profundidad. En la imagen 4.13 se muestra la sección del Radargrama del perfil02 donde se encuentra el perfil metálico a 7,2 metros y al ajustar la velocidad en  $100\text{ m}/\mu\text{s}$  coincide con la idealización.

Una vez ajustada la velocidad de propagación de la onda en el Radargrama perfil02 se observan las reflexiones parabólicas que generan los maderos incrustados en la ceniza, en este perfil idealizado – que se muestra en la imagen 4.14 –. El madero01 se observa a los 3,4 metros, el madero02 a los 28,7 metros, el madero03 a los 31,7 metros, y el madero04 a los 39 metros, todos ellos coinciden con la profundidad indicada en la tabla 4.1.

Cabe señalar que la diferencia de la ubicación, con respecto a lo señalado en la tabla 4.1, es por la forma de arco que tienen la cárcava ya que las medidas de ubicación indicadas en la tabla 4.1 fueron tomadas en el borde de ésta, mientras que el GPR se pasó más al interior reduciendo el radio del arco, lo cual produjo esta diferencia en la ubicación de los maderos en el Radargrama con respecto al perfil idealizado.

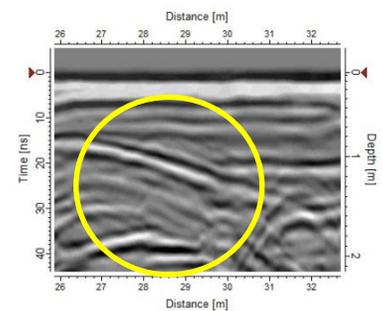


**Imagen 4.13** Sección del Radargrama perfil02, reflexión del perfil metálico. [Fuente: Elaboración propia]



**Imagen 4.14** Radargrama perfil02, señalando las reflexiones de los maderos. [Fuente: elaboración propia].

Además entre los 26 metros y los 32 metros del perfil02 (imagen 4.14) se observó un buzamiento de origen estratigráfico, el cual debilitó las reflexiones que produjo el madero02, como se observa en la imagen 4.15.



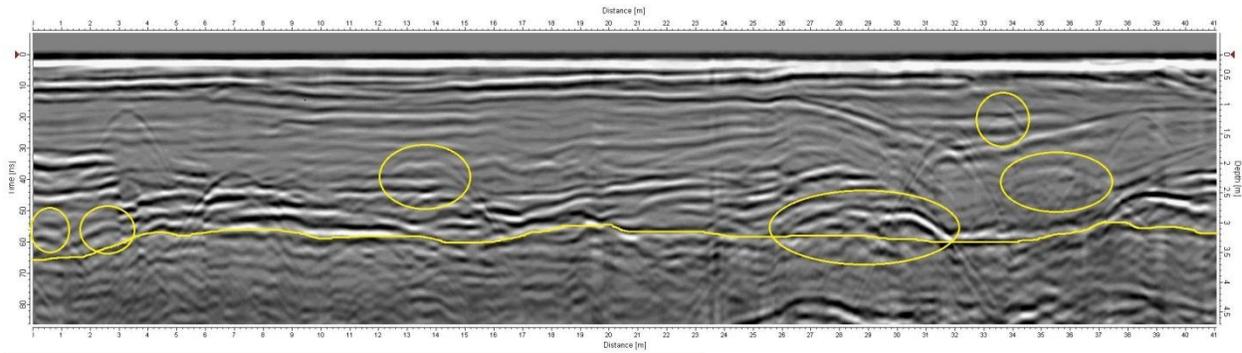
**Imagen 4.15** Sección del Radargrama perfil02, buzamiento estratigráfico y reflexión madero02. [Fuente: Elaboración Propia]

#### 4.4.2. Interpretación.

En el Radargrama del perfil02 se pueden observar otras reflexiones (imagen 4.16) a las idealizadas, las que se tabulan en la tabla 4.3 que corresponderían a madera depositada en el lugar producto de la acumulación de sedimentos posterior a la erupción del volcán Chaitén. Además bajo los 3 metros, por las reflexiones observadas, se puede deducir que hay un cambio estratigráfico que correspondería al lecho rocoso de la cuenca del río Blanco, como se señala en la imagen 4.16.

Distancia [m]	Profundidad [m]
0,46	2,8
2,5	2,7
13,1	1,8
14,0	1,8
27,5	2,7
28,5	2,6
30,2	2,6
33,5	0,8
35,0	1,9

**Tabla 4.3** Tabulación de coordenadas en el perfil02 de reflexiones distintas a las idealizadas. [Fuente: Elaboración propia]



**Imagen 4.16** Radargrama perfil02, reflexiones distintas a las idealizadas. [Fuente: Elaboración Propia]

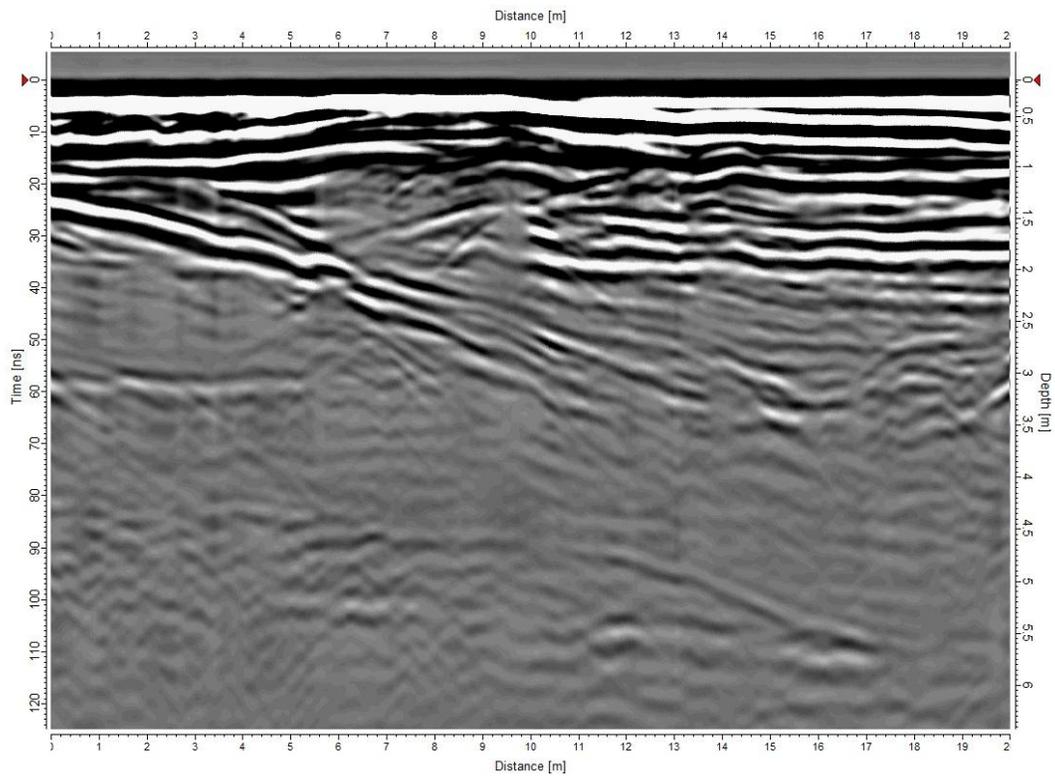
El Radargrama del perfil03 tiene una longitud de 20 metros, en la imagen 4.17 se muestra el perfil sin filtro (imagen 4.17a) y filtrado (imagen 4.17b).

En el procesado al Radargrama del perfil03 (imagen 4.17b) se aplicaron los siguientes filtros: Band pass, Subtract mean trace, time Varying Gain y Background Removal. Disponible en el software.

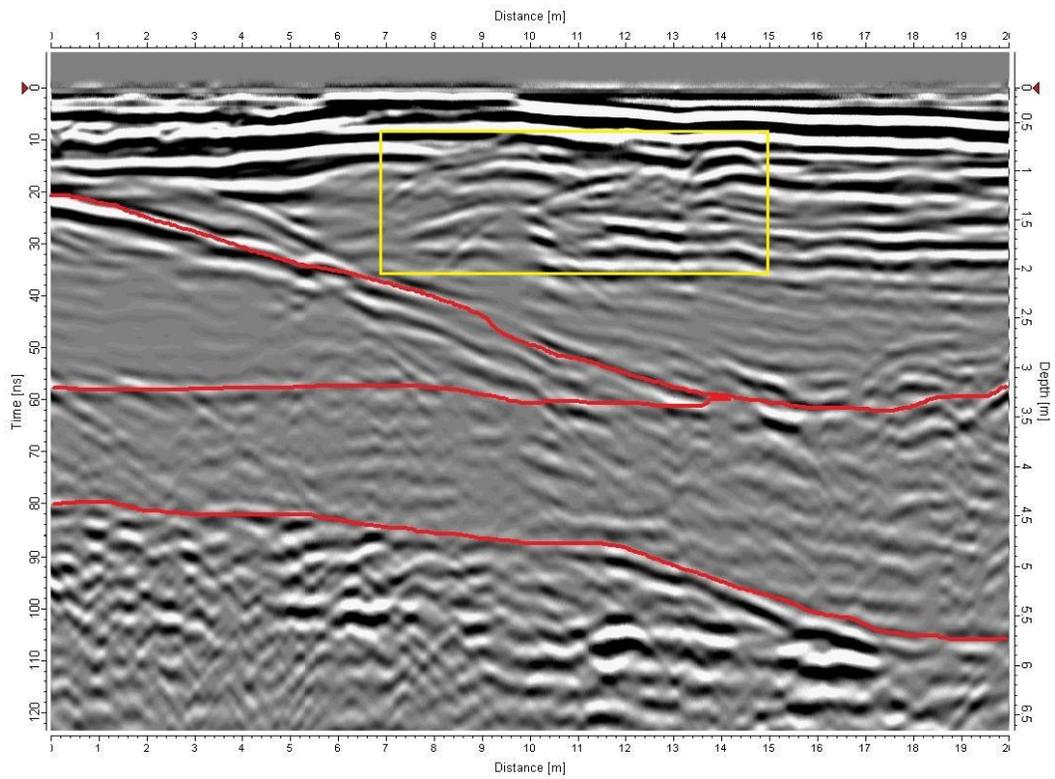
Del Radargrama perfil03 (imagen 4.17b) se observan cuatro estratos. El correspondiente a la acumulación de ceniza volcánica de la última erupción del volcán Chaitén, donde se aprecia un buzamiento que se inicia en 0,0 metros a una profundidad de 1,20 metros y al finalizar a los 13,5 metros a una profundidad de 3,3 metros. Bajo el buzamiento se observa un segundo estrato que puede corresponder a un sedimento anterior a la erupción que tiene su interfaz a los 3,2 metros. Bajo esto, y por el tipo de reflexiones, se deduce que corresponde al lecho rocoso de la cuenca del río Blanco y más profundo bajo los 4.5 metros se observa otra interfaz, donde producto de la reflexiones, se cree que corresponde a un estrato rocoso de mayor tamaño que el estrato superior.

Además se puede observar entre los 7 metros y 14 metros de distancia y a una profundidad entre los 0,7 metros y 1,5 metros una serie de reflexiones que pueden atribuirse a la presencia de madera enterrada dentro de la cárcava.

a)



b)



**Imagen 4.17** a) Radargrama perfil03 sin filtro. b) Radargrama perfil03, aplicado filtros e identificando la interfaz de los estratos y zona donde se visualiza reflexiones. [Fuente: Elaboración Propia]

## 5. Conclusiones

Al término de la revisión de la literatura existente en diversas bases de datos -relativos a la aplicación o uso del Radar de Penetración Terrestre- aparecieron diversos antecedentes, que permiten concluir que es un sistema con aplicación multidisciplinaria.

Es un equipo geofísico, versátil, de alta resolución, no invasivo y de gran alcance que ha mostrado buenos resultados en aplicaciones en Arqueología y Patrimonio, Ingeniería Civil, y Geología, teniendo en cuenta las limitaciones del sistema, como la dispersión al aplicar en medios altamente conductivos – con alto contenido de materiales ferromagnéticos, salinos y alto contenido de agua – que disminuye la penetración y la posibilidad de visualizar las reflexiones de los objetos en estudio.

En Arqueología, el Radar de Penetración Terrestre se ha aplicado en el descubrimiento, mapeo y delimitación de artefactos y estructuras arqueológicas, donde esta información se utiliza para definir las zonas de excavación. El sistema ha demostrado ser de gran apoyo en las exploraciones arqueológicas al poder delimitar con gran precisión las áreas de excavación, lo que ha conllevado a un gran ahorro de energía, tiempo, costos, y una disminución del impacto de una excavación en un yacimiento, en comparación con los métodos tradicionales de exploración.

Así también, el Radar de Penetración Terrestre se aplica en la investigación para la restauración de Monumentos Patrimoniales, donde se ha utilizado para mapear la estructura interna de zonas no visibles de fundaciones y muros, descubrir restauraciones anteriores al identificar discontinuidades en los radargramas, estudiar fracturas, entre otras. Cabe señalar que los avances obtenidos con el GPR en ingeniería civil son aplicados en estudios realizados en estructuras patrimoniales.

En Ingeniería Civil el GPR se ha aplicado en la caracterización de los materiales de construcción en una estructura, evaluación de hormigones, diagnóstico de pavimentos, en inspecciones de puente y en geotecnia.

En la caracterización de los materiales de construcción se ha utilizado para medir la dimensión del espesor del recubrimiento, ubicación de acero de refuerzo y ductos.

En la evaluación de hormigones, donde se ha podido medir el contenido de humedad, identificar irregularidades como cavidades y segregación del hormigón.

En el análisis de estructura, se ha utilizado para el estudio de la ubicación y profundidad de fracturas, ubicación y corrosión del acero de refuerzo y estudio de geometría de algún componente no visible o desconocido de las estructuras.

En el diagnóstico de pavimentos, se utiliza para el estudio de grietas –ubicación y profundidad–, para medir espesores –capas de pavimentos, base y sub-base–, medir el bombeo, estudiar el contenido de humedad, ubicar armadura de refuerzo –en pavimentos de hormigón armado–.

En las inspecciones de puentes, se utiliza para el estudio de la cubierta de puente donde se puede evaluar el estado de esta, descubrir y medir la profundidad de fracturas y grietas, medir espesor de la cubierta, ubicar ductos y armadura de refuerzo y diagnóstico de pavimento. Además se puede estudiar la geometría de los componentes del puente –vigas, losa, pilas, etc.– cuando por alguna razón no se dispone de planos.

En geotecnia se ha aplicado el Radar de Penetración Terrestre para evaluar la calidad del suelo y para realizar estudios geotécnicos en zonas donde no se pueden aplicar métodos tradicionales de exploración. Se ha utilizado para detectar inhomogeneidades, cavidades, contenido de arcilla y zonas de subsidencia y estudios estratigráficos.

En Geología el GPR se ha aplicado para realizar Estratigrafías, y estudiar e investigar los procesos Geomorfológicos, Fallas Sísmicas, complementar estudio paleosísmicos y la historia deposicional de la estructura interna de los Sedimentos.

Al aplicar el Radar de Penetración Terrestre es muy importante la elección de la frecuencia de la antena, ya que la profundidad de penetración del GPR depende en gran medida de las propiedades dieléctricas del medio investigado y la frecuencia de la antena utilizada; para un medio, la baja frecuencia de antena aumentan la profundidad de penetración pero la resolución disminuye. El uso de antenas de alta frecuencia aumenta la resolución y disminuye su penetración. Es por esto que la selección del equipo, la frecuencia y el tipo de antena es muy importante y tiene mucha relación con los objetivos de la exploración.

La selección de la antena depende del objetivo y los alcances del estudio que se realizará con el Radar de Penetración Terrestre. La selección de la frecuencia está sujeta a si se requiere mayor penetración o más resolución o ambas. De acuerdo a los estudios revisados, cuando se necesita penetración y resolución para satisfacer los objetivos del estudio, se utilizan antenas de alta y baja frecuencia aprovechando las ventajas de cada una de las antenas con el fin de obtener los resultados deseados.

En la tabla 5.1 se muestran las frecuencias de las antenas del Radar de Penetración Terrestre utilizada por los autores citados en la tesis en sus distintas aplicaciones.

Áreas de Aplicación		Frecuencia ( f )
Arqueología y Patrimonio	Prospecciones Arqueológicas	100MHz – 1,5GHz
	Patrimonio	100MHz – 2,6GHz
Ingeniería civil	Hormigón	200MHz – 2,5GHz
	Puente	500MHz – 2GHz
	Pavimentos	250MHz – 2GHz
	Estudios Geotécnicos	50MHz – 1,6GHz
Geología	Estratigrafía	100MHz – 900MHz
	Geomorfología	100MHz – 500MHz
	Fallas Sísmicas	25MHz – 500MHz
	Sedimentología	25MHz – 500MHz

**Tabla 5.1** Rangos de frecuencias de aplicación de las antenas del Radar de Penetración Terrestre.

De acuerdo a lo presentado en la tabla 5.1, se puede concluir que, en aplicaciones en Arqueología e Ingeniería civil se utiliza para los estudios con GPR, antenas de mediana ( $100\text{MHz} < f < 1\text{GHz}$ ) y alta ( $f > 1\text{GHz}$ ) frecuencia. En Geotecnia se utiliza antenas de baja ( $f < 100\text{MHz}$ ), mediana y alta frecuencia. Y en Geología se utiliza antenas de baja y mediana frecuencia.

Con el Radar de Penetración Terrestre se pueden efectuar varios tipos de adquisiciones de datos, adquisición en perfiles, adquisiciones puntuales, punto medio común (Common Mid Point, CMP), transiluminación y tomografía, reflexión y refracción de gran ángulo (Wide Angle Reflexión and Refraction, WARR) y Sondeos, el cual se debe seleccionar en función del problema que se quiere estudiar y los resultados que se desean obtener.

En el procesamiento de señales de los Radargramas –que se indican en el apartado 2.7 de la tesis– hay que tener en cuenta las limitaciones, los problemas y las posibilidades de cada tipo de procesado de datos. Para lograr el objetivo se realizan pruebas de los distintos tratamientos de señales posibles y se trabaja con aquel registro donde se observan más claramente las anomalías de interés.

A la hora de la interpretación de los datos obtenidos por el Radar de Penetración Terrestre, los Radargramas, es importante obtener las propiedades dieléctricas de los materiales. Los cuales se pueden obtener realizando ensayos in situ o revisando la literatura o en laboratorio, aunque varios autores citados en este trabajo optan por obtener los datos con ensayos en terreno y posterior a esto comparan con los antecedentes existentes en trabajos anteriores similares. Ya que los datos obtenidos in situ son más precisos y tienen menor incertidumbre que los datos obtenidos en condiciones distintas a las condiciones reales de trabajo.

Para obtener los valores de la velocidad de propagación designan un área conocida como zona de control, la cual puede ser un muro o una sección estructural con diámetros conocidos, un afloramiento, un corte en el terreno, etc. Donde se aplica el GPR y posteriormente se pueda ajustar la velocidad. Esto es importante, ya que la velocidad puede variar si se realiza en otras condiciones, esto puede verse afectado por el contenido de humedad, la segregación, presencia de arcillas o materiales ferromagnéticos. Los cuales pueden diferir en condiciones de laboratorio o con lo descrito en otro momento y lugar registrados en la literatura.

Finalmente, de los trabajos citados se puede concluir que en los últimos diez años aparte de mostrar las aplicaciones y eficacia en la investigación, están trabajando en métodos de automatización y mejoramiento del post-procesado, con el propósito de facilitar la interpretación y aplicación del Radar de Penetración Terrestre en las distintas disciplinas donde tiene cabida.

Con respecto a la aplicación práctica realizada en los sedimentos volcánicos posteriores a la erupción del volcán Chaitén en 2008-2009 y tras una interpretación preliminar se puede concluir que esta campaña logro satisfacer los objetivos propuestos, donde el objetivo general fue mostrar una aplicación práctica del Radar de Penetración Terrestre, y los objetivos específicos: ajustar la velocidad de propagación de la onda en ceniza volcánica seca y húmeda; obtener la firma GPR de madera enterrada en estos sedimentos; y finalmente estudiar un perfil obtenido sobre los sedimentos volcánicos acumulados aguas abajo en la ribera del río Blanco próximo al delta. Se aplicó el Radar de Penetración Terrestre sobre los sedimentos, se ajustó la velocidad de propagación de la onda en ceniza húmeda y seca – e n el perfil01 y perfil02 respectivamente – además se pudo visualizar la madera enterrada en la ceniza con el GPR – perfil02 – y finalmente se interpretó un Radargrama que se obtuvo sobre estos sedimentos – perfil03 –, donde se pudo estudiar la estratigrafía y preliminarmente la composición de los sedimentos.

Como futura línea de trabajo se puede aplicar el Radar de Penetración Terrestre en un trabajo más intenso para estudiar los sedimentos volcánicos de la erupción del Chaitén y su composición.

## 6. Bibliografía.

Abraham, O., & Dérobert, X. (2003). Non-destructive testing of fired tunnel walls: the Mont-Blanc Tunnel case study. *NDT & E International*, 36(6), 411-418.

Abrams, L. J., & Sigurdsson, H. (2007). Characterization of pyroclastic fall and flow deposits from the 1815 eruption of Tambora Volcano, Indonesia using ground-penetrating radar. *Journal of volcanology and geothermal research*, 161(4), 352-361.

Aguilera Rio, C. (2013). .Aproximación del GPR (Ground Penetrating Radar) como ensayo para estimar el estado estructural de un pavimento bituminoso. Comparativa y correlación de datos con ensayo de deflexión. Departamento de Infraestructura del Transporte y Territorio, Univ. Politécnica de Cataluña.

Alani, A. M., Aboutalebi, M., & Kilic, G. (2013). Applications of ground penetrating radar (GPR) in bridge deck monitoring and assessment. *Journal of Applied Geophysics*, 97, 45-54.

Alani, A. M., Aboutalebi, M., & Kilic, G. (2014). Integrated health assessment strategy using NDT for reinforced concrete bridges. *NDT & E International*, 61, 80-94.

Al-Qadi, I. L., & Elseifi, M. A. (2006). Mechanism and modeling of transverse cracking development in continuously reinforced concrete pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 7(4), 341-349.

Al-Qadi, I. L., & Lahouar, S. (2005). Measuring layer thicknesses with GPR—Theory to practice. *Construction and building materials*, 19(10), 763-772.

Al-Qadi, I. L., Lahouar, S., Loulizi, A., Elseifi, M. A., & Wilkes, J. A. (2004). Effective approach to improve pavement drainage layers. *Journal of transportation engineering*, 130(5), 658-664.

Anderson, K. B., Spotila, J. A., & Hole, J. A. (2003). Application of geomorphic analysis and ground-penetrating radar to characterization of paleoseismic sites in dynamic alluvial environments: an example from southern California. *Tectonophysics*, 368(1), 25-32.

Arias, P., Armesto, J., Di-Capua, D., González-Drigo, R., Lorenzo, H., & Pérez-Gracia, V. (2007). Digital photogrammetry, GPR and computational analysis of structural damages in a mediaeval bridge. *Engineering Failure Analysis*, 14(8), 1444-1457.

Ashworth, P. J., Sambrook Smith, G. H., Best, J. L., Bridge, J. S., Lane, S. N., Lunt, I. A., ... & Thomas, R. E. (2011). Evolution and sedimentology of a channel fill in the sandy braided South Saskatchewan River and its comparison to the deposits of an adjacent compound bar. *Sedimentology*, 58(7), 1860-1883.

Avila, J., & Garduño, V (2008). A GPR study of subsidence-creep-fault processes in Morelia, Michoacán, Mexico. *Engineering Geology*, 100(1), 69-81.

Barba, L., Blancas, J., Ortiz, A., & Ligorred, J. (2009). GPR detection of karst and archaeological targets below the historical centre of Merida, Yucatán, Mexico. *Studia UBB, Geologia*, 54(2), 27-31.

Barilaro, D., Branca, C., Gresta, S., Imposa, S., Leone, A., & Majolino, D. (2007). Ground penetrating radar (GPR) surveys applied to the research of crypts in San Sebastiano's church in Catania (Sicily). *Journal of Cultural Heritage*, 8(1), 73-76.

Barrile, V., & Pucinotti, R. (2005). Application of radar technology to reinforced concrete structures: a case study. *NDT & E International*, 38(7), 596-604.

Bavusi, M., Loperte, A., Lapenna, V., Moscatelli, U., & Minguzzi, S. (2010). Magnetic and ground penetrating radar for the research of Medieval buried structures in Marche Region. *Advances in Geosciences*, 24(24), 89-95.

Beaupretre, S., Garambois, S., Manighetti, I., Malavieille, J., Sénéchal, G., Chatton, M., Davies, T., Larroque, C., Rousset, D., Cotte, N., & Romano, C. (2012). Finding the buried record of past earthquakes with GPR-based palaeoseismology: a case study on the Hope fault, New Zealand. *Geophysical Journal International*, 189(1), 73-100.

Beben, D., Anigacz, W., & Ukleja, J. (2013). Diagnosis of bedrock course and retaining wall using GPR. *NDT & E International*, 59, 77-85.

Belli, K., Wadia-Fascetti, S., & Rappaport, C. (2008). Model based evaluation of bridge decks using ground penetrating radar. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23(1), 3-16.

Benedetto, A. (2013). A three dimensional approach for tracking cracks in bridges using GPR. *Journal of Applied Geophysics*, 97, 37-44.}

Benedetto, A., & Pensa, S. (2007). Indirect diagnosis of pavement structural damages using surface GPR reflection techniques. *Journal of applied geophysics*, 62(2), 107-123.

Benedetto, A., Benedetto, F., & Tosti, F. (2012a). GPR applications for geotechnical stability of transportation infrastructures. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 27(3), 253-262.

Benedetto, A., Manacorda, G., Simi, A., & Tosti, F. (2012b). Novel perspectives in bridges inspection using GPR. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 27(3), 239-251.

Berenguer, J., Berenguer, J., & Gallardo, F. (1999). El evanescente lenguaje del arte rupestre en los Andes atacameños. *Arte rupestre en los Andes de Capricornio*, 9-56.

Bhatti, A., Khan, M., & Ahmed, Z. (2010). Applications of Ground Penetrating Radar in Civil Engineering and Geology: case studies from Pakistan. *Journal of Himalayan Earth Sciences*, 43, 22-22.

Bini, M., Fornaciari, A., Ribolini, A., Bianchi, A., Sartini, S., & Coschino, F. (2010). Medieval phases of settlement at Benabbio castle, Apennine mountains, Italy: evidence from Ground Penetrating Radar survey. *Journal of Archaeological Science*, 37(12), 3059-3067.

Bonomo, N., Cedrina, L., Osella, A., & Ratto, N. (2009). GPR prospecting in a prehispanic village, NW Argentina. *Journal of Applied Geophysics*, 67(1), 80-87.

Bonomo, N., Osella, A., & Ratto, N. (2010). Detecting and mapping buried buildings with Ground-Penetrating Radar at an ancient village in northwestern Argentina. *Journal of Archaeological Science*, 37(12), 3247-3255.

Bubeck, A., Wilkinson, M., Roberts, G. P., Cowie, P. A., McCaffrey, K. J. W., Phillips, R., & Sammonds, P. (2014). The tectonic geomorphology of bedrock scarps on active normal faults in the Italian Apennines mapped using combined ground penetrating radar and terrestrial laser scanning. *Geomorphology*.

Cagnoli, B., & Russell, J. K. (2000). Imaging the subsurface stratigraphy in the Ubehebe hydrovolcanic field (Death Valley, California) using ground penetrating radar. *Journal of volcanology and geothermal research*, 96(1), 45-56.

Carreón-Freyre, D., Cerca, M., & Hernández-Marín, M. (2003). Correlation of near-surface stratigraphy and physical properties of clayey sediments from Chalco Basin, Mexico, using Ground Penetrating Radar. *Journal of Applied Geophysics*, 53(2), 121-136.

Carrivick, J. L., Pringle, J. K., Russell, A. J., & Cassidy, N. J. (2007). GPR-derived sedimentary architecture and stratigraphy of outburst flood sedimentation within a bedrock valley system, Hraundalur, Iceland. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 12(1), 127-143.

Cataldo, R., De Donno, A., De Nunzio, G., Leucci, G., Nuzzo, L., & Siviero, S. (2005). Integrated methods for analysis of deterioration of cultural heritage: the Crypt of “Cattedrale di Otranto”. *Journal of cultural heritage*, 6(1), 29-38.

Chang, C. W., Lin, C. H., & Lien, H. S. (2009). Measurement radius of reinforcing steel bar in concrete using digital image GPR. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1057-1063.

Chen, D. H., & Wimsatt, A. (2009). Inspection and condition assessment using ground penetrating radar. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136(1), 207-214.

Chen, D. H., Won, M., & Hong, F. (2009). Investigation of settlement of a jointed concrete pavement. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 23(6), 440-446.

Chianese, D., Lapenna, V., Di Salvia, S., Perrone, A., & Rizzo, E. (2010). Joint geophysical measurements to investigate the Rossano of Vaglio archaeological site (Basilicata Region, Southern Italy). *Journal of Archaeological Science*, 37(9), 2237-2244.

Chowksey, V., Joshi, P., Maurya, D. M., & Chamyal, L. S. (2011). Ground penetrating radar characterization of fault-generated Quaternary colluvio-fluvial deposits along the seismically active Kachchh Mainland Fault, Western India. *Current Science*, 100(6).

Christie, M., Tsoflias, G. P., Stockli, D. F., & Black, R. (2009). Assessing fault displacement and off-fault deformation in an extensional tectonic setting using 3-D ground-penetrating radar imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 68(1), 9-16.

Clemmensen, L. B., & Nielsen, L. (2010). Internal architecture of a raised beach ridge system (Anholt, Denmark) resolved by ground-penetrating radar investigations. *Sedimentary Geology*, 223(3), 281-290.

Colagrande, S., Ranalli, D., & Tallini, M. (2011). Ground Penetrating Radar Assessment of Flexible Road Pavement Degradation. *International Journal of Geophysics*, 2011.

Courtland, L. M., Kruse, S. E., Connor, C. B., Connor, L. J., Savov, I. P., & Martin, K. T. (2012). GPR investigation of tephra fallout, Cerro Negro volcano, Nicaragua: a method for constraining parameters used in tephra sedimentation models. *Bulletin of volcanology*, 74(6), 1409-1424.

Cruz, P. J., Topczewski, L., Fernandes, F. M., Trela, C., & Lourenço, P. B. (2010). Application of radar techniques to the verification of design plans and the detection of defects in concrete bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(4), 395-407.

Damiata, B. N., Steinberg, J. M., Bolender, D. J., & Zoëga, G. (2013). Imaging skeletal remains with ground-penetrating radar: comparative results over two graves from Viking Age and Medieval churchyards on the Stóra-Seyla farm, northern Iceland. *Journal of Archaeological Science*, 40(1), 268-278.

Daniels, D. J. (Ed.). (2004). *Ground penetrating radar* (Vol. 1). Iet.

Dérobot, X., Iaquina, J., Klysz, G., & Balayssac, J. P. (2008). Use of capacitive and GPR techniques for the non-destructive evaluation of cover concrete. *NDT & E International*, 41(1), 44-52.

Deshraj, T., Koravangatt, D., Ilya, B., Vipul, S., & Rajesh R, N. (2012). Interpretation of Dune Genesis from Sedimentological Data and Ground Penetrating Radar (GPR) Signatures: A Case Study from Ashirmata Dune Field, Mandvi Beach, Gujarat, India. *International Journal of Geosciences*, 2012.

Diamanti, N., & Redman, D. (2012). Field observations and numerical models of GPR response from vertical pavement cracks. *Journal of Applied Geophysics*, 81, 106-116.

- Dios, F., Artigas, D., Recolons, J., Comeron, A., & Canal, F. (1998). Campos electromagnéticos (Vol. 61). Univ. Politèc. de Catalunya.
- Doolittle, J. A., & Bellantoni, N. F. (2010). The search for graves with ground-penetrating radar in Connecticut. *Journal of Archaeological Science*, 37(5), 941-949.
- Dujardin, J. R., Bano, M., Schlupp, A., Ferry, M., Munkhuu, U., Tsend-Ayush, N., & Enkhee, B. (2014). GPR measurements to assess the Emeelt active fault's characteristics in a highly smooth topographic context, Mongolia. *Geophysical Journal International*, ggu130.
- Eisenmann, D. J., Margetan, F. J., Chou, C. P. T., Roberts, R. A., & Wendt, S. E. (2013). Ground penetrating radar applied to rebar corrosion inspection. *AIP Conference Proceedings*, 1511(1),1341
- Ercoli, M., Pauselli, C., Frigeri, A., Forte, E., & Federico, C. (2014). 3-D GPR data analysis for high-resolution imaging of shallow subsurface faults: the Mt Vettore case study (Central Apennines, Italy). *Geophysical Journal International*, ggu156.
- Ettinger, S., Manville, V., Kruse, S., & Paris, R. (2014). GPR-derived architecture of a lahar-generated fan at Cotopaxi volcano, Ecuador. *Geomorphology*, 213, 225-239.
- Evans, R. D., Frost, M. W., Stonecliffe-Jones, M., & Dixon, N. (2006). Ground-penetrating radar investigations for urban roads.
- Fauchard, C., Dérobert, X., Cariou, J., & Côte, P. (2003). GPR performances for thickness calibration on road test sites. *Ndt & E International*, 36(2), 67-75.
- Feagin, R. A., Yeager, K. M., Brunner, C. A., & Paine, J. G. (2013). Active fault motion in a coastal wetland: Matagorda, Texas. *Geomorphology*, 199, 150-159.
- Fiedler, S., Illich, B., Berger, J., & Graw, M. (2009). The effectiveness of ground-penetrating radar surveys in the location of unmarked burial sites in modern cemeteries. *Journal of Applied Geophysics*, 68(3), 380-385.
- Fiore, J., Pugin, A., & Beres, M. (2002). Sedimentological and GPR studies of subglacial deposits in the Joux Valley (Vaud, Switzerland): backset accretion in an esker followed by an erosive jökulhlaup. *Géographie physique et Quaternaire*, 56(1), 19-32.
- Froese, D. G., Smith, D. G., & Clement, D. T. (2005). Characterizing large river history with shallow geophysics: Middle Yukon River, Yukon Territory and Alaska. *Geomorphology*, 67(3), 391-406.
- Gacitúa, G. (2006). Estudio en Estructuras de Hormigón Armado Mediante el Usode un Radar de Penetración Terrestre. Tesis para optar al Título de Ingeniero Electrónico, UACH.

García, F., Ramírez, M., Rodríguez, I., Martínez, R., Tort, I., Benlloch, J., & Montalvá Conesa, J. L. (2007). GPR technique as a tool for cultural heritage restoration: San Miguel de los Reyes Hieronymite Monastery, 16th century (Valencia, Spain). *Journal of Cultural Heritage*, 8(1), 87-92.

Gertisser, R., Cassidy, N. J., Charbonnier, S. J., Nuzzo, L., & Preece, K. (2012). Overbank block-and-ash flow deposits and the impact of valley-derived, unconfined flows on populated areas at Merapi volcano, Java, Indonesia. *Natural hazards*, 60(2), 623-648.

Girardi, J. D., & Davis, D. M. (2010). Parabolic dune reactivation and migration at Napeague, NY, USA: Insights from aerial and GPR imagery. *Geomorphology*, 114(4), 530-541.

Gomez, C., Lavigne, F., Hadmoko, D. S., Lespinasse, N., & Wassmer, P. (2009). Block-and-ash flow deposition: a conceptual model from a GPR survey on pyroclastic-flow deposits at Merapi Volcano, Indonesia. *Geomorphology*, 110(3), 118-127.

Gomez, C., Lavigne, F., Lespinasse, N., Hadmoko, D. S., & Wassmer, P. (2008). Longitudinal structure of pyroclastic-flow deposits, revealed by GPR survey, at Merapi Volcano, Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(4), 439-447.

Gómez, D., & Martín, T. (2012). Assessing the risk of subsidence of a sinkhole collapse using ground penetrating radar and electrical resistivity tomography. *Engineering Geology*, 149, 1-12.

Gómez, D., Martín, S., Martín, T., Márquez, A., Lillo, J., López, I., & Carreño, F. (2006). Characterization of volcanic materials using ground penetrating radar: a case study at Teide volcano (Canary Islands, Spain). *Journal of applied geophysics*, 59(1), 63-78.

Gómez, D., Montesinos, F. G., Martín, T., Solla, M., Arnosó, J., & Vélez, E. (2014). Combination of geophysical prospecting techniques into areas of high protection value: Identification of shallow volcanic structures. *Journal of Applied Geophysics*, 109, 15-26.

Gontz, A. M., Moss, P. T., & Wagenknecht, E. K. (2013). Stratigraphic Architecture of a Regressive Strand Plain, Flinders Beach, North Stradbroke Island, Queensland, Australia. *Journal of Coastal Research*, 30(3), 575-585.

Gosar, A. (2012). Analysis of the capabilities of low frequency ground penetrating radar for cavities detection in rough terrain conditions: the case of Divača cave, Slovenia. *Acta Carsologica*, 1(41), 77-88.

Grote, K., Hubbard, S., Harvey, J., & Rubin, Y. (2005). Evaluation of infiltration in layered pavements using surface GPR reflection techniques. *Journal of Applied Geophysics*, 57(2), 129-153.

Gutiérrez, F., Galve, J. P., Lucha, P., Castañeda, C., Bonachea, J., & Guerrero, J. (2011). Integrating geomorphological mapping, trenching, InSAR and GPR for the identification and

characterization of sinkholes: a review and application in the mantled evaporite karst of the Ebro Valley (NE Spain). *Geomorphology*, 134(1), 144-156.

Gutiérrez, J. M. (2004). Analisis del Subsuelo Utilizando Tecnicas Geofisicas. Sistema Georadar RAMAC/GPR. In *TopCart 2004 [Archivo de ordenador]* (pp. 87-88). Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía de Madrid..

Halabe, U. B., Hing, C. L., Klinkhachorn, P., & GangaRao, H. V. (2007, March). Subsurface defect detection in FRP bridge decks using ground penetrating radar. In *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation (Vol. 894, No. 1, pp. 1443-1452)*. AIP Publishing.

Hao Chen, D., Hong, F., Zhou, W., & Ying, P. (2014). Estimating The Hot Mix Asphalt Air Voids From Ground Penetrating Radar. *NDT & E International*.

Hasan, M. I., & Yazdani, N. (2014). Ground Penetrating Radar Utilization In Exploring Inadequate Concrete Covers In A New Bridge Deck. *Case Studies in Construction Materials*.

Hausmann, J., Steinel, H., Kreck, M., Werban, U., Vienken, T., & Dietrich, P. (2013). Two-dimensional geomorphological characterization of a filled abandoned meander using geophysical methods and soil sampling. *Geomorphology*, 201, 335-343.

Helle, S. K. (2004). Sequence stratigraphy in a marine moraine at the head of Hardangerfjorden, western Norway: evidence for a high-frequency relative sea-level cycle. *Sedimentary Geology*, 164(3), 251-281.

Hemeda, S. (2012). Ground Penetrating Radar Investigations for Architectural Heritage Preservation of the Habib Sakakini Palace, Cairo, Egypt. *International Journal of Conservation Science*, 3(3).

Hœrlé, S., Huneau, F., Salomon, A., & Denis, A. (2007). Using the ground-penetrating radar to assess the conservation condition of rock-art sites. *Comptes Rendus Geoscience*, 339(8), 536-544.

Hong, S., Lai, W. W. L., Wilsch, G., Helmerich, R., Helmerich, R., Günther, T., & Wiggemhauser, H. (2014). Periodic mapping of reinforcement corrosion in intrusive chloride contaminated concrete with GPR. *Construction and Building Materials*, 66, 671-684.

Hornung, J., Pflanz, D., Hechler, A., Beer, A., Hinderer, M., Maisch, M., & Bieg, U. (2010). 3-D architecture, depositional patterns and climate triggered sediment fluxes of an alpine alluvial fan (Samedan, Switzerland). *Geomorphology*, 115(3), 202-214.

Huang, L. S., & Kang, Y. V. (2010). Nondestructive evaluation of thickness and bearing capacity of roadway pavement structure. *traffic*, 10, 11.

Hugenschmidt, J. (2002). Concrete bridge inspection with a mobile GPR system. *Construction and Building Materials*, 16(3), 147-154.

Hugenschmidt, J., & Kalogeropoulos, A. (2009). The inspection of retaining walls using GPR. *Journal of Applied Geophysics*, 67(4), 335-344.

Hugenschmidt, J., & Mastrangelo, R. (2006). GPR inspection of concrete bridges. *Cement and Concrete Composites*, 28(4), 384-392.

Huneau, F., Denis, A., & Salomon, A. (2008). First use of geological radar to assess the conservation condition of a South African rock art site: Game Pass Shelter (KwaZulu-Natal). *South African Journal of Science*, 104(7-8), 251-254.

Idi, B. Y., & Kamarudin, M. (2012). Imaging stratigraphy of Pontian Peatland, Johor Malaysia with ground penetrating radar. *Asian Journal of Earth Sciences*, 5(2), 36-49.

Imposa, S., Barone, F., Gresta, S., & Leone, A. (2009). Ground penetrating radar survey finalized to the recovery of the "S. Agata alla Badia" church in Catania (eastern Sicily, Italy). *Environmental geology*, 58(4), 889-896.

Ismail, N. A., & Saad, R. (2012). A Case Study on Ground Subsidence Using Ground Penetrating Radar. *International Proceedings of Chemical, Biological & Environmental Engineering*, 41.

Ismail, N. A., Saad, R., Nordiana, M. M., & Saufia, A. H. A. (2012). Utilizing Radar Imaging in Identification of Water Table and Sand Stratigraphy. *International Proceedings of Chemical, Biological & Environmental Engineering*, 36.

Jinder, J., Chang, S., & Yu, H. (2006). GPR reflection characteristics and depositional models of mud volcanic sediments-Wushanting mud volcano field, southwestern Taiwan. *Journal of applied geophysics*, 60(3), 179-200.

Jol, H. M. (Ed.). (2008). *Ground penetrating radar theory and applications*. Elsevier.

Kadioglu, S., & Kadioglu, Y. (2010). Picturing internal fractures of historical statues using ground penetrating radar method. *Advances in Geosciences*, 24, 23-34.

Kalogeropoulos, A., Van Der Kruk, J., Hugenschmidt, J., Bikowski, J., & Brühwiler, E. (2013). Full-waveform GPR inversion to assess chloride gradients in concrete. *Ndt & E International*, 57, 74-84.

Kassem, E., Walubita, L., Scullion, T., Masad, E., & Wimsatt, A. (2008). Evaluation of full-depth asphalt pavement construction using X-ray computed tomography and ground penetrating radar. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 22(6), 408-416.

Klysz, G., & Balayssac, J. P. (2007). Determination of volumetric water content of concrete using ground-penetrating radar. *Cement and Concrete Research*, 37(8), 1164-1171.

Klysz, G., Balayssac, J. P., & Laurens, S. (2004). Spectral analysis of radar surface waves for non-destructive evaluation of cover concrete. *NDT & E International*, 37(3), 221-227.

Kruse, S., Mora, R., Ramírez, C., & Alvarado, G. (2010). Ground penetrating radar imaging of tephra stratigraphy on Poás and Irazú volcanoes, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 43, 119-136.

Krysiński, L., & Sudyka, J. (2012). Typology of reflections in the assessment of the interlayer bonding condition of the bituminous pavement by the use of an impulse high-frequency ground-penetrating radar. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 27(3), 219-227.

Krysiński, L., & Sudyka, J. (2013). GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks. *Journal of Applied Geophysics*, 97, 27-36.

Labropoulos, K., & Moropoulou, A. (2013). Ground penetrating radar investigation of the bell tower of the church of the Holy Sepulchre. *Construction and Building Materials*, 47, 689-700.

Lahouar, S., & Al-Qadi, I. L. (2008). Automatic detection of multiple pavement layers from GPR data. *NDT & E International*, 41(2), 69-81.

Lara, L. E. (2009). The 2008 eruption of the Chaitén Volcano, Chile: a preliminary report. *Andean Geology*, 36(1), 125-129.

Lasaponara, R., Masini, N., Rizzo, E., & Orefici, G. (2011). New discoveries in the Piramide Naranjada in Cahuachi (Peru) using satellite, Ground Probing Radar and magnetic investigations. *Journal of Archaeological Science*, 38(9), 2031-2039.

Leng, Z., & Al-Qadi, I. L. (2014). An innovative method for measuring pavement dielectric constant using the extended CMP method with two air-coupled GPR systems. *NDT & E International*, 66, 90-98

Leucci, G., Cataldo, R., & De Nunzio, G. (2007). Assessment of fractures in some columns inside the crypt of the Cattedrale di Otranto using integrated geophysical methods. *Journal of archaeological science*, 34(2), 222-232.

Liu, H., & Sato, M. (2014). In situ measurement of pavement thickness and dielectric permittivity by GPR using an antenna array. *NDT&E International*, 64, 65–71.

Loizos, A., & Plati, C. (2007). Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches. *NDT & E International*, 40(2), 147-157.

Loperte, A., Bavusi, M., Cerverizzo, G., Lapenna, V., & Soldovieri, F. (2011). Ground penetrating radar in dam monitoring: the test case of Acerenza (Southern Italy). *International Journal of Geophysics*, 2011.

Lopes, M., Fornari, M., Taioli, F. (2013). Characterization of the architecture of fluvial bars of the Amazon and Tapajos rivers using GPR (Ground Penetrating Radar). 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Lorenzo, H., Rial, F. I., Pereira, M., & Solla, M. (2011). A full non-metallic trailer for GPR road surveys. *Journal of Applied Geophysics*, 75(3), 490-497.

Lubowiecka, I., Armesto, J., Arias, P., & Lorenzo, H. (2009). Historic bridge modelling using laser scanning, ground penetrating radar and finite element methods in the context of structural dynamics. *Engineering Structures*, 31(11), 2667-2676.

Maierhofer, C. (2003). Nondestructive evaluation of concrete infrastructure with ground penetrating radar. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(3), 287-297.

Maurya, D. M., Goyal, B., Patidar, A. K., Mulchandani, N., Thakkar, M. G., & Chamyal, L. S. (2006). Ground Penetrating Radar imaging of two large sand blow craters related to the 2001 Bhuj earthquake, Kachchh, Western India. *Journal of applied geophysics*, 60(2), 142-152.

Monnier, S., Kinnard, C., Surazakov, A., & Bossy, W. (2014). Geomorphology, internal structure, and successive development of a glacier foreland in the semiarid Chilean Andes (Cerro Tapado, upper Elqui Valley, 30° 08' S., 69° 55' W.). *Geomorphology*, 207, 126-140.

Morcous, G., & Erdogmus, E. (2010). Accuracy of Ground-Penetrating Radar for Concrete Pavement Thickness Measurement. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 24(6), 610-621.

Moropoulou, A., Avdelidis, N. P., Kouli, M., Aggelopoulos, A., & Karmis, P. (2002). Infrared thermography and ground penetrating radar for airport pavements assessment. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 18(1), 37-42.

Moropoulou, A., Labropoulos, K. C., Delegou, E. T., Karoglou, M., & Bakolas, A. (2013). Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage. *Construction and Building Materials*, 48, 1222-1239.

Mulchandani, N., Patidar, A. K., Vaid, S. I., Maurya, D. M. (2007). Late Cenozoic geomorphic evolution in response to inversion: Evidence from Weld and GPR studies in Kim drainage basin, western India. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30, 33-52

Nielsen, L., von Brockdorff, A. S., Bjerager, M., & Surlyk, F. (2009). Three-dimensional architecture and development of Danian bryozoan mounds at Limhamn, south-west Sweden, using ground-penetrating radar. *Sedimentology*, 56(3), 695-708.

Okazaki, H., Nakazato, H., & Kwak, Y. (2013). Application of high-frequency ground penetrating radar to the reconstruction of 3D sedimentary architecture in a flume model of a fluvial system. *Sedimentary Geology*, 293, 21-29.

Orlando, L. (2003). Semiquantitative evaluation of massive rock quality using ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 52(1), 1-9.

Orlando, L. (2012). Detecting steel rods and micro-piles: A case history in a civil engineering application. *Journal of Applied Geophysics*, 81, 130-138.

Orlando, L., & Slob, E. (2009). Using multicomponent GPR to monitor cracks in a historical building. *Journal of Applied Geophysics*, 67(4), 327-334.

Parker, N., Sambrook, G., Ashworth, P., Best, J., Lane, S., Lunt, I., Simpson, C., & Thomas, R. (2013). Quantification of the relation between surface morphodynamics and subsurface sedimentological product in sandy braided rivers. *Sedimentology*, 60(3), 820-839.

Pati, P., Parkash, B., Awasthi, A. K., Acharya, V., & Singh, S. (2011). Concealed thrusts in the Middle Gangetic plain, India—A ground penetrating radar study proves the truth against the geomorphic features supporting normal faulting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(1), 315-325.

Patidar, A. K., Maurya, D. M., Thakkar, M. G., & Chamyal, L. S. (2008). Evidence of neotectonic reactivation of the Katrol Hill Fault during late Quaternary and its GPR characterization. *CURRENT SCIENCE-BANGALORE*-, 94(3), 338.

Pauselli, C., Federico, C., Frigeri, A., Orosei, R., Barchi, M. R., & Basile, G. (2010). Ground penetrating radar investigations to study active faults in the Norcia Basin (central Italy). *Journal of Applied Geophysics*, 72(1), 39-45.

Pedret, J., & Pérez, V. (2012). Estudio de la sensibilidad del Ground Penetrating Radar al contenido en huecos de las mezclas bituminosas en pavimentos de carreteras. *Revista Ingeniería de Obras Civiles*, 1.

Pellicer, X. M., & Gibson, P. (2011). Electrical resistivity and ground penetrating radar for the characterisation of the internal architecture of Quaternary sediments in the Midlands of Ireland. *Journal of Applied Geophysics*, 75(4), 638-647.

Pelpola, C. P., & Hickin, E. J. (2004). Long-term bed load transport rate based on aerial-photo and ground penetrating radar surveys of fan-delta growth, Coast Mountains, British Columbia. *Geomorphology*, 57(3), 169-181.

Pérez, V. (2001). Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico. Dep. de Ingeniería de Terreno, Cartográfica y Geofísica, Univ. Politécnica de Cataluña.

Pérez, V., García, F., & Rodríguez, I. (2008a). GPR evaluation of the damage found in the reinforced concrete base of a block of flats: A case study. *NDT & E International*, 41(5), 341-353.

Pérez, V., Caselles, O., Clapés, J., Osorio, R., Canas, J. A., & Pujades, L. G. (2009). Radar exploration applied to historical buildings: A case study of the Marques de Llió palace, in Barcelona (Spain). *Engineering Failure Analysis*, 16(4), 1039-1050.

Pérez, V., García, F., Pujades, L. G., González Drigo, R., & Di Capua, D. (2008b). GPR survey to study the restoration of a Roman monument. *Journal of Cultural Heritage*, 9(1), 89-96.

Pettinelli, E., Barone, P. M., Di Matteo, A., Mattei, E., & Lauro, S. E. (2012). Mapping the Undiscovered Ruins of Pompeii (Naples, Italy) Using Ground Penetrating Radar. *Archaeometry*, 54(1), 203-212.

Pierson, T., Jon, J., Iroumé, A., Andreoli, A., Ulloa, H., Amigo, Á., Bertin, D. & Castro, J. M. (2014). Accelerated Geomorphic Response to Massive Sediment Loading by the 2008–2009 Eruption of Chaitén Volcano, Chile, Followed by Rapid Recovery. In 2014 GSA Annual Meeting in Vancouver, British Columbia.

Pinel, N., Le Bastard, C., Baltazart, V., Bourlier, C., & Wang, Y. (2011). Influence of layer roughness for road survey by ground penetrating radar at nadir: theoretical study. *Radar, Sonar & Navigation, IET*, 5(6), 650-656.

Plati, C., & Loizos, A. (2012). Using ground-penetrating radar for assessing the structural needs of asphalt pavements. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 27(3), 273-284.

Plati, C., & Loizos, A. (2013). Estimation of in-situ density and moisture content in HMA pavements based on GPR trace reflection amplitude using different frequencies. *Journal of Applied Geophysics*, 97, 3-10.

Porsani, J. L., de Matos Jangelme, G., & Kipnis, R. (2010). GPR survey at Lapa do Santo archaeological site, Lagoa Santa karstic region, Minas Gerais state, Brazil. *Journal of Archaeological Science*, 37(6), 1141-1148.

Proulx-McInnis, S., St-Hilaire, A., Rousseau, A. N., & Jutras, S. (2013). A review of ground-penetrating radar studies related to peatland stratigraphy with a case study on the determination of peat thickness in a northern boreal fen in Quebec, Canada. *Progress in Physical Geography*, 37(6), 767-786.

Pueyo, O., Zamora, S. A., & Pocoví, A. (2005). Aplicación de la prospección geofísica por georradar (GPR) a la delimitación y caracterización de estructuras arqueológicas. Ejemplo de las ruinas del convento agustino de Fraga (Huesca). *Geogaceta*, (38), 131-134.

Pueyo, Ó., Soriano, A., & Casas, A. M. (2009). Characterization of karst hazards from the perspective of the doline triangle using GPR—Examples from Central Ebro Basin (Spain). *Engineering Geology*, 108(3), 225-236.

Quarto, R., Schiavone, D., & Diaferia, I. (2007). Ground penetrating radar survey of a prehistoric site in southern Italy. *Journal of Archaeological Science*, 34(12), 2071-2080.

Ranalli, D., Scozzafava, M., & Tallini, M. (2004). Ground penetrating radar investigations for the restoration of historic buildings: the case study of the Collemaggio Basilica (L'Aquila, Italy). *Journal of cultural heritage*, 5(1), 91-99.

Rashed, M., & Nakagawa, K. (2004). High-resolution shallow seismic and ground penetrating radar investigations revealing the evolution of the Uemachi Fault system, Osaka, Japan. *Island Arc*, 13(1), 144-156.

Rey, J., Martínez, J., & Hidalgo, M. C. (2013). Investigating fluvial features with electrical resistivity imaging and ground-penetrating radar: The Guadalquivir River terrace (Jaen, Southern Spain). *Sedimentary Geology*, 295, 27-37.

Rice, S. P., Church, M., Wooldridge, C. L., & Hickin, E. J. (2009). Morphology and evolution of bars in a wandering gravel-bed river; lower Fraser river, British Columbia, Canada. *Sedimentology*, 56(3), 709-736.

Rodríguez, I., Porsani, L., Santos, V., DeBlasis, A., & Giannini, C. (2009a). GPR and inductive electromagnetic surveys applied in three coastal sambaqu (shell mounds) archaeological sites in Santa Catarina state, South Brazil. *Journal of Archaeological Science*, 36(10), 2081-2088.

Rodríguez, I., Sánchez, M. J., Montoya, I., Gómez, D., Martín, T., & Serra, J. (2009b). Internal structure of the aeolian sand dunes of El Fangar spit, Ebro Delta (Tarragona, Spain). *Geomorphology*, 104(3), 238-252.

Roqué, C., Zarroca, M., & Linares, R. (2013). Subsurface initiation of taffoni in granite terrains—geophysical evidence from NE Spain: geomorphological implications. *Geomorphology*, 196, 94-105.

Ruffell, A., McCabe, A., Donnelly, C., & Sloan, B. (2009). Location and Assessment of an Historic (150–160 Years Old) Mass Grave Using Geographic and Ground Penetrating Radar Investigation, NW Ireland\*. *Journal of forensic sciences*, 54(2), 382-394.

Saarenketo, T., & Scullion, T. (2000). Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of applied geophysics*, 43(2), 119-138.

Sambrook, G. H., Ashworth, P. J., Best, J. L., Woodward, J., & Simpson, C. J. (2006). The sedimentology and alluvial architecture of the sandy braided South Saskatchewan River, Canada. *Sedimentology*, 53(2), 413-434.

Sandweiss, D. H., Kelley, A. R., Belknap, D. F., Kelley, J. T., Rademaker, K., & Reid, D. A. (2010). GPR identification of an early monument at Los Morteros in the Peruvian coastal desert. *Quaternary Research*, 73(3), 439-448.

Sass, O., Krautblatter, M., & Morche, D. (2007). Rapid lake infill following major rockfall (bergsturz) events revealed by ground-penetrating radar (GPR) measurements, Reintal, German Alps. *The Holocene*, 17(7), 965-976.

Sauer, D., & Henningsen, F. (2004). Application of ground-penetrating radar to determine the thickness of Pleistocene periglacial slope deposits. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 167(6), 752-760.

Sbartai, Z. M., Laurens, S., Balayssac, J. P., Arliguie, G., & Ballivy, G. (2006). Ability of the direct wave of radar ground-coupled antenna for NDT of concrete structures. *NDT & E International*, 39(5), 400-407.

Sbartai, Z. M., Laurens, S., Rhazi, J., Balayssac, J. P., & Arliguie, G. (2007). Using radar direct wave for concrete condition assessment: Correlation with electrical resistivity. *Journal of applied geophysics*, 62(4), 361-374.

Sbartai, Z. M., Laurens, S., Viriyametanont, K., Balayssac, J. P., & Arliguie, G. (2009). Non-destructive evaluation of concrete physical condition using radar and artificial neural networks. *Construction and Building Materials*, 23(2), 837-845.

Sbartai, Z., Laurens, S., Viriyametanont, K., Balayssac, J., & Arliguie, G. (2009). Non-destructive evaluation of concrete physical condition using radar and artificial neural networks. *Construction and Building Materials*, 23(2), 837-845.

Shaaban, F., Abbas, M., Atya, A., Hafez, A. (2009). Ground-penetrating radar exploration for ancient monuments at the Valley of Mummies -Kilo 6, Bahariya Oasis, Egypt. *Journal of Applied Geophysics*, 68, 194–202.

Shaaban, F., Ismail, A., Massoud, U., Mesbah, H., Lethy, A., & Abbas, A. M. (2013). Geotechnical assessment of ground conditions around a tilted building in Cairo–Egypt using geophysical approaches. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 13(1), 63-72.

Shaari, A., Millard, S. G., & Bungey, J. H. (2004). Modelling the propagation of a radar signal through concrete as a low-pass filter. *NDT & E International*, 37(3), 237-242.

Shangguan, P., Al-Qadi, I. L., & Lahouar, S. (2014). Pattern recognition algorithms for density estimation of asphalt pavement during compaction: a simulation study. *Journal of Applied Geophysics*, 107, 8-15.

Shaw, M. R., Millard, S. G., Molyneaux, T. C. K., Taylor, M. J., & Bungey, J. H. (2005). Location of steel reinforcement in concrete using ground penetrating radar and neural networks. *NDT & E International*, 38(3), 203-212.

Shukla, S. B., Patidar, A. K., & Bhatt, N. (2008). Application of GPR in the study of shallow subsurface sedimentary architecture of Modwa spit, Gulf of Kachchh. *Journal of Earth System Science*, 117(1), 33-40.

Slater, L., & Niemi, T. M. (2003). Ground-penetrating radar investigation of active faults along the Dead Sea Transform and implications for seismic hazards within the city of Aqaba, Jordan. *Tectonophysics*, 368(1), 33-50.

Solla, M., Lagüela, S., González-Jorge, H., & Arias, P. (2014). Approach to identify cracking in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: Preliminary findings. *NDT & E International*, 62, 55-65.

Solla, M., Lorenzo, H., Novo, A., & Caamaño, J. C. (2012a). Structural analysis of the Roman Bibei bridge (Spain) based on GPR data and numerical modelling. *Automation in Construction*, 22, 334-339.

Solla, M., Lorenzo, H., Rial, F. I., & Novo, A. (2011). GPR evaluation of the Roman masonry arch bridge of Lugo (Spain). *NDT & E International*, 44(1), 8-12.

Solla, M., Lorenzo, H., Rial, F. I., & Novo, A. (2012b). Ground-penetrating radar for the structural evaluation of masonry bridges: Results and interpretational tools. *Construction and Building Materials*, 29, 458-465.

Srinivasan, P., Ravisankar, K., & Thirugnanasambandam, S. (2012). Non-Destructive Evaluation of Concrete Structures with Ground Penetrating Radar and Influencing Parameters. *The IUP Journal of Structural Engineering*, 5(4), 43-52.

Stryk, J., Matula, R., & Pospisil, K. (2013). Possibilities of ground penetrating radar usage within acceptance tests of rigid pavements. *Journal of Applied Geophysics*, 97, 11-26.

Sudyka, J., & Krysiński, L. (2011). Radar technique application in structural analysis and identification of interlayer bonding. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 4(3), 176-184.

Sutton, M. J., & Conyers, L. B. (2013). Understanding Cultural History Using Ground-Penetrating Radar Mapping of Unmarked Graves in the Mapoon Mission Cemetery, Western Cape York, Queensland, Australia. *International Journal of Historical Archaeology*, 17(4), 782-805.

Switzer, A. D., Sloss, C. R., Jones, B. G., & Bristow, C. S. (2010). Geomorphic evidence for mid-late Holocene higher sea level from southeastern Australia. *Quaternary International*, 221(1), 13-22.

Tarussov, A., Vandry, M., & De La Haza, A. (2013). Condition assessment of concrete structures using a new analysis method: Ground-penetrating radar computer-assisted visual interpretation. *Construction and Building Materials*, 38, 1246-1254.

Tong, L. T., Lee, K. H., Yeh, C. K., Huang, Y. T., & Liu, C. Y. (2013). Ground-Penetrating Radar Prospecting in the Peinan Archaeological Site, Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 24(3), 311-321.

Tosti, F., & Benedetto, A. (2012). Pavement pumping prediction using ground penetrating radar. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 1044-1053.

Tosti, F., Patriarca, C., Slob, E., Benedetto, A., & Lambot, S. (2013). Clay content evaluation in soils through GPR signal processing. *Journal of Applied Geophysics*, 97, 69-80.

Urban, T. M., Leon, J. F., Manning, S. W., & Fisher, K. D. (2014). High resolution GPR mapping of Late Bronze Age architecture at Kalavassos- *Ayios Dhimitrios,* Cyprus. *Journal of Applied Geophysics*.

Van Dam, R., Nooren, K., Dogan, M., & Hoek, W. (2014, May). Ground-penetrating radar for sedimentology: methodological advances and examples from the Usumacinta-Grijalva delta plain, Tabasco, México. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 16, p. 13051).

Viriyametanont, K., Laurens, S., Klysz, G., Balayssac, J. P., & Arliguie, G. (2008). Radar survey of concrete elements: Effect of concrete properties on propagation velocity and time zero. *NDT & E International*, 41(3), 198-207.

Viseras, C., Fernández, J., García-García, F., Soria, J. M., Calvache, M. L., & Jáuregui, P. (2009). Dynamics of sedimentary environments in the accelerated siltation of a reservoir: the case of Alhama de Granada, southern Spain. *Environmental geology*, 56(7), 1353-1369.

Vriend, N. M., Hunt, M. L., & Clayton, R. W. (2012). Sedimentary structure of large sand dunes: examples from Dumont and Eureka dunes, California. *Geophysical Journal International*, 190(2), 981-992.

Wang, Z. W., Zhou, M., Slabaugh, G. G., Zhai, J., & Fang, T. (2011). Automatic detection of bridge deck condition from ground penetrating radar images. *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on*, 8(3), 633-640.

Whelley, P. L., Jay, J., Calder, E. S., Pritchard, M. E., Cassidy, N. J., Alcaraz, S., & Pavez, A. (2012). Post-depositional fracturing and subsidence of pumice flow deposits: Lascar Volcano, Chile. *Bulletin of volcanology*, 74(2), 511-531.

<http://www.geophysical.com/>

<http://www.malags.com/>

Yalçiner, C. Ç., Altunel, E., Bano, M., Meghraoui, M., Karabacak, V., & Akyüz, H. S. (2013). Application of GPR to normal faults in the Büyük Menderes Graben, western Turkey. *Journal of Geodynamics*, 65, 218-227.

Yalçiner, C. Ç., Bano, M., Kadioglu, M., Karabacak, V., Meghraoui, M., & Altunel, E. (2009). New temple discovery at the archaeological site of Nysa (western Turkey) using GPR method. *Journal of Archaeological Science*, 36(8), 1680-1689.

Yehia, S., Abudayyeh, O., Nabulsi, S., & Abdelqader, I. (2007). Detection of common defects in concrete bridge decks using nondestructive evaluation techniques. *Journal of Bridge Engineering*, 12(2), 215-225.

Yehia, S., Qaddoumi, N., Farrag, S., & Hamzeh, L. (2014). Investigation of concrete mix variations and environmental conditions on defect detection ability using GPR. *NDT & E International*, 65, 35-46.

Zanzi, L., & Arosio, D. (2013). Sensitivity and accuracy in rebar diameter measurements from dual-polarized GPR data. *Construction and Building Materials*, 48, 1293-1301.

Zhan, R., & Xie, H. (2009). GPR measurement of the diameter of steel bars in concrete specimens based on the stationary wavelet transform. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 51(3), 151-155.

Zhang, F., Xie, X., & Huang, H. (2010). Application of ground penetrating radar in grouting evaluation for shield tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(2), 99-107.

Zheng, W., Li, X., Lam, N., Wang, X., Liu, S., Yu, X., ... & Yao, J. (2013). Applications of integrated geophysical method in archaeological surveys of the ancient Shu ruins. *Journal of Archaeological Science*, 40(1), 166-175.

## **A1. ANEXO 1: Equipo GPR Disponibles en el Mercado**

Tradicionalmente ha habido seis patentes comerciales mundiales de equipos de radar de penetración terrestre, los cuales son:

- GSSI, Estados Unidos.
- MALA, Suecia.
- IDS, Italia.
- SENSORS AND SOFTWARE, Canadá.
- UTSI ELECTRONICS, Reino Unido.
- OKO-2, Rusia.

Donde las marcas con mayor presencia mundial son GSSI de procedencia americana y MALA de Suecia. A continuación, en este apartado se describen los equipos disponibles de estas marcas.

Para mayor información de los equipos de las otras marcas se puede visitar las páginas web de cada una de ellas. Las que son:

GSSI – [www.geophysical.com](http://www.geophysical.com)

MALA – [www.malags.com](http://www.malags.com)

IDS – [www.idscorporation.com](http://www.idscorporation.com)

Sensors and Software – [www.sensoft.ca](http://www.sensoft.ca)

UTSI electronics – [www.utsielectronics.co.uk](http://www.utsielectronics.co.uk)

OKO-2 – [www.geotechru.com](http://www.geotechru.com)

### ***GSSI.***

Geophysical Survey Systems Inc. es de Estados Unidos y es el principal fabricante de equipos GPR. Con productos de última generación diseñados para hacer frente a una amplia gama de aplicaciones existentes. GSSI introdujo el primer sistema comercial de radar de penetración terrestre en 1974.

Los equipos que dispone esta marca se aplican en distintas áreas como la arqueología, geología, medio ambiente e ingeniería estructural. Además contar con un software para el procesamiento de datos.

Los equipos más versátiles que dispone en su página web, [www.geophysical.com](http://www.geophysical.com), son:

- Antenas

GSSI ha desarrollado una serie de antenas para satisfacer las necesidades de una amplia gama de aplicación del radar de penetración terrestre. Todas las antenas son compatibles con cualquier sistema SIR. Las principales características que tienen estas es que sus conectores y cables son robustos, patines de desgaste de larga vida y reemplazables, la electrónica recubierta y sellada, blindaje para eliminar la interferencia sobre el suelo y funcionan de -20° C a 50° C.

En la tabla A1.1 se muestran las antenas, su frecuencia y su penetración. Considerar que la penetración puede variar dependiendo de las condiciones del suelo.

Antena	Frecuencia central	Profundidad de penetración
2600 MHz - High Resolution Concrete Antenna	2600 MHz	0,4 m
2000 MHz - Palm Antenna	2000 MHz	0,4 m
1600 MHz - General Purpose Concrete Antenna	1600 MHz	0,5 m
900 MHz - Shielded Antenna	900 MHz	0-1 m
400 MHz - Shielded Antenna	400 MHz	0-4 m
270 MHz - Shielded Antenna	270 MHz	0-6 m
200 MHz - Shielded Antenna	200 MHz	0-9 m
100 MHz - Shielded Antenna	100 MHz	2-15 m
3200 Multiple Low Frequency Antenna	15-80 MHz	0-50 m
2.0 GHz Horn Antenna	2.0 GHz	0-0,75 m
1.0 GHz Horn Antenna	1.0 GHz	0-0,9 m

**Tabal A1.1** antenas, frecuencia y profundidad de penetración.

- SIR 20

Es un potente multi-canal de la unidad de adquisición de datos GPR, acoplado con un ordenador portátil de alta resistencia. Es compatible con todas las antenas GSSI.

Los usos habituales del equipo incluyen la evaluación de la estructura de carretera, inspección de hormigón, investigación geológica, arqueología, minería, inspección de cubierta de puente, entre otras.



**Imagen A1.1** sistema SIR 20, [Fuente: www.geophysical.com].

- SIR 30

Es una unidad de control de alto rendimiento, que puede obtener hasta ocho canales de datos simultáneamente. Cuenta con filtros avanzados y capacidades de visualización para procesamiento en tiempo real. Es compatible con todas las antenas GSSI.

Este equipo se utiliza para la recolección de datos a alta velocidad, dentro de sus usos habituales se incluyen la evaluación de las estructuras de carreteras, evaluación de cubiertas de puentes, entre otras.

- SIR 3000

Es un sistema pequeño diseñado para el funcionamiento de un solo usuario, que incorpora un procesamiento avanzado de señales y capacidad de visualización de imágenes en 3D en el campo. Es compatible con todas las antenas GSSI.

Los usos habituales del equipo incluyen inspección de hormigón, investigación geológica, arqueología, medicina forense, inspección cubierta del puente, minería, entre otras.

- SIR 4000

Es un sistema de adquisición de datos GPR de alto rendimiento diseñado para funcionar con antenas analógicas y digitales. Incorpora modos de visualización avanzadas y capacidades de filtrado en campo. Es compatible con todas las antenas GSSI.

Dentro de sus aplicaciones encontramos la inspección de concreto, la minería, geología, evaluación ambiental, arqueología y medicina forense.



**Imagen A1.2** Dispositivo SIR 30  
[Fuente: [www.geophysical.com](http://www.geophysical.com)]



**Imagen A1.3** Dispositivo SIR 3000  
[Fuente: [www.geophysical.com](http://www.geophysical.com)]



**Imagen A1.4** Dispositivo SIR 4000,  
[Fuente: [www.geophysical.com](http://www.geophysical.com)].

- RoadScan 30

Es un sistema compuesto por una unida central SIR30 versión de dos canales, antena de bocina de 1GHz o 2GHz, kit montaje SIR-30, cable y display autónomo con monitor externo, teclado y el conjunto de comando a distancia.

El uso típico de este equipo es medir el espesor del pavimento y evaluación de base y sub-base.



**Imagen A1.5** equipo RoadScan 30, [Fuente: www.geophysical.com]

***MALA.***

MALA tiene su sede en Suecia, donde la investigación y desarrollo de productos técnico cumple con los más altos estándares que provee la industria de la tecnología. MALA con su red de oficina y socios regionales esta presente en 113 países.

Los equipos mas versátiles disponibles en su página web, [www.malags.com](http://www.malags.com), son:

- GroundExplorer

Es un equipo GPR con cuatro antenas diferentes: GX80, GX160, GX450 y GX750, conectados a través de un solo cable a la unidad central GX.



**Imagen A1.6** Equipo Groundexplorer, unidad de control GX, único cable y antenas GX80, GX160, GX450 y GX750, [Fuente: www.malags.com].

La unidad de control GX MALA está construido por un procesador 1.6 GHz Intel Atom y cuenta con una pantalla de alta resolución. Además de ser compatible con GPS externo, las antenas MALA GX van desde 80 MHz hasta 750 MHz respectivamente.

- ProEx System

El sistema MALA ProEx es el sistema de Radar de Penetración Terrestre más versátil de la industria y es compatible con todas las antenas MALA.

En la tabla 2.3 se muestran las antenas compatibles con el sistema MALA ProEx.



**Imagen A1.7** Unidad de control ProEx, antena sin blindaje MALA GPR de 25 MHz a 200 MHz y mochila accesorio, [Fuente: www.malags.com].

- Antenas

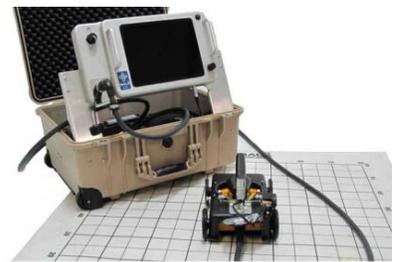
En la tabla A1.2 se muestran las antenas y su frecuencia.

	<b>ANTENA</b>	<b>FRECUENCIA</b>
	MALÀ GPR Shielded Antennas	100, 250, 500 y 800 MHz
	MALÀ GPR Separable Shielded Antennas	200, 400 MHz y 1,3 GHz
	MALÀ GPR HF Antennas	1,2 – 2,3 GHz
	MALÀ GPR Unshielded Antennas	25 – 200 MHz
	MALÀ GPR RTA Antennas	30 – 100 MHz
	MALÀ GPR Borehole Antennas	100 – 250 MHz

**Tabla A1.2** Antenas MALA. [Fuente: [www.malags.com](http://www.malags.com)]

- CX System

El georadar MALA CX System está diseñado para la investigación no destructiva de estructuras. Está compuesto por una unidad central que consta de una interfaz simple, y es compatible con antenas de la línea MALA de alta frecuencia 1,2 GHz, 1,6 GHz y 2,3 GHz.



**Imagen A1.8** Equipo MALA CX System, con una antena MALÀ GPR HF Antennas, [Fuente: [www.malags.com](http://www.malags.com)].

- RAMAC X3M

El sistema GPR RAMAC X3M es compacto, liviano, de bajo consumo de energía, versátil y fácil de usar, es una unidad de control de radar integrado, montado directamente sobre la antena blindada y con alimentación externa. Es compatible con las antenas blindadas de 100 MHz, 250 MHz, 500 MHz y 800 MHz de MALA.

Este dispositivo no requiere cable de fibra óptica, ya que la unidad se comunica directamente con el computador portátil, además es compatible con el software de adquisición Windows GroundVision de MALA.



**Imagen 2.14** Sistema GPR RAMAC X3M con antenas de 250 MHz, 500 MHz y 800 MHz. [Fuente: Elaboración Propia].