



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de un prototipo de georradar (GPR) de bajo coste para
detección de minas y UXO*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Álvaro Castro Patudo

DIRECTORES: Mercedes Solla Carracelas
José María Núñez Ortuño

CURSO ACADÉMICO: 2017-2018

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de un prototipo de georradar (GPR) de bajo coste para
detección de minas y UXO*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

En el presente trabajo se plantea un prototipo simulado de *GPR* que puede ser empleado para experimentación y pruebas en la detección de minas y artefactos sin detonar (*UXO, Unexploded Ordnance*). Su desarrollo se ha basado en tecnología de radio definida por software (*SDR, Software Defined Radio*), diseñándose los esquemas de transmisión y recepción correspondientes a los tipos de forma de onda más habituales en el ámbito del *GPR*.

Los resultados obtenidos por el prototipo simulado a partir de los esquemas propuestos se han contrastado con aquellos obtenidos, para un georradar comercial, en un escenario simulado mediante la herramienta *GPRMax*.

Finalmente, se propone una implementación basada en elementos de bajo coste y de fácil disponibilidad en el mercado (*COTS – Commercial Off The Shelf*) con el fin de evaluar los esquemas de transmisión y recepción propuestos para cada forma de onda. Para ello, se transmiten las formas de onda propuestas mediante el empleo de un *SDR*, comprobándose su correcta generación.

PALABRAS CLAVE

GPR, Radargrama, Señal, SDR, UXO, Mina

AGRADECIMIENTOS

Aprovechando estas líneas que se me presentan, quiero realizar en primer lugar, un especial agradecimiento a mis tutores D. José María Núñez Ortuño y D^a. Mercedes Solla Carracelas, por que si este trabajo ha visto la luz ha sido tambien gracias a su esfuerzo y dedicación así como de su ayuda en cualquier momento de incertidumbre que se me ha presentado.

Dedicar estas líneas tambien a mi padre, madre y hermano (Pili, tu tambien) por que sin ellos me habria faltado un pilar sin el cual no habria conseguido mis objetivos pese a los malos momentos, nunca se apartan de mi lado. Estos agradecimientos no serían justos si no aparecieran ellos.

No quiero terminar de agradecer sin mencionar a mis compañeros de camareta L2 (Montesinos, Rivera y Cabezudo) que me han soportado durante estos dos últimos años y con los que he compartido muy buenos momentos que pronto, si Dios quiere, quedarán en recuerdos.

Por último, quiero dedicarle este trabajo a toda la gente que alguna vez me dijo que no lo conseguiría.

CONTENIDO

Índice de Figuras.....	5
Índice de Tablas	7
1 introducción y objetivos.....	8
1.1 Contextualización	8
1.2 Necesidades del trabajo	9
1.3 Objetivos.....	11
1.3.1 Objetivos generales.....	11
1.3.2 Objetivos específicos	11
2 Estado del arte.....	13
2.1 Concepto de GPR	13
2.1.1 Definición y características.....	13
2.1.2 Componentes de un GPR.....	15
2.2 Historia del <i>GPR</i>	18
2.3 Empleo civil del GPR.....	18
2.3.1 Arqueología	18
2.3.2 Criminología y Geología Forense.....	19
2.3.3 Ingeniería Civil	20
2.3.4 Geología.....	22
2.4 Empleo militar del GPR	23
2.4.1 Detección y posicionamiento de minas y UXO.....	24
2.4.2 Detección de espacios subterráneos.....	27
3 Fundamentos del GPR	29
3.1 Ecuaciones de Maxwell.....	29

3.1.1	Velocidad de propagación y propiedades dieléctricas de los medios...	31
3.1.2	Coeficiente de reflexión.....	34
3.2	Frecuencia, resolución espacial y rango de penetración.....	34
3.2.1	Resolución vertical	34
3.2.2	Resolución horizontal	35
3.2.3	Rango de penetración.....	35
3.3	Tipos de señal GPR	35
3.3.1	Pulso corto	36
3.3.2	Onda Continua con Frecuencia Modulada (FMCW).....	38
3.3.3	Onda Continua con Frecuencia Escalonada (SFCW).....	39
4	Desarrollo del TFG	43
4.2	Fabricación y pruebas del GPR	43
4.2.1	Hardware.....	43
4.3	Simulación SDR.....	45
4.3.1	Diagrama de bloques FMCW	46
4.3.2	Diagrama de bloques SFCW.....	50
4.4	Simulación numérica de un GPR comercial.....	52
4.4.1	Ensayos con gprMax.....	53
5	Resultados obtenidos	57
5.1	Resultados simulación numérica del <i>GPR</i> comercial.....	57
5.2	Resultados GPR realizados en el laboratorio.	60
6	Conclusiones y líneas futuras	62
6.1	Conclusiones.....	62
6.2	Líneas Futuras	63
7	Bibliografía	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Bomba de aviación encontrada en Laos [3].....	9
Figura 1-2 Vehículo HUSKY con GPR extendido [9]	10
Figura 2-1 Esquema de funcionamiento de un GPR [11].....	14
Figura 2-2 Radargrama de una prospección realizada para estudiar la onda de un GPR en una antena de 500 MHz [12].....	14
Figura 2-3 Georradar de la marca comercial Malå Geoscience.....	15
Figura 2-4 Antenas biestáticas: pajarita (izquierda) y vivaldi (derecha) [14] [15]....	16
Figura 2-5 Unidad de control ProEx de la compañía Malå Geoscience [17]	17
Figura 2-6 Ordenador portátil (izquierda) y odómetro (derecha)	17
Figura 2-7 Radargrama perteneciente al subsuelo de la ciudad de Pontevedra donde se aprecian restos de la antigua muralla [23]	19
Figura 2-8 Lecturas de GPR en una fosa común en Argentina [30].....	20
Figura 2-9 a) Vista de un puente objeto de estudio, b) y c) Radargramas que muestran posibles elementos desconocidos del interior del puente [31].....	21
Figura 2-10 Esquema con diferentes tuberías con sus respectivas profundidades (izquierda) y radargrama de las mismas (derecha) [32]	21
Figura 2-11 Esquema de detección de dos barras de acero en una estructura de hormigón armado (izquierda) y imagen 3D (time-slice) de una estructura de hormigón armado (derecha) [33].....	22
Figura 2-12 Esquema generado por análisis de superposición (izquierda) e isosuperficie generada con el software GPR-SLICE (derecha) [34]	22
Figura 2-13 Radargrama correspondiente a la estratificación del suelo (izquierda) y su interpretación (derecha) [35]	23
Figura 2-14 Imagen de la aeronave encontrada en el interior del glaciar [36]	23
Figura 2-15 Radargrama correspondiente a la aeronave [36].....	24
Figura 2-16 Vehículo C-IED PEROCC (izquierda) [40] y UGV con dispositivo AMULET (derecha) [41].....	24
Figura 2-17 Radargrama correspondiente a la detección de una mina PMA-3 de origen yugoslavo [42]	25
Figura 2-18 Soldados españoles abriendo el GPR del vehículo Husky 2G [44]	25
Figura 2-19 Proyecto de GPR montado sobre un UAV [46].....	26
Figura 2-20 GPR de rescate ubicado en una zona catastrófica en Chengdu (China) y operadores de rescate en la misma provincia observando la recepción de datos del GPR (izquierda y derecha, respectivamente) [39].....	26
Figura 2-21 Radargrama de un bunker (parte superior) obtenido con una antena de 200 MHz y esquema de interpretación del mismo (parte inferior).....	27

Figura 2-22 TU-214 equipado con georradar. Este avión fue desplegado en 2016 para hacer frente al DAESH en Siria [47]	27
Figura 3-1 Representación de una onda electromagnética y sus tres ejes [50].....	31
Figura 3-2 Esquema de los modos de trabajo divididos en categorías.	36
Figura 3-3 Diagrama de bloques de un <i>GPR</i> pulsado [49]	37
Figura 3-4 Graficas más comunes en radar pulsado. a) Impulso b) monopulso, y c) pulso modulado [52]	37
Figura 3-5 Gráfica FMCW donde podemos observar la frecuencia de batido f_B [53]	38
Figura 3-6 Esquema de funcionamiento simplificado de radar FMCW [49]	39
Figura 3-7 Gráfica SFCW [54]	40
Figura 3-8 Diagrama de bloques de un GPR con modo SFCW [55].....	40
Figura 4-1 Antenas empleadas para la realización del GPR.....	43
Figura 4-2 HackRF empleados en el desarrollo del GPR. Transmisor (Izquierda) y Receptor (Derecha)	44
Figura 4-3 GPR realizado para efectuar las pruebas de laboratorio	45
Figura 4-4 Interface del software <i>SDR</i> GNURadio con el diagrama de bloques del <i>GPR</i> en <i>FMCW</i>	46
Figura 4-5 Grafica generada por GNURadio donde se observa la detección de los objetos simulados mediante los bloques Delay	48
Figura 4-6 Detalle de la gráfica anterior donde se puede diferenciar la detección de ambos objetos simulados	49
Figura 4-7 Diagrama de bloques del modo SFCW realizado en GNURadio.	50
Figura 4-8 Gráfica SFCW generada por el diagrama de bloques	51
Figura 4-9 Diagrama de bloques con retardos incluidos.	51
Figura 4-10 Gráfica generada en GNURadio donde se aprecian las señales generadas por los retardos.....	52
Figura 4-11 Archivo “.in” con el que se va a realizar la simulación	53
Figura 4-12 Archivo “.in” referente al test2 realizado para la simulación numérica	56
Figura 5-1 Archivo “.rad” referente al test1	58
Figura 5-2 radargrama generado en ReflexW perteneciente al test1 donde se aprecian la detección de la plancha metálica y las reflexiones secundarias.....	59
Figura 5-3 Radargrama perteneciente a la segunda medición efectuada donde se observa mayor distancia entre las reflexiones debido al mayor tiempo de detección	60
Figura 5-4 captura de pantalla donde podemos observar el barrido <i>SFCW</i>	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Frecuencias centrales y profundidades de penetración aproximadas [16]....	16
Tabla 3-1 Propiedades dieléctricas de diferentes medios [51]	33
Tabla 3-2 Clasificación de los materiales según su conductividad eléctrica.....	33
Tabla 5-1 Modelos y radargramas del test1 (superior) y el test2 (inferior).....	58

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contextualización

El mundo de la ingeniería se caracteriza por mantener una relación estrecha con los avances tecnológicos. El ingeniero se ha caracterizado por la capacidad para desarrollar y diseñar artefactos que cubran las diferentes necesidades que puedan originarse dentro de las diferentes áreas de trabajo. Un ejemplo de ello es la creación de sistemas de detección de aeronaves o barcos, hoy conocidos como *RADAR* (*Radio Detection And Ranging*).

El *RADAR* es definido como un sistema de radio determinación que realiza una comparación entre la señal transmitida y la señal recibida o reflejada desde la posición que se encuentra el objeto que provocó esa reflexión [1].

Entre sus variantes, el *RADAR* ha encontrado una aplicación terrestre que ha permitido realizar avances en diferentes disciplinas. Esta aplicación terrestre corresponde al nombre de *GPR* (*Ground Penetrating Radar*) o Georradar. El *GPR* se caracteriza por la capacidad de realizar rastreos en el subsuelo y su empleo se extiende desde el mundo de la arqueología o geología, pasando por la criminología hasta el mundo militar.

Dentro del mundo militar, como corresponde a este Trabajo Fin de Grado (*TFG*), el *GPR* se presenta como una herramienta capaz de detectar minas o *UXO* (*Unexploded Ordnance*) como función principal, y la de obtener posiciones subterráneas como búnkeres o túneles. Las minas y *UXO* representan una de las mayores amenazas para las unidades desplegadas en cualquier escenario bélico actual. No obstante, su daño no concluye con la finalización del conflicto (Figura 1-1). Son además los responsables de la muerte y mutilación de unas 15.000 y 20.000 personas en 60 países cada año según informes de Las Naciones Unidas [2].

En este trabajo se busca diseñar un sistema *GPR* que permita la detección de estos artefactos, ofreciendo además una alternativa de bajo coste dentro del mercado de los sistemas de detección de minas.



Figura 1-1 Bomba de aviación encontrada en Laos [3]

1.2 Necesidades del trabajo

Los ejércitos actuales, incluidas nuestras *FAS* (Fuerzas Armadas), se ven inmersos en conflictos de carácter asimétrico en los que grupos insurgentes llevan a cabo hostigamientos mediante el empleo de *IED* (*Improved Explosive Device*) o minas. De esta amenaza surgen contramedidas basadas en cuatro principios [4]:

- Prever: Mediante la observación de zonas susceptibles de ser usadas como emplazamiento de *IED* por parte de la insurgencia. Para ello se hace útil el empleo de drones.
- Detectar: La detección de *UXO* puede llevarse a cabo dentro de un amplio espectro de métodos, como puede ser la detección magnética, el empleo de cámaras térmicas y multiespectrales o Radar de Penetración Terrestre (*GPR*).
- Neutralizar: Enfocado a la desactivación por control remoto una vez localizado el artefacto, o bien mediante la inhibición de la señal de radiofrecuencia, en el caso de artefactos RF.
- Mitigar: Principio encaminado a la protección frente a ataques con *UXO* e *IED*. Esto consiste en el desarrollo de vehículos y protección personal que aguanten impactos producidos por la onda expansiva de la detonación, como pueden ser los llamados vehículos *MRAP* (*Mine Resistant Ambush Protected*) [5].

Dentro del principio de detección, en el que se encuentra encuadrado, el empleo de *GPR* para la detección de *UXO* goza de gran éxito dentro de la comunidad científica y en el mundo de la seguridad y defensa [6]. Esto es debido a la posibilidad de emplearlo como sensor único o bien combinándolo con otro sensor como, por ejemplo, un detector de metales. El *GPR* ha resultado ser un éxito a la hora de detectar tanto minas metálicas como no metálicas [7].

En la actualidad, existen numerosos dispositivos y vehículos con capacidad contraminas que emplean un *GPR* como instrumento de detección. Un ejemplo de ello, aunque se hablará más adelante en este trabajo, es el vehículo HUSKY 2G de fabricación americana y de reciente adquisición por nuestras *FAS* [8] (Figura 1-2).



Figura 1-2 Vehículo HUSKY con GPR extendido [9]

Si bien, tal y como se menciona en el apartado anterior, las *FAS* disponen de un vehículo equipado con un sistema *GPR* para misiones de reconocimiento de *IED*, en este *TFG* pretendemos realizar el diseño de un *GPR* de bajo coste y peso que opere a frecuencias adecuadas para la detección de minas (antipersonales, contracarro, etc.), así como de *UXO*. Dicho diseño (en términos de dimensiones y peso), se realiza teniendo en cuenta una futura implementación del *GPR* embarcado en un *UAV* (*Unmanned Air Vehicle*) para ser integrado en el seno de pequeñas unidades.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivos generales*

Los objetivos generales de este trabajo son dos. El primero de ellos consistirá en el diseño de un prototipo simulado de *GPR* para experimentación, basado en tecnología de radio definida por software (*SDR, Software Defined Radio*), que emplee varios tipos de formas de onda.

El segundo consistirá en la implementación de dicho prototipo con elementos de bajo coste y de fácil disponibilidad en el mercado (*COTS – Commercial Off The Shelf*).

1.3.2 *Objetivos específicos*

Los objetivos específicos de este trabajo serán el diseño de los esquemas de transmisión y recepción correspondientes a distintos tipos de formas de onda de aplicación en *GPR*, así como en el contraste de los resultados obtenidos a partir de los esquemas propuestos con aquellos obtenidos mediante la simulación de un escenario concreto.

Por otro lado, se empleará un transmisor *SDR* para comprobar la correcta generación de las formas de onda previstas para el *GPR*.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Concepto de GPR

2.1.1 Definición y características

El *GPR* es un método geofísico basado en la propagación de impulsos electromagnéticos muy cortos (1-20 ns) en la banda de frecuencias de 10 MHz a 2.5 GHz [10].

En un sistema *GPR* (Figura 2-1), una antena transmisora emite la señal electromagnética hacia el subsuelo, la cual es parcialmente reflejada cuando encuentra un medio con propiedades dieléctricas diferentes y parcialmente transmitido hacia capas más profundas. La reflexión producida es recibida por una antena receptora en superficie. La intensidad de la reflexión es registrada en términos de amplitud, y esta amplitud es mayor cuando el contraste dieléctrico entre dos medios diferentes (en cuya discontinuidad se produce la reflexión) es mayor. Moviendo la antena por la superficie, se produce una imagen 2D o imagen XZ (radargrama), cuyo eje horizontal X representa el movimiento de la antena a lo largo del perfil radar, mientras que el eje vertical Z representa el tiempo doble (ida y vuelta) del pulso emitido (en nanosegundos). Si la velocidad de propagación de la señal electromagnética en el subsuelo es conocida, entonces el eje temporal puede ser convertido a eje de profundidades (en metros).

La principal característica del *GPR* radica en que se trata de un método no invasivo, por lo que permite realizar estudios del terreno sin necesidad de efectuar movimientos de tierra. Además, cabe destacar la posibilidad de efectuar interpretaciones en tiempo real mediante la generación y visualización de imágenes XZ radar (o radargramas) en la pantalla del ordenador, por lo que resulta un método rápido tanto en ejecución como en obtención (Figura 2-2).

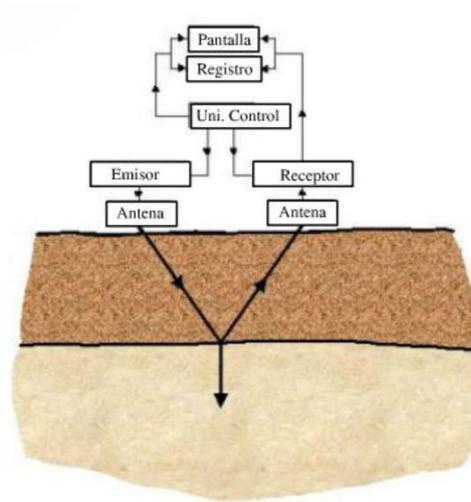


Figura 2-1 Esquema de funcionamiento de un GPR [11]

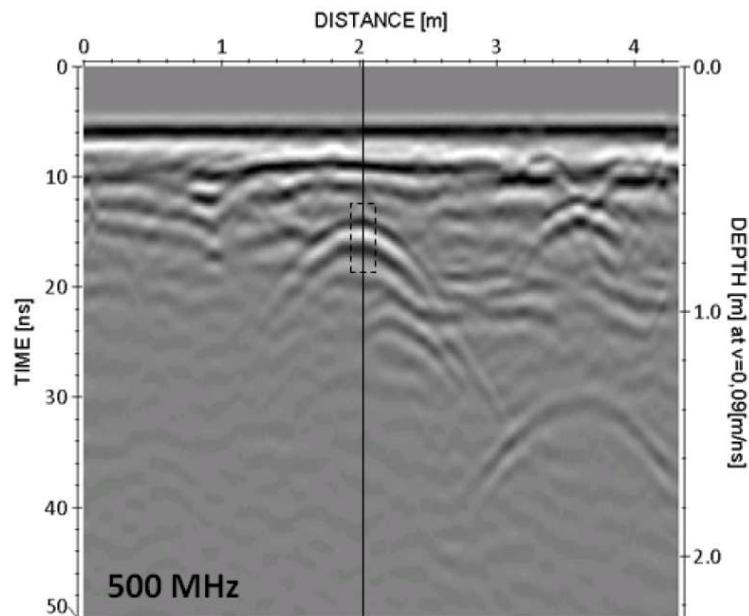


Figura 2-2 Radargrama de una prospección realizada para estudiar la onda de un GPR en una antena de 500 MHz [12]

Pese a todas estas características que hacen del *GPR* un sistema consolidado tanto en el ámbito científico-académico como en el profesional, el *GPR* presenta una serie de inconvenientes y limitaciones. En primer lugar, el método no funciona en suelos conductivos (por ejemplo, arcillas húmedas). Por otro lado, la técnica ofrece una penetración limitada en el subsuelo en función de la frecuencia de trabajo con la que se esté operando. Asimismo, la naturaleza y composición del subsuelo es muy variable, existiendo medios tales como el agua y el cemento que pueden actuar como atenuantes de la señal radar [13].

2.1.2 Componentes de un GPR

Por lo general, los *GPR* constan de tres elementos principales que se tratarán a continuación y que pueden observarse en la Figura 2-3:

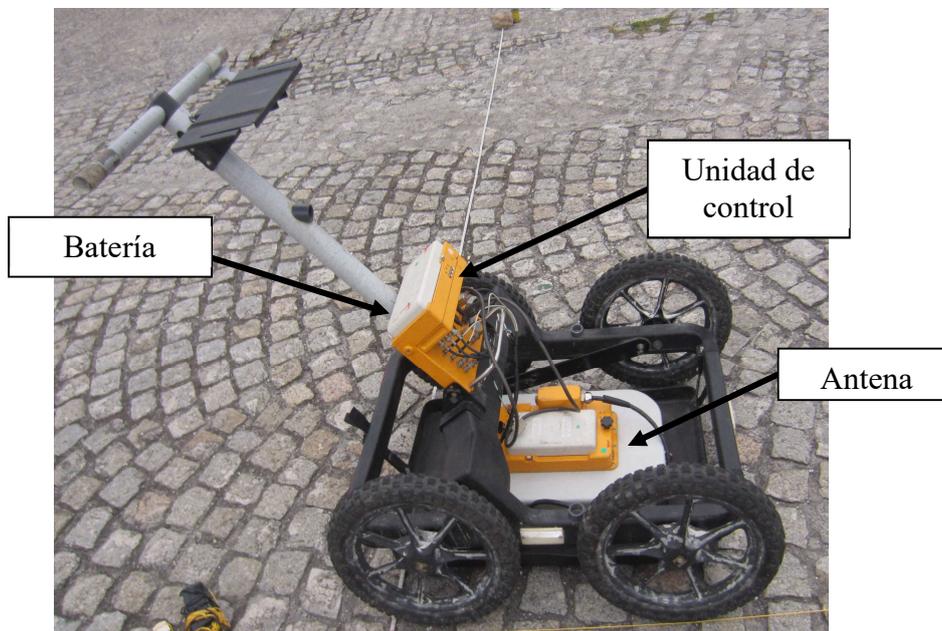


Figura 2-3 Georradar de la marca comercial Malá Geoscience

- **Antenas:** Se suelen emplear antenas que trabajen en modo biestático en la que una antena emite y otra recibe, o en modo monoestático, la misma antena emite y recibe. La mayoría de los sistemas *GPR* emplean antenas biestáticas, estando estas protegidas por una carcasa. Desde hace tiempo se vienen empleando dos tipos de antenas: dispersivas (espiral, Vivaldi) y no dispersivas (bicónicas, de pajarita) como podemos observar en la Figura 2-4. Las primeras consisten en que diferentes frecuencias son radiadas en instantes de tiempo diferentes. Las segundas, no dispersivas, las antenas son intercambiables dependiendo de la profundidad que deseemos obtener, así como de su resolución. Esto quiere decir que, si buscamos efectuar una prospección a escasos centímetros del suelo, emplearemos antenas que oscilen entre 2.3 y 4 GHz, o antenas de 800 MHz a 1 GHz para profundidades entre 1 y 3 metros. Si nuestro propósito es alcanzar profundidades que oscilen entre 3 y 5 metros, emplearemos antenas con un rango entre 300 y 700 MHz. Mientras que, si buscamos gran penetración, de entorno a unos 10 metros o superior, colocaremos antenas cuya frecuencia oscile entre los 10 y 200 MHz.



Figura 2-4 Antenas biestáticas: pajarita (izquierda) y vivaldi (derecha) [14] [15]

Otra manera de caracterizar las antenas es por la frecuencia central de emisión. Esto se origina teniendo en cuenta que la longitud de onda (λ) del pulso emitido depende de la frecuencia (f) y la velocidad de la señal en el aire (c) como observamos en la ecuación 1:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{Ecuación 1}$$

De la ecuación 1 se deduce que, a mayor frecuencia de emisión, menor longitud de onda, por lo que, en teoría, la atenuación será mayor provocando una disminución en la penetración. Al adentrarnos en este trabajo, se definirán otros factores que contribuyen a la atenuación de la onda demostrando que una mayor profundidad no implica menor frecuencia. En la Tabla 2-1 podemos observar la profundidad a unas determinadas frecuencias centrales para unas determinadas condiciones lo cual no implica que sean tomadas como valores irrefutables, si no que nos aportan una idea aproximada de los alcances de cada frecuencia.

Frecuencia Central (MHz)	Profundidad Máx. de Penetración (m)
1000	1
400	3
200	8
100	15
50	25
25	40
10	50

Tabla 2-1. Frecuencias centrales y profundidades de penetración aproximadas [16]

- **Unidad de control:** La unidad de control es la encargada de coordinar y controlar los sistemas electrónicos de la antena y de los demás accesorios del *GPR*. En ella se configura la adquisición y salida de datos, así como la gestión y ajuste de las antenas. La configuración de la unidad de control se lleva a cabo desde un software (característico de cada marca comercial) instalado en el ordenador.



Figura 2-5 Unidad de control ProEx de la compañía Malå Geoscience [17]

- **Aparatos auxiliares:** El principal elemento auxiliar es un ordenador portátil (Figura 2-6 izquierda). Desde él podemos configurar la unidad de control, ya que da soporte al SDR a través del software específico del sistema. Además, el ordenador nos permite almacenar información y la visualización en tiempo real de los resultados obtenidos. La unidad de control suele llevar incorporado un reloj para la medición de tiempo y, a mayores, se puede complementar también con un odómetro (Figura 2-6 derecha), lo que que nos permitirá la adquisición de datos (generación de impulsos radar) tanto por tiempos como por distancias, respectivamente. Otro aparato alternativo muy común que puede ser sincronizado con el sistema *GPR* es un *GPS* (*Global Positioning System*) para obtener la posición exacta, en coordenadas *UTM* (*Universal Transversal Mercator*) absolutas, de las trazas registradas.



Figura 2-6 Ordenador portátil (izquierda) y odómetro (derecha)

2.2 Historia del *GPR*

La teoría que rige el principio de funcionamiento del georradar ha sido desarrollada por Maxwell J.C. y Hertz H.R. a finales del siglo XIX. Por aquel entonces no suscitó mucho interés, lo que no le permitió seguir adelante por falta de medios tecnológicos. No fue hasta 1935 cuando Robert Wattson-Watt efectuó una demostración del empleo del radar para el seguimiento de objetivos aéreos. Gracias a esta nueva invención, los británicos fueron capaces de rechazar los bombarderos alemanes durante la batalla de Inglaterra. Con el radar aéreo eran capaces de interceptar los cazas y bombarderos enemigos propiciando un elevado tiempo de reacción para conseguir hacer frente a los alemanes antes de que estuvieran sobre sus ciudades. Era el nacimiento de la guerra aérea. No obstante, no es hasta la década de los 70 del siglo XX cuando se desarrollan los primeros estudios en investigaciones dentro del ámbito de la Geología y Glaciología [18].

En España, el primer trabajo realizado de aplicación *GPR* no se llevó a cabo hasta 1990 de la mano de Henrique Lorenzo con la tesis “Prospección geofísica de alta resolución mediante geo-radar. Aplicación a Obras Civiles” publicada en 1994 [19].

A partir de los años 90, han aumentado considerablemente las tareas de desarrollo y empleo de la técnica, que es ampliamente utilizada en el campo de la ingeniería civil [20], estudios medioambientales [21], geotecnia [22], arqueología [23] y militar entre otros [24]. A continuación, se describirá brevemente cada una de estas aplicaciones en función de su empleo en los diferentes ámbitos, civil o militar.

2.3 Empleo civil del *GPR*

2.3.1 *Arqueología*

Una de las aplicaciones más extendidas del georradar ha sido en el campo de la arqueología. Esto se debe a la característica no invasiva del método, que lo hace propicio para la detección y ubicación de posibles restos arqueológicos como: antiguos asentamientos, cavidades subterráneas, etc. Pero lo más beneficioso para la arqueología reside en el trabajo, tiempo y dinero que nos permite ahorrar el empleo del *GPR* en comparación con los métodos tradicionales de excavación y catas. El *GPR* permite identificar aquellas zonas de mayor interés para ser excavadas, en lugar de realizar una excavación de todo el terreno más costosa y aparatosa. Las frecuencias empleadas en aplicaciones arqueológicas oscilan entre 200 y 500 MHz [25].

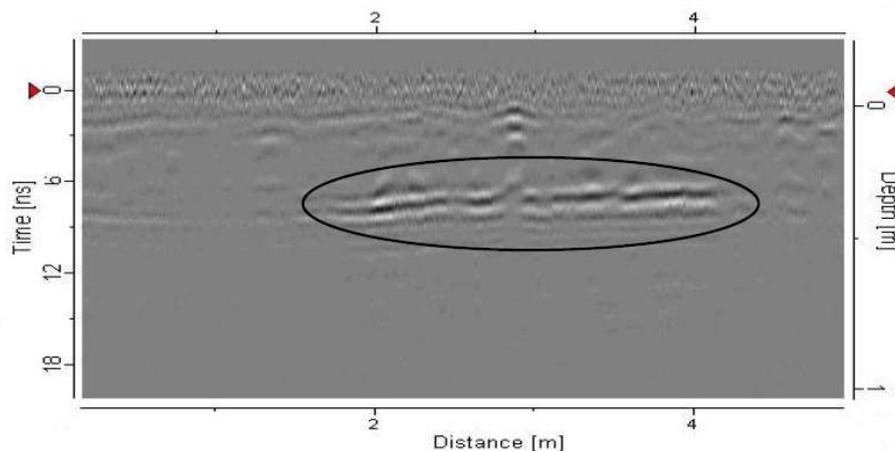


Figura 2-7 Radargrama perteneciente al subsuelo de la ciudad de Pontevedra donde se aprecian restos de la antigua muralla [23]

2.3.2 Criminología y Geología Forense

Dentro de sus aplicaciones, el *GPR* ha sido considerado como una herramienta útil para la búsqueda de cuerpos, no solo dentro del campo de la investigación policial, sino también en el de la memoria histórica dentro de conflictos bélicos tanto a nivel nacional como internacional.

Para llevar a cabo lecturas del subsuelo relativas a esta disciplina, se emplea un rango de frecuencias que oscila entre los 500 MHz y 900 MHz. Esto permite obtener un pulso muy corto (900 MHz) siendo efectiva para objetos enterrados cercanos a la superficie como pueden ser cadáveres, o bien, perturbaciones que oscilen entre 0,5 y 3,5 metros de profundidad (500 MHz) donde pueden encontrarse la mayoría de las piezas de interés forense [26].

Dentro del campo de la criminología, el *GPR* ha sido empleado para realizar rastreos en búsqueda de restos de víctimas de asesinato dentro del ámbito policial. Dos casos conocidos por la opinión pública son los referentes a la búsqueda de Marta del Castillo [27] y la de los niños de 6 y 2 años Ruth y José en Córdoba [28].

En relación con la geología forense, la ley de la memoria histórica ha propiciado una vez más el empleo de sistemas *GPR* en nuestro país. En este caso, el objeto de estudio era la detección de fosas comunes relativas a la Guerra Civil en España [29]. Estos estudios han sido llevados a cabo también en países como Argentina para la búsqueda de fosas comunes originadas durante la época de la dictadura [30].

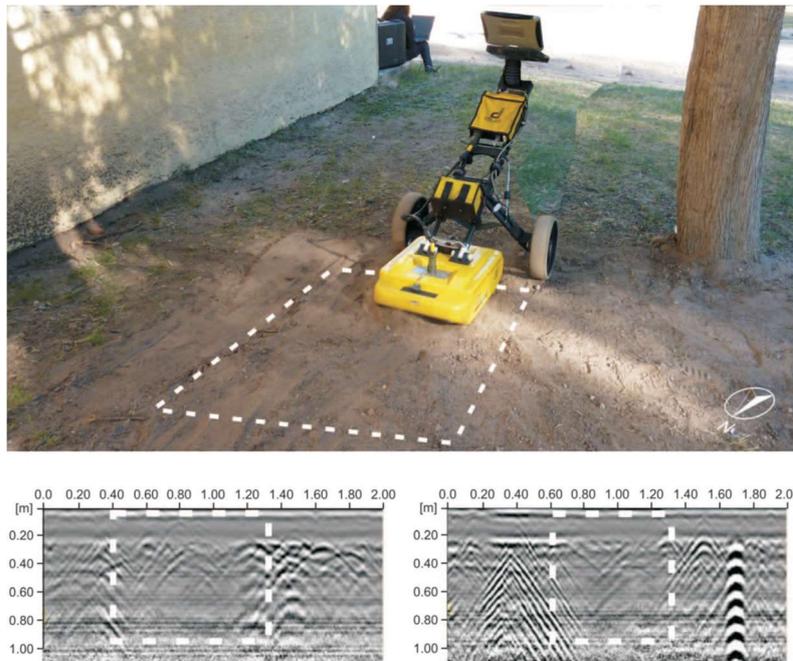


Figura 2-8 Lecturas de GPR en una fosa común en Argentina [30]

2.3.3 Ingeniería Civil

La ingeniería civil posiblemente sea el campo donde el *GPR* ha resultado de mayor utilidad. Las aplicaciones que a continuación nombraremos son sólo un ejemplo de las posibilidades que ofrece el georradar en este ámbito:

- **Estudio del estado de puentes:** Los puentes, debido al uso que generan, así como al desgaste sufrido por los diferentes agentes meteorológicos, son estructuras que requieren de una atención especial [13]. Estos estudios tienen por objeto averiguar el estado de conservación de los puentes de cara a posibles reformas y deterioros sufridos como faltas de relleno, corrosión de armaduras, humedades, etc. En el estudio de puentes se suelen emplear antenas de 250-500 MHz [13].

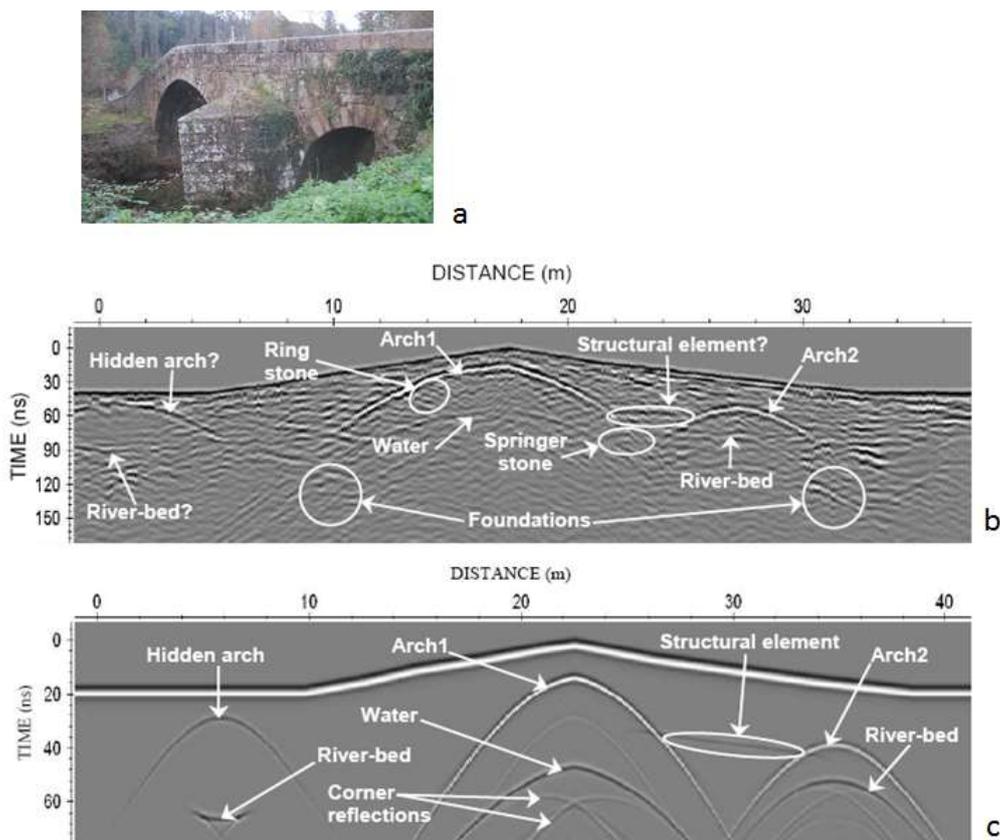


Figura 2-9 a) Vista de un puente objeto de estudio, b) y c) Radargramas que muestran posibles elementos desconocidos del interior del puente [31]

- Hidráulica urbana:** El empleo del *GPR* en este campo permite dos usos principales. El primero es la capacidad de detectar tuberías enterradas. Las tuberías son fácilmente identificables en el radargrama debido a la reflexión hiperbólica que producen. El *GPR* permite también diferenciar entre materiales (tubería de metal, tubería de PVC, etc.), así como su estado interno (llena de aire o agua). La segunda aplicación es la de detectar fugas de agua en redes hídricas [32].

Para efectuar prospecciones de localización de tuberías se emplean antenas con frecuencias entre 500 MHz y 1 GHz.

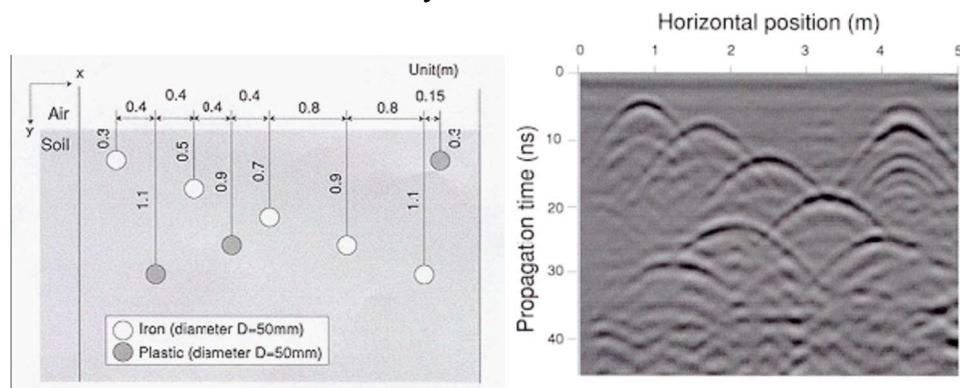


Figura 2-10 Esquema con diferentes tuberías con sus respectivas profundidades (izquierda) y radargrama de las mismas (derecha) [32]

- Localización de armaduras:** Al igual que con las tuberías, las armaduras o barras de acero del hormigón armado también producen una reflexión hiperbólica. Para la detección y mapeado de armaduras se emplean antenas de frecuencia 1,2 GHz [33].

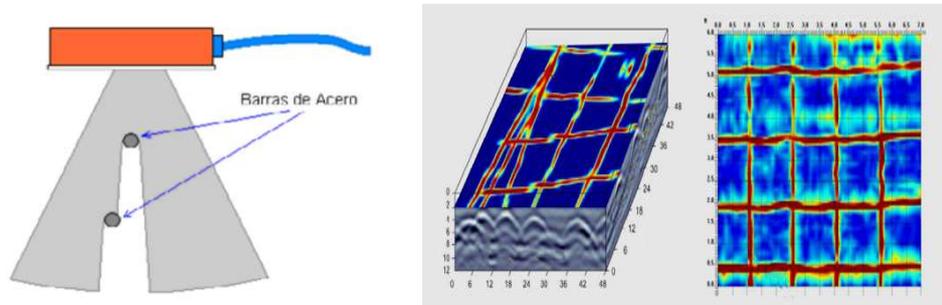


Figura 2-11 Esquema de detección de dos barras de acero en una estructura de hormigón armado (izquierda) y imagen 3D (time-slice) de una estructura de hormigón armado (derecha) [33]

- Inspección de túneles:** El empleo del *GPR* en el estudio de túneles permite analizar sus elementos estructurales (espesores de gunitado, cerchas, etc.) así como la identificación de posibles fisuras u oquedades en las juntas entre la estructura y la roca excavada y que funcionan como entradas de agua y agentes corrosivos. Para llevar a cabo estudios de esta índole se emplean antenas cuyas frecuencias oscilan entre 500 MHz y 2 GHz [34].

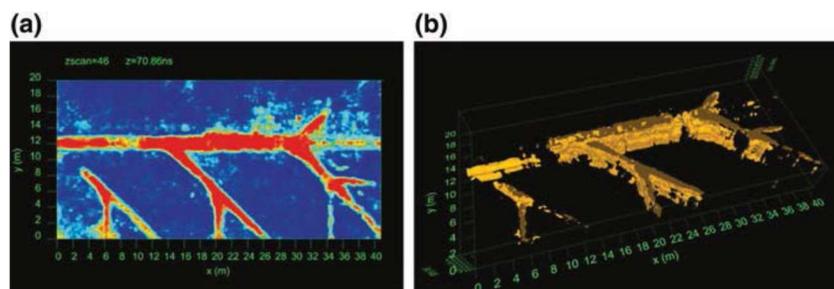


Figura 2-12 Esquema generado por análisis de superposición (izquierda) e isosuperficie generada con el software GPR-SLICE (derecha) [34]

2.3.4 Geología

En geología, el *GPR* ha demostrado ser útil en estudios de localización del nivel freático, estudios de estratigrafía del subsuelo [35], estudios dunares, estudios en zonas volcánicas para determinación de materiales y detección de tubos de lava, etc. Pero posiblemente su uso más amplio radique en la prospección minera y exploración de recursos naturales.

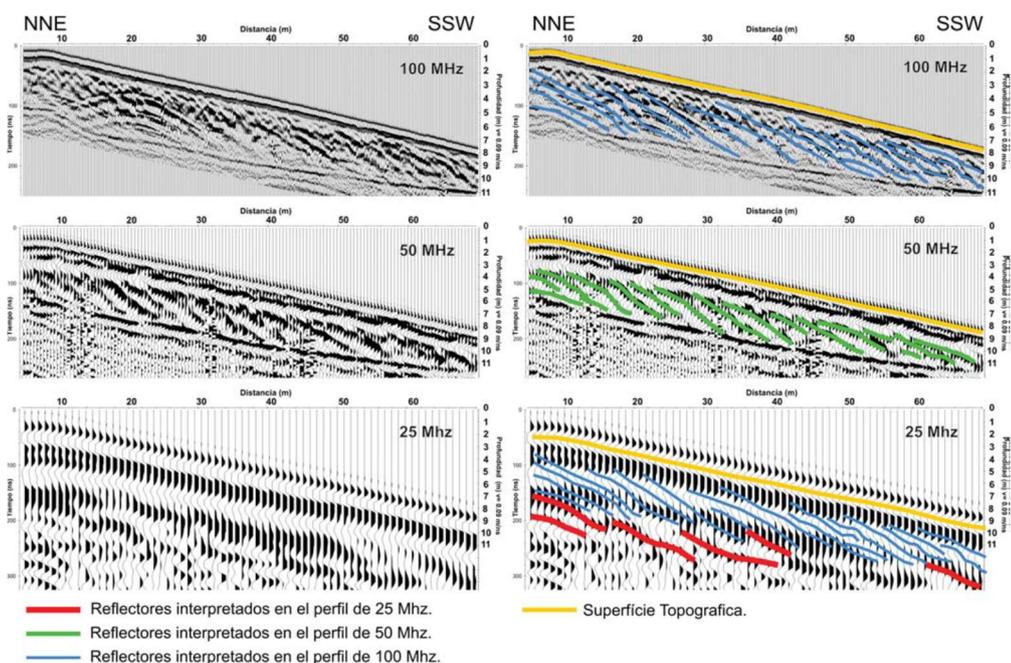


Figura 2-13 Radargrama correspondiente a la estratificación del suelo (izquierda) y su interpretación (derecha) [35]

2.4 Empleo militar del GPR

En el ámbito militar, centro de atención de este trabajo, el *GPR* es empleado por primera vez para realizar una prospección en Groenlandia. El marco dentro del cual fue empleado era el de averiguar la ubicación de un escuadrón de aviones (The Lost Squadron) que en 1942 tuvieron que realizar un aterrizaje de emergencia en el hielo. Se trataba de 6 aviones de caza P-38 y de dos bombarderos B-17. Las tripulaciones fueron rescatadas, pero los aviones no fueron encontrados en ese momento. En 1990, un mecánico de aviones, con la ayuda de un geofísico islandés, empleó un *GPR* para encontrar la ubicación de los 8 aviones desaparecidos. La prospección tuvo un notable éxito, consiguiendo la ubicación de uno de los B-17 y más tarde la de los 7 restantes [36].



Figura 2-14 Imagen de la aeronave encontrada en el interior del glaciar [36]

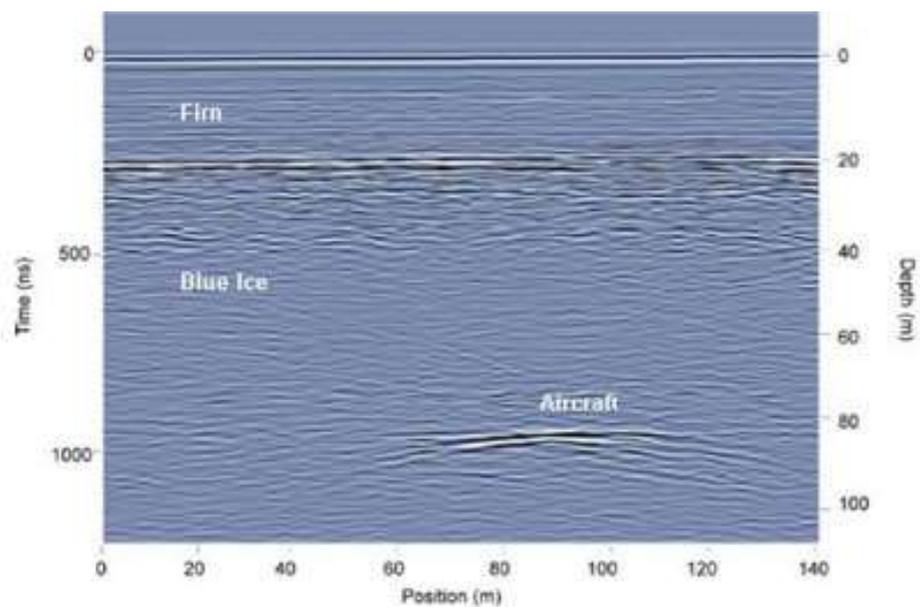


Figura 2-15 Radargrama correspondiente a la aeronave [36]

Dentro del ámbito militar que nos ocupa, el *GPR* ha sido empleado en prospecciones de desminado y detección de artefactos sin explotar [37], reconocimiento de estructuras subterráneas como túneles [34], trincheras y zulos [38], y la localización de personas atrapadas en áreas de desastres naturales o atentados [39].

A continuación vamos a tratar sobre el uso militar que se le ha dado al *GPR* durante estos años destacando las dos aplicaciones principales para el presente *TFG*:

2.4.1 Detección y posicionamiento de minas y UXO

Sin duda el mayor empleo que se ha hecho del georradar en el mundo militar es en el campo de la detección de minas y *UXO*. Dentro de este, se han desarrollado vehículos dedicados exclusivamente a esta tarea, como el HUSKY que vimos en el apartado 1.2 o el PEROCC (Figura 2-16 izquierda) de origen británico. Sin embargo, desde hace unos años, el sector de los vehículos contra *IED* ha convergido hacia el empleo de vehículos no tripulados. Estos, al ser controlados a distancia, permiten no empeñar ninguna vida humana (Figura 2-16 derecha).



Figura 2-16 Vehículo C-IED PEROCC (izquierda) [40] y UGV con dispositivo AMULET (derecha) [41]

La frecuencia central de trabajo óptima para la detección de minas oscila entre 1 y 2 GHz [42]. En la Figura 2-18, se presenta un radargrama en el que se identifica una mina tipo PMA-3 con una frecuencia de 1 GHz.

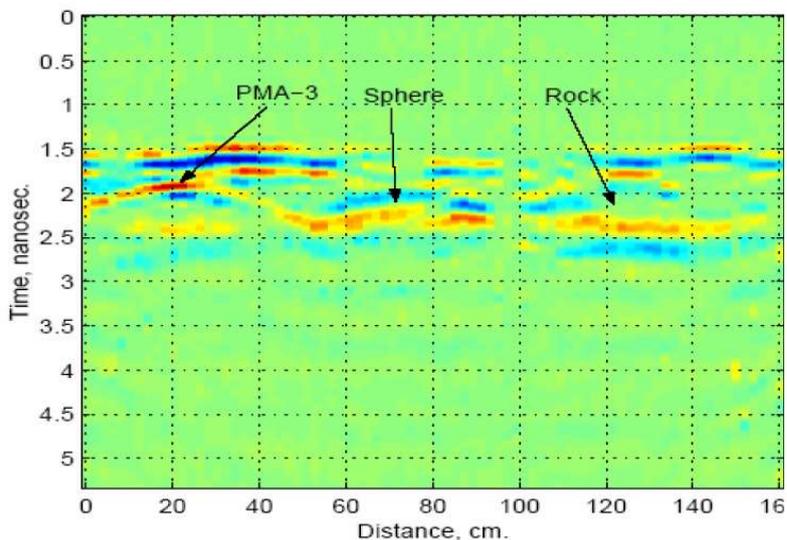


Figura 2-17 Radargrama correspondiente a la detección de una mina PMA-3 de origen yugoslavo [42]

El comienzo del empleo de sistemas *GPR* en el mundo militar para la detección de minas y *UXO* se remonta a la Guerra de Vietnam. En ella, el ejército norteamericano empleó el *GPR* para la detección de minas no metálicas, muy empleadas por el Vietcong, así como de los posibles escondites que estos empleaban en el subsuelo de la selva. Actualmente, el mayor uso del *GPR* dentro del ámbito militar reside en la detección de *IED*. Los escenarios por antonomasia de conflicto en los que se han desarrollado y empleado los *IED* por parte de la insurgencia son Irak y Afganistán [43].



Figura 2-18 Soldados españoles abriendo el *GPR* del vehículo Husky 2G [44]

Para concluir este apartado es necesario resaltar que en los últimos años el empleo del *GPR* dentro del mundo militar se está desarrollando en base a dos vertientes. La primera es la derivación hacia la sintetización de estos vehículos, generando sistemas de detección portátiles sobre plataformas no tripuladas (*UAV* y *UGV*) que permitan ser empleados por unidades de pequeña entidad (sección o incluso pelotón). Estos sistemas están siendo desarrollados y evaluados actualmente, encontrándose algunos de ellos en fase de prototipo [11] [45]. La segunda, es el empleo de sistemas *GPR* en catástrofes naturales. En estos escenarios, el *GPR* se ha testimoniado como una herramienta eficaz para detectar personas atrapadas entre los escombros, aumentando las probabilidades de que estas se encuentren con vida [39].

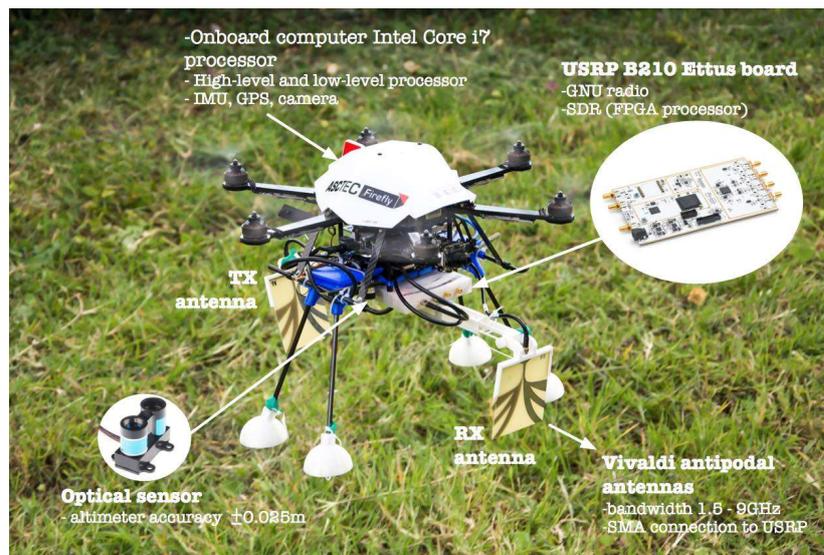


Figura 2-19 Proyecto de *GPR* montado sobre un UAV [46]



Figura 2-20 *GPR* de rescate ubicado en una zona catástrofica en Chengdu (China) y operadores de rescate en la misma provincia observando la recepción de datos del *GPR* (izquierda y derecha, respectivamente) [39]

2.4.2 Detección de espacios subterráneos

Como ya se citó en el apartado 2.2, uno de sus usos es el de detectar posibles túneles y bunkers que puedan ser empleados por el enemigo (Figura 2-21). El más reciente empleo de *GPR* para detección de espacios subterráneos se ha llevado a cabo en Siria. Rusia ha desplegado en este escenario uno de sus aviones de reconocimiento TU-214 equipado con sistemas de obtención de información, entre los que se encuentra un *GPR* que, variando el espectro de frecuencias (con 100 MHz se consigue una profundidad de barrido de entre 0-10m), ha permitido revelar posiciones ocultas del *DAESH* [47] (Figura 2-22).

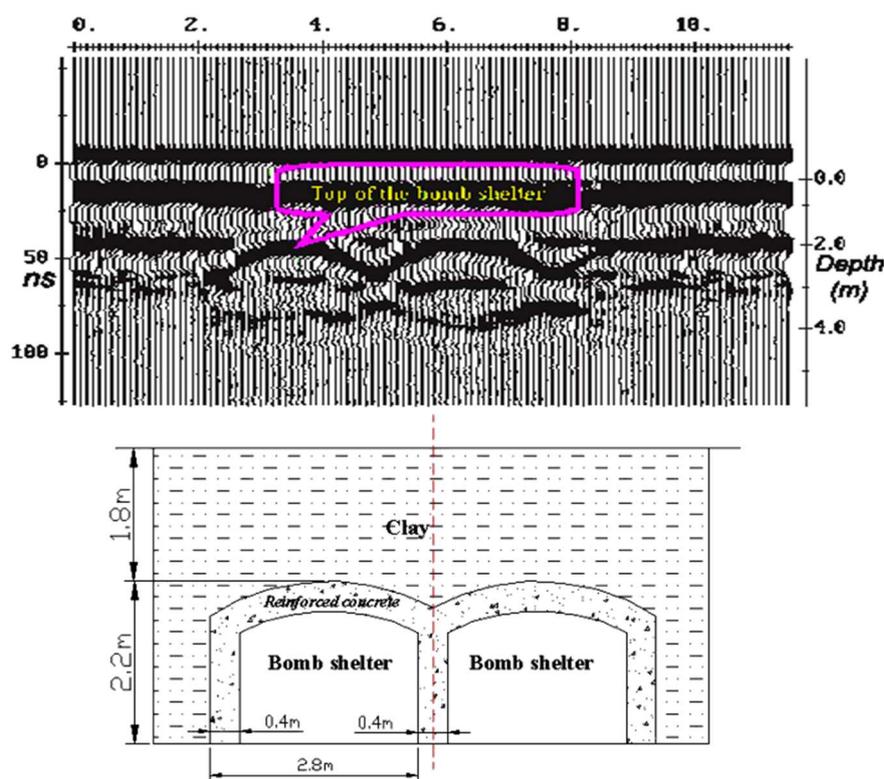


Figura 2-21 Radargrama de un bunker (parte superior) obtenido con una antena de 200 MHz y esquema de interpretación del mismo (parte inferior)



Figura 2-22 TU-214 equipado con georradar. Este avión fue desplegado en 2016 para hacer frente al *DAESH* en Siria [47]

3 FUNDAMENTOS DEL GPR

3.1 Ecuaciones de Maxwell

Como se ha citado en el apartado 2.2, el empleo del *GPR* es posible gracias a las ecuaciones de Maxwell (Ecuaciones 2, 3, 4 y 5). Estas ecuaciones relacionan los fenómenos electromagnéticos con la óptica ondulatoria [48].

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Ecuación 5}$$

En estas fórmulas, H representa la intensidad de campo magnético medido en A/m, E es la intensidad de campo eléctrico medido en V/m, B es el vector de inducción magnética que se mide en Wb/m^2 , D es la densidad de flujo eléctrico que se mide en C/m^2 . ρ es la densidad de carga eléctrica medida en C/m^2 , y c es la velocidad de la luz en el vacío.

Las ecuaciones de Maxwell, se complementan con con otras fórmulas llamadas relaciones constitutivas en las que se define el tipo de medio en el que se efectúa la propagación del campo electromagnético.

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde, ε es la constante de permitividad dieléctrica, μ es la permeabilidad magnética y σ es la conductividad eléctrica.

De este modo, en un medio dieléctrico homogéneo, isótropo y sin carga, $\rho = 0$, $\sigma = 0$ y tanto ε como μ son constantes.

Como se ha definido en el apartado 2.1.1, el *GPR* emplea una onda electromagnética. Las ecuaciones de Maxwell presentan el inconveniente de dependencia entre dos parámetros (\vec{D} , \vec{E}). Esto se resuelve cuando las ecuaciones de Maxwell se reescriben para eliminar el campo eléctrico o magnético. Eliminando el campo magnético, la ecuación obtenida resulta la de una onda vectorial transversal en función del campo eléctrico, campo empleado generalmente para realizar mediciones con el *GPR* [49].

$$\vec{\nabla}_x \vec{\nabla}_x \vec{E} + \mu\sigma \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad \text{Ecuación 9}$$

De forma más compacta, reescribimos la ecuación de onda transversal:

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}) = \gamma^2 \vec{E}(\vec{r}) \quad \text{Ecuación 10}$$

A pesar de depender de una sola variable, esta ecuación de onda (Ecuación 9 y 10) presenta un inconveniente derivado de su exponente. Esta ecuación, al ser de segundo grado, admite múltiples soluciones para cada onda diferente que existe. Sin embargo, todas sus soluciones comparten la característica de que en el vacío se propagan con la misma velocidad, esto es, $3 \cdot 10^8$ m/s.

En el marco de lo que acabamos de tratar, los campos electromagnéticos disponen de una denominada variación temporal armónica. Cuya representación fasorial, responde a la siguiente ecuación:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0(\vec{r}) \cdot e^{j\phi E(\vec{r})} \quad \text{Ecuación 11}$$

La citada ecuación da lugar a diferentes soluciones, las cuales clasificaremos en tres grupos: Planas, esféricas y cilíndricas. Para nuestro trabajo vamos a emplear las ondas planas. Estas pueden ser interpretadas como ondas esféricas cuando estamos lejos de las fuentes que las originan, sustituyendo la superficie esférica con su plano tangente.

Concretizando para una onda plana, la fórmula de campo eléctrico fasorial viene definida de la siguiente manera:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0(\vec{r}) \cdot e^{-\gamma \hat{v} \vec{r}} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

- γ es la constante de propagación $\gamma = \alpha + j\beta$.
- \hat{v} es el vector unitario que nos permite identificar la dirección de propagación.
- \vec{r} representa el vector de posición en coordenadas $\vec{r} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}$.
- \vec{E}_0 es un vector complejo perpendicular a la dirección de propagación.

Centrándonos en la constante de propagación, debemos destacar otras dos constantes que son de relevancia para el propósito de este *TFG*:

La primera de ellas es la constante de atenuación (α), que caracteriza el grado de disminución de la amplitud de una onda electromagnética cuando atraviesa un medio determinado. Constituye la parte real de la constante de propagación y viene determinada por la ecuación:

$$\alpha = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{Np/m} \quad \text{Ecuación 13}$$

La segunda y última es la constante de fase, que modifica la fase de una señal periódica. Representa la parte imaginaria de la constante de propagación y viene determinada por la ecuación:

$$\beta = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{rad/m} \quad \text{Ecuación 14}$$

β , por otro lado, puede considerarse como el número de onda λ al simplificar la Ecuación 14, por lo que β es un factor importante en el cálculo de la velocidad de propagación.

σ, μ, ϵ son parámetros característicos de cada medio. Son denominados conductividad eléctrica, permeabilidad magnética y permitividad dieléctrica respectivamente. Estos parámetros dependerán del valor de la frecuencia de variación del campo (ω) y se definirán en profundidad en el siguiente apartado.

3.1.1 Velocidad de propagación y propiedades dieléctricas de los medios

La ecuación general de una onda electromagnética resultante (Ecuación 9 y 10) produce una onda transversal en la que \vec{E} y \vec{H} están en un plano perpendicular, tal y como se observa en la Figura 3-1:

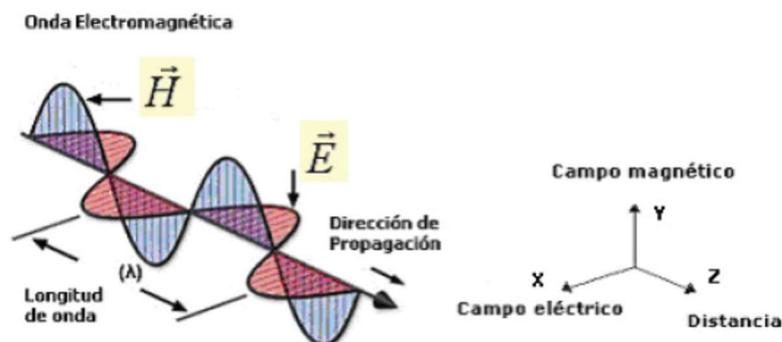


Figura 3-1 Representación de una onda electromagnética y sus tres ejes [50]

Esta onda transversal se caracteriza por ser plana. En derivación de la ecuación de onda, se obtiene una velocidad de propagación definida por la siguiente ecuación:

$$V_{prop} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu \cdot \varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon}\right)^2} + 1 \right)}} \quad \text{Ecuación 15}$$

Debido a la heterogeneidad que lo compone, el subsuelo es considerado como una mezcla con una respuesta eléctrica compleja, una frecuencia y una respuesta magnética correspondiente a cada tipo de subsuelo.

Reiterando en el apartado 3.1, para una onda plana que se propaga en un medio dieléctrico y de propiedades magnéticas uniformes, la velocidad de propagación puede derivarse directamente de las ecuaciones de una onda electromagnética [49].

La velocidad de propagación de la onda electromagnética es uno de los factores principales que actúan en el georradar. De ser conocida, y sabiendo el tiempo que tarda una onda desde su emisión hasta su recepción, nos permite calcular la profundidad a la que se encuentran los reflectores (Ecuación 16).

$$e = v \cdot \frac{t}{2} \quad \text{Ecuación 16}$$

La velocidad de propagación depende de la conductividad eléctrica (σ), la permitividad dieléctrica (ε), la permeabilidad magnética (μ), y la frecuencia angular central del pulso (ω), siendo los dos primeros los más relevantes.

La permeabilidad magnética (μ) nos permite determinar la capacidad de un material para dejar pasar a través de él los campos magnéticos. Este parámetro viene determinado por la fórmula:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde μ_r es la permeabilidad magnética relativa del material y μ_0 la permeabilidad magnética en el vacío.

La permitividad dieléctrica (ε) nos permite saber cómo varía un campo eléctrico a su paso por un medio o material. Esta propiedad es característica de cada medio, tal y como se puede observar en la Tabla 3-1. La permitividad dieléctrica viene dada por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde ε_r es la permitividad dieléctrica del medio y ε_0 es la permitividad dieléctrica en el vacío.

Material	Permitividad relativa ϵ	Velocidad de propagación v (m ns ⁻¹)	Conductividad σ (mS m ⁻¹)	Coefficiente de atenuación $\beta\sigma$ (dB m ⁻¹)
Aire	1	0.3	0	0
Agua salada	80	0.033	3000	600
Agua dulce	80	0.033	0.5	0.1
Granito seco	5	0.13	0.01	0.01
Arena seca	5	0.13	0.01	0.01
Arcilla húmeda	10	0.095	500	300
Suelo:				
Arenoso seco	2.6	0.19	1.4	1
Arenoso húmedo	25	0.06	69	23
Arcilloso seco	2.5	0.19	2.7	3
Arcilloso húmedo	19	0.07	500	200
Congelado	6	0.12	0.1	0.1
Caliza lacustre	50	0.04	-	-
Estrato cultural bajo agua	70	0.04	-	-

Tabla 3-1 Propiedades dieléctricas de diferentes medios [51]

El último de los parámetros, la conductividad eléctrica (σ), se define como la capacidad que presenta un material para conducir una corriente eléctrica. Razonado de otra manera, nos indica la proporción entre la densidad de corriente de dicho material y la intensidad que presenta el campo eléctrico externo.

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad \text{Ecuación 19}$$

La conductividad eléctrica nos permite además clasificar los materiales y como se observa en la Tabla 3-2.

Material	σ
Conductor	$>10^5$ S/m
Semiconductor	$10^5 \text{ s/m} < \sigma < 10^{-8}$ S/m
Aislante	10^{-8} S/m

Tabla 3-2 Clasificación de los materiales según su conductividad eléctrica

La velocidad de propagación varía en función de la permitividad, y teniendo en cuenta que $\mu_r = 1$ y $\sigma = 0$, viene definida a partir de la siguiente expresión:

$$v = c/\sqrt{\epsilon_r} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde c es la velocidad del medio y ϵ_r es la permitividad dieléctrica relativa del medio.

Asimismo, la velocidad de propagación está influenciada por la conductividad eléctrica atenuándonos más o menos la propagación de la onda electromagnética (Tabla 3-1).

Por todo lo anteriormente expuesto, la velocidad de propagación varía dependiendo de las características del medio en el que se propagan las ondas electromagnéticas y, por tanto, determinará la frecuencia a emplear en función de la profundidad de prospección necesaria.

3.1.2 Coeficiente de reflexión

Tal y como se ha explicado en el capítulo anterior, el georradar emite un pulso electromagnético que, al encontrar una discontinuidad en las propiedades dieléctricas del subsuelo, refleja parte de las ondas emitidas generando así una traza (pulso con el historial de reflexiones en profundidad). Para que se produzca la reflexión, es importante que haya un contraste dieléctrico suficiente entre las diferentes permitividades (o constantes dieléctricas) de dos medios contiguos. La energía o intensidad de la onda reflejada en esa interfaz se mide a partir del coeficiente de reflexión (r). Este coeficiente será mayor o menor dependiendo de las constantes dieléctricas de los medios y viene dado por la ecuación:

$$r = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad \text{Ecuación 21}$$

Siendo ε_1 la permitividad dieléctrica del medio 1 y ε_2 la permitividad dieléctrica del medio 2.

3.2 Frecuencia, resolución espacial y rango de penetración

El espectro de frecuencias empleadas en las antenas de georradar se encuentra en VHF y UHF, estas tienen como propósito la emisión de un pulso de muy corta duración. Por lo general, este pulso durará entre 1 y 20 ns [13] y está constituido por 1,5-2 períodos de la frecuencia nominal que caracteriza la antena [10].

Dependiendo de la frecuencia central, obtendremos una mayor o menor penetración en el terreno. Al emplear mayor frecuencia obtendremos mayor penetración en el terreno dependiendo no solo de la frecuencia si no de la constante de atenuación, que nos proporcionará una mayor o menor atenuación dependiendo de las propiedades dieléctricas del terreno. Además, al emplear mayor frecuencia, también obtendremos mayor resolución espacial, la cual nos beneficiará de cara a la detección de objetos enterrados en función de su tamaño. La resolución espacial se caracteriza por tener una resolución vertical y una resolución horizontal.

3.2.1 Resolución vertical

La resolución vertical mide la capacidad de la frecuencia empleada para diferenciar entre dos señales cercanas en el tiempo como objetos diferentes. Un retorno de *GPR* debe tener en cuenta la dispersión selectiva de frecuencia del sistema, antena, tierra y objetivo.

Al definir la resolución de rango como la potencia media al punto de la función seno normalizada, se puede obtener desde el punto de vista teórico la resolución alcanzable. De este modo, la resolución vertical viene definida por la ecuación:

$$R_{res} = \frac{1,39c}{2B\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde, c es la velocidad del medio, B el ancho de banda y ϵ_r la constante dieléctrica relativa al medio. El factor 1,39 está asociado a la desviación de la resolución vertical teórica.

3.2.2 Resolución horizontal

La resolución horizontal nos proporciona la distancia mínima que debe existir entre dos reflectores situados uno junto a otro horizontalmente para que el georradar los detecte como dos reflexiones independientes. El límite de esta resolución viene dado por la primera zona de Fresnel. La resolución horizontal se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta h = D = 2 \cdot \sqrt{\frac{\lambda^2}{4} + d\lambda} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde, λ es la longitud de onda y d es la distancia vertical entre la antena y la superficie del reflector.

3.2.3 Rango de penetración

La profundidad de penetración en una onda electromagnética viene determinado por la ecuación:

$$\left(\frac{2(PD)}{c}\right) = t_{max} \quad \text{Ecuación 24}$$

De donde tomamos la relación que expresa la profundidad de penetración del radar en el aire (PD), y en la cual t_{max} representa el máximo rango aplicable. Al despejar esta ecuación obtenemos la profundidad de penetración:

$$PD = \frac{c \cdot t_{max}}{2} \quad \text{Ecuación 25}$$

Por otro lado, el rango de penetración que efectuará el GPR se obtiene transformando el eje temporal de ordenadas mediante la siguiente ecuación:

$$Z = v \cdot twt/2 \quad \text{Ecuación 26}$$

En la cual Z es la distancia vertical entre la antena y superficie del reflector (m), twt es la ventana de tiempos (ns) y v es la velocidad de propagación (m/ns). La ventana de tiempos se divide entre dos porque es un tiempo doble (tiempo que tarda la onda en ser reflejada y recibida en superficie).

3.3 Tipos de señal GPR

Dentro del objeto de estudio de este trabajo, se va a emplear tres modos de empleo del GPR con los que se van a llevar a cabo las prospecciones en este trabajo. Estos modos de trabajo se dividen en dos categorías: dominio de tiempo y dominio de frecuencia.

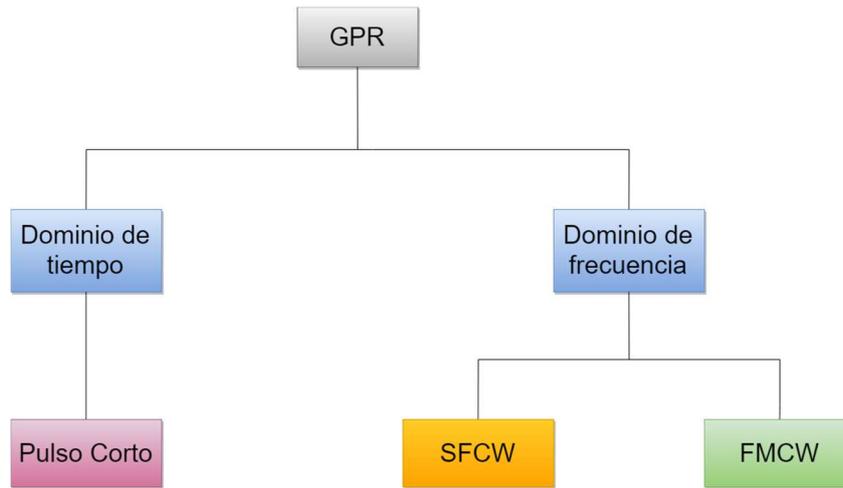


Figura 3-2 Esquema de los modos de trabajo divididos en categorías.

Dentro de la primera categoría referente al dominio de tiempo, el modo de trabajo del GPR seleccionado es el pulso en banda base, que se tratará a continuación.

3.3.1 Pulso corto

El funcionamiento de este tipo de señal consiste en la emisión de un pulso, el cual, tras reflejarse en un objeto devuelve parte de la energía, siendo reflejada dentro de un período de tiempo (Figura 3-2). El transmisor no modula la frecuencia de la portadora, proporciona un impulso de alta potencia pero muy corto en el tiempo. Esta portadora, determina la frecuencia central de la onda. El ancho de banda para pulso en banda base es uno de los parámetros más importantes, viene definido por el ancho de pulso (τ) acorde a la ecuación:

$$B = \frac{1}{\tau} \quad \text{Ecuación 27}$$

El ancho de banda, nos permite obtener la resolución, que viene dada por la ecuación:

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde c es la velocidad de propagación en el medio, y B el ancho de banda.

Además del ancho de banda, otro parámetro de gran importancia cuya función es la de discernir entre dos objetos que se encuentren en el subsuelo es la distancia no ambigua. La distancia no ambigua se define cómo:

$$R_{NA} = \frac{c \cdot PRI}{2} \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde, PRI es intervalo de repetición de pulso.

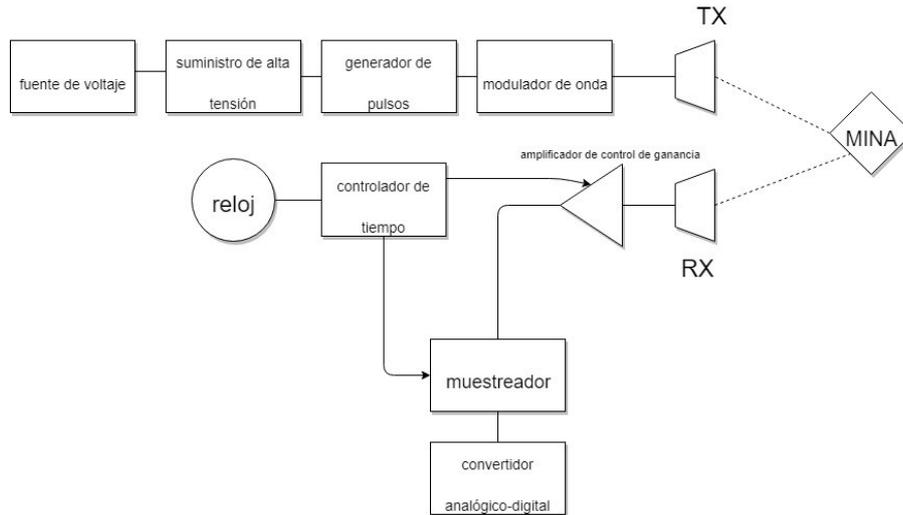


Figura 3-3 Diagrama de bloques de un GPR pulsado [49]

En la figura 3-3 se expone el diagrama de bloques relativo a un *GPR* pulsado. El funcionamiento de este tipo de *GPR* se basa en la generación de una onda electromagnética con la potencia de pico necesaria para realizar una penetración en el terreno y efectuar la prospección a la profundidad requerida. Para ello, el suministro de alta tensión y el generador de pulsos emplean un circuito donde los condensadores se cargan en paralelo desde una fuente de baja tensión de unos 12 V. Luego se descargan en series para obtener una multiplicación de voltaje y obtener un pulso de alto voltaje. Obtenido dicho pulso, este pasa a la antena transmisora (TX) mediante un modulador de onda que hace de nexo entre la antena y el generador de pulso. Una vez emitido y recibido el pulso en la antena receptora (RX) este pasa por un amplificador que permite llevar a cabo un control automático de la ganancia, pudiendo ser usado para implementar variaciones en la ganancia con respecto al tiempo, como por ejemplo ganancia en alcance. Para llevar a cabo un control de la generación de pulsos, el *GPR* pulsado dispone de reloj, que además de esta función, ajusta la ganancia en el amplificador del receptor, y el tiempo del muestreador. Para el procesado de la señal se hace pasar la señal obtenida por un convertidor analógico digital antes de poder realizar la interpretación de la misma.

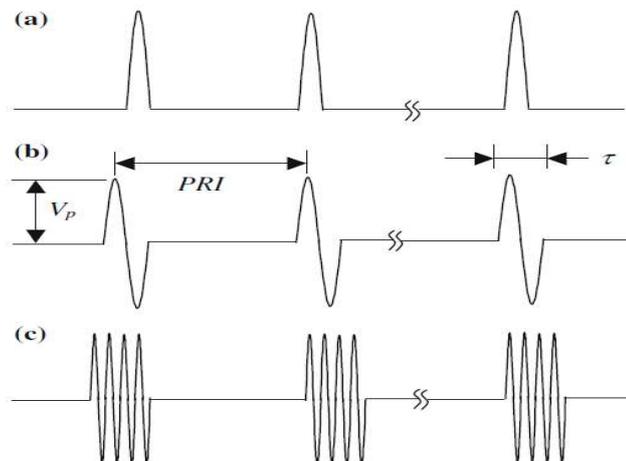


Figura 3-4 Graficas más comunes en radar pulsado. a) Impulso b) monopulso, y c) pulso modulado [52]

3.3.2 Onda Continua con Frecuencia Modulada (FMCW)

Dentro de la segunda categoría, dominio de frecuencia, se han seleccionado dos modos de trabajo, Onda Continua con Frecuencia Modulada (FMCW) y Onda Continua con Frecuencia Escalonada (SFCW). A diferencia del radar pulsado, los radares de onda continua no permiten obtener la distancia, sólo la velocidad gracias al efecto doppler. Para poder medir la distancia a un blanco, los radares de onda continua necesitan modular la portadora.

Este tipo de detectores, a diferencia de los pulsados, trabajan sobre un ancho de banda fijo. Sobre este ancho de banda, se va variando la frecuencia de emisión entre dos valores, obteniendo una frecuencia inicial f_{min} y la frecuencia final f_{max} .

A causa de la diferencia entre frecuencia inicial y final, el ancho de banda viene definido por la ecuación:

$$B = (f_{max} - f_{min}) \quad \text{Ecuación 30}$$

Este ancho de banda, es emitido durante un determinado período de tiempo Δt el cual, al finalizar, vuelve a comenzar desde la frecuencia mínima inicial. Este período Δt viene dado por la siguiente ecuación:

$$\Delta t = \frac{T \cdot \Delta f}{f_2 - f_1} \quad \text{Ecuación 31}$$

Donde, T es el tiempo para que la frecuencia cambie de f_{min} a f_{max} . Δf es la variación de frecuencia en el tiempo o ancho de banda (B). f_2 y f_1 son las frecuencias inicial y sucesiva, es decir, la que empleamos para contrastar la recibida.

A la combinación en el mezclador de ambas señales, la frecuencia recibida y la nueva frecuencia generada, es lo que se denomina frecuencia de batido (f_B) siendo la diferencia entre la frecuencia transmitida (f_T) y la frecuencia recibida (f_R). Esta frecuencia de batido nos permitirá obtener la distancia al objeto manteniendo, en la ecuación 31, constantes los demás parámetros. La distancia a la que está enterrado un objeto para efectuar su detección viene dada por la ecuación 32.

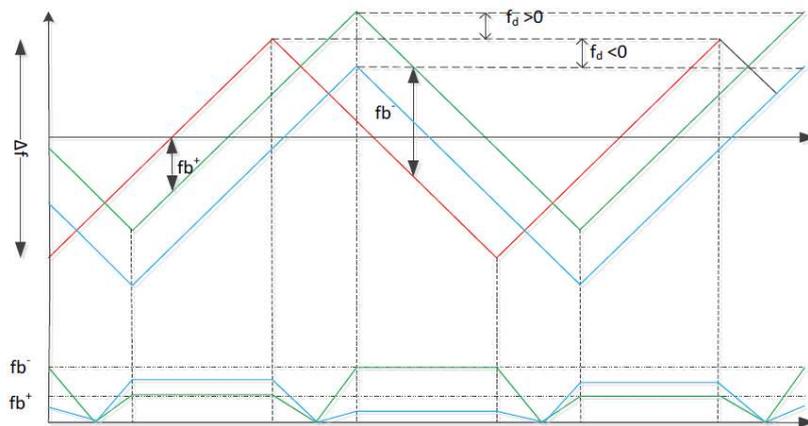


Figura 3-5 Gráfica FMCW donde podemos observar la frecuencia de batido f_B [53]

$$R = \frac{c \cdot T}{2 \cdot \Delta f} f_B \quad \text{Ecuación 32}$$

Cuyos parámetros definimos en la ecuación 31 y donde se observa que la frecuencia de batido es proporcional a la distancia.

Para realizar una prospección con este modo, se transmite una señal con una determinada frecuencia (TX). Al ser reflejada por el objeto esta es recibida por la antena receptora (RX). Para cuando la señal es recibida, se ha generado otra nueva frecuencia de transmisión. Esta nueva frecuencia de transmisión es desviada parcialmente al mezclador donde se contrasta con la recibida del objeto. A continuación, se filtra a través de un filtro de paso bajo permitiendo el paso de frecuencias más bajas y atenuando las frecuencias más altas. Para concluir con este proceso, las frecuencias filtradas se introducen en un convertidor analógico digital para facilitar su posterior procesamiento. El proceso descrito se puede observar a continuación en la Figura 3-6.

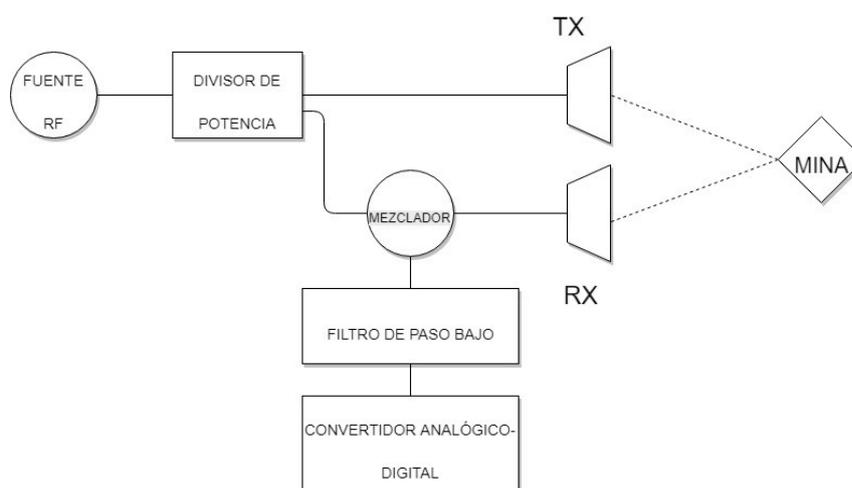


Figura 3-6 Esquema de funcionamiento simplificado de radar FMCW [49]

3.3.3 Onda Continua con Frecuencia Escalonada (SFCW)

La frecuencia escalonada (*SFCW*) se caracteriza por que realiza barridos de onda continua a diferentes frecuencias durante diferentes intervalos de tiempo. Aunque funcionan como sistemas basados en frecuencia, su respuesta final se describe en un dominio de tiempo que denominamos pulso sintético, que contiene la información sobre los blancos.

Este proceso genera una gráfica que podemos observar en la Figura 3-7 donde se puede observar los diferentes tiempos de transmisión de cada frecuencia (Dwell Time) dentro del ancho de banda (Bandwidth) establecido.

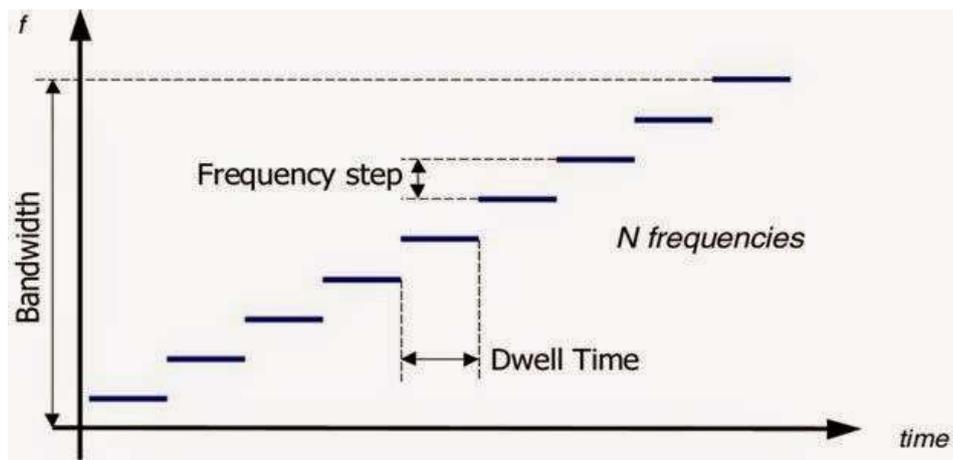


Figura 3-7 Gráfica SFCW [54]

El diagrama de bloques de un GPR que emplea el método SFCW, como podemos observar en la figura es similar al ya observado en el método FMCW. La señal es generada con su correspondiente frecuencia y es entregada en el divisor de potencia donde parte de ella es transmitida por la antena (TX) para ser reflejada por el objeto y recibida en la antena receptora (RX). Esta señal recibida se traslada al demodulador IQ donde la señal recibida es mezclada con la enviada. Esta señal, una vez mezclada es filtrada mediante un filtro de paso bajo y reconvertida mediante un convertidor analógico-digital.

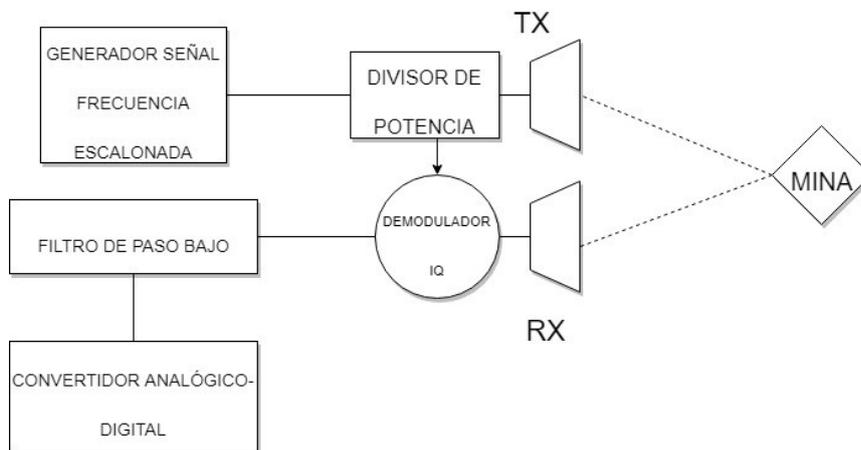


Figura 3-8 Diagrama de bloques de un GPR con modo SFCW [55]

Al transformar las amplitudes (A) en señales en fase (I) y las señales cuadraturas (Q) que se encuentran en el citado dominio de frecuencia a un pulso sintético en el ya mencionado dominio de tiempo, se obtiene la distancia R a un objeto definido por las ecuaciones:

$$I = A \cdot \cos\left(-\frac{2 \cdot \omega \cdot R}{v}\right) \quad \text{Ecuación 33}$$

$$Q = A \cdot \sin\left(-\frac{2 \cdot \omega \cdot R}{v}\right) \quad \text{Ecuación 34}$$

Esta transformación de fase a cuadratura se lleva a cabo mediante la aplicación de la transformada discreta inversa de Fourier que citamos a continuación:

$$X[k] = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} X[n] \cdot W_N^{-k \cdot n} \quad \text{Ecuación 35}$$

A diferencia de *FMCW*, que empleaba una frecuencia inicial y otra final, *SFCW* se limita a transmitir una frecuencia determinada durante un intervalo de tiempo determinado sobre un ancho de banda fijo, siendo la frecuencia incrementada de una forma discreta. Este rango de frecuencias se determina mediante la ecuación 36 definida a continuación:

$$f_n = f_0 + n\Delta f \quad \text{Ecuación 36}$$

Donde f_0 es la frecuencia portadora inicial, Δf el tamaño del salto de frecuencia y n el número de ráfaga.

Empleando el tamaño del salto de frecuencia de la Ecuación, se puede hallar la resolución en este modo de trabajo mediante la ecuación:

$$\Delta R = \frac{c}{2N\Delta f} \quad \text{Ecuación 37}$$

Donde, c es la velocidad de propagación en el medio, N número total de saltos de frecuencia y Δf el tamaño de del salto de frecuencia.

Entre las ventajas que ofrece el *SFCW* cabe destacar la transmisión a alta potencia permitiendo una profunda penetración y que el espectro transmitido puede emplear ciertas amplitudes y fases que ayuden a reducir, por ejemplo, la relación señal a ruido [52].

4 DESARROLLO DEL TFG

4.2 Fabricación y pruebas del GPR

4.2.1 Hardware

Para la realización del GPR hemos dispuesto del siguiente hardware proporcionado por el Centro Universitario de la Defensa:

- **Antenas:** Las antenas empleadas en el diseño de nuestro GPR son dos antenas logarítmicas de banda ancha capaces de recibir y transmitir en las bandas VHF y UHF así como señales de radio. La ganancia de este tipo de antenas oscila entre 8,5 y 10 dB. Como se definió en el párrafo 2.1.2 son antenas directivas. Con ellas se va a transmitir y recibir la señal para efectuar la prospección:



Figura 4-1 Antenas empleadas para la realización del GPR

- **Plataforma HACKRF One:** Dispositivo reconfigurable de radio por software que nos va a permitir mediante el Software Definido por Radio (*SDR*) configurar las frecuencias a las que queremos trabajar. Para este proyecto vamos a emplear dos unidades a HackRF One de la casa Great Scott Gadgets [57] a efectos de transmisora, y receptora. La ventaja que presenta esta plataforma respecto a otras es la facilidad de cambiar de frecuencias de radio instantaneamente, cuando lo normal es cubrir un solo tipo de frecuencia radio. Las características del HackRF son las siguientes [57]:

- Frecuencia de trabajo entre 1 MHz y 6 GHz.
- Transceptor semiduplex.
- Más de 20 millones de muestras por segundo.
- Muestras de cuadratura de 8-bit (8-bit I y 8-bit Q).
- compatible con GNU Radio, SDR, y similares.
- Filtro de ganancia y ancho de banda configurable por software en TX y RX.
- Potencia del puerto de antena controlada por software (50 mA a 3.3 V).
- Conector de antena SMA.
- Entrada y salida de reloj SMA para sincronización.
- Botones adecuados para programar.
- USB 2.0 de alta velocidad.
- Alimentacion por USB.
- Hardware de código abierto.

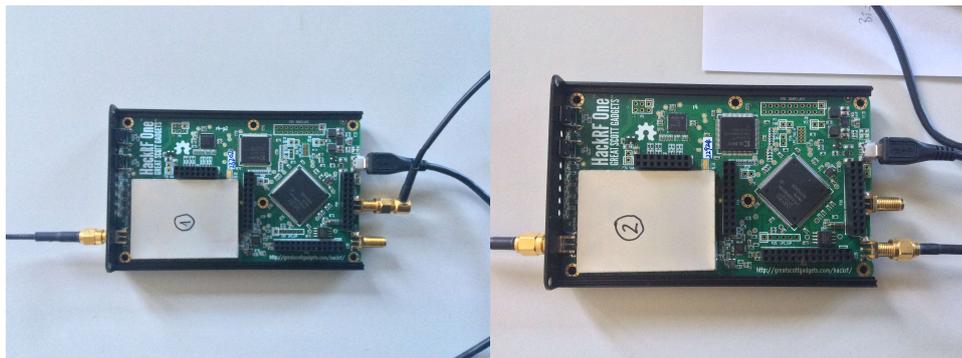


Figura 4-2 HackRF empleados en el desarrollo del GPR. Transmisor (Izquierda) y Receptor (Derecha)

Una vez definidos los componentes se ha procedido al montaje del citado GPR obteniendo una configuración inicial acorde a la figura que se puede observar a continuación.

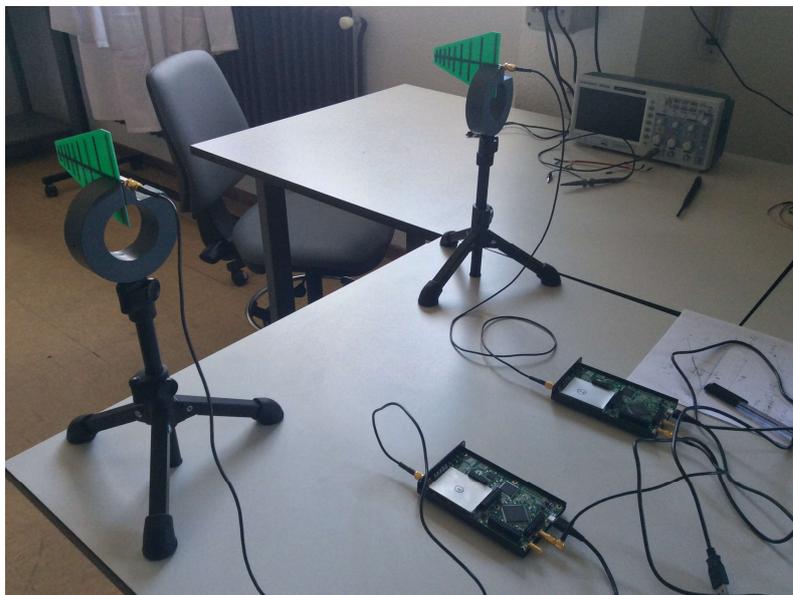


Figura 4-3 GPR realizado para efectuar las pruebas de laboratorio

4.3 Simulación SDR

El software con el que se van a realizar las simulaciones de transmisión es un software de tipo *SDR (Software Defined Radio)*. Esto va a permitir diseñar nuestro *GPR* de acuerdo con diferentes modos de trabajo. En el mercado actual, el *SDR* se ha hecho un hueco en aplicaciones de uso básico, como tarjetas *SDR*, uso profesional y militar. Para ello, se han diseñado programas con el fin de realizar las diferentes modificaciones en los componentes de este.

Para la realización de los diagramas de bloques del *GPR* perteneciente a este trabajo se ha empleado el software GNURadio. GNURadio es una herramienta de desarrollo libre que permite al usuario implementar los diferentes bloques así como su modificación en función del diseño con el que desea trabajar. Es ampliamente usado para fines académicos, comerciales e investigación de comunicaciones inalámbricas entre otros. A esto hay que añadir que, al tratarse de un software gratuito, no incrementa el coste de este proyecto, garantizando uno de los objetivos propuestos anteriormente, el de ser construido con medios económicos. De entre sus características destacan [58]:

- Reconfiguración de sistema de radar de acuerdo con las necesidades.
- Ejecución de cambios en tiempo real.
- Modelamiento y simulación del procesamiento de señales.
- Bajo costo.

Para la simulación mediante el software *SDR* se realizaron diferentes ensayos en concordancia a los modos de trabajo que se han seleccionado para la realización del *GPR* y que se describen en el párrafo 3.4 del presente *TFG*.

El primero de los métodos de prospección de *GPR* que se ha seleccionado para este trabajo, y que se va a describir a continuación, ha sido el de *FMCW*, que como recordaremos en líneas generales del párrafo 3.4 consiste en la variación de la frecuencia entre dos valores durante un determinado período de tiempo manteniendo el ancho de banda constante.

4.3.1 Diagrama de bloques *FMCW*

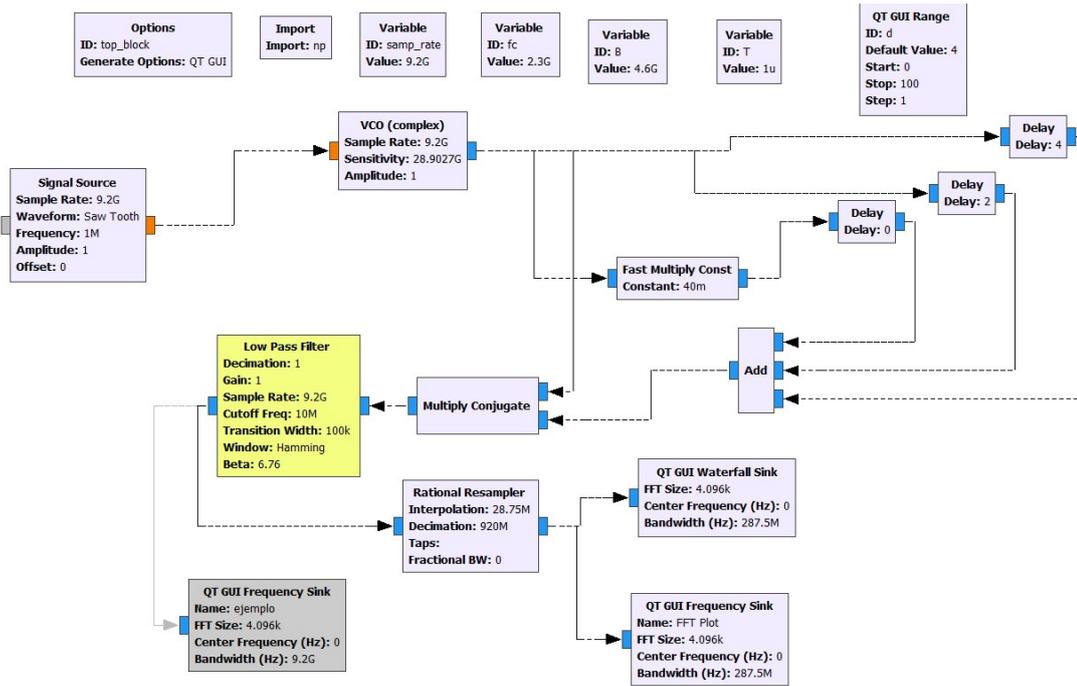


Figura 4-4 Interface del software *SDR GNURadio* con el diagrama de bloques del *GPR* en *FMCW*

En la figura 4-6 se observa la interface del programa GNURadio con el diagrama de bloques referente al modo de funcionamiento *FMCW*. Para ello, se han utilizado los siguientes bloques (Ver anexo I):

- **Variable:** Es el bloque mediante el cual se definen las diferentes variables que se van a tener en cuenta para el funcionamiento de nuestro *GPR* asignándole un valor a cada una de ellas. Las variables definidas para este diagrama son: Ancho de banda (B), frecuencia central (f_c), tiempo de barrido (T) y la frecuencia de muestreo ($samp_rate$).
- **Signal Source:** Es el bloque que nos proporciona una señal en diente de sierra (Sawtooth) con una frecuencia de muestro de 5 MHz, una amplitud entre 0 y 1, y una frecuencia de 100 Hz ($1/T$).
- **VCO (Complex):** Este bloque es un oscilador controlado por tensión.. La función de este bloque es la de generar una señal cuya frecuencia es función del voltaje recibido de la fuente.

- **Multiply Conjugate:** Bloque que nos permite recoger la señal obtenida de la reflexión en el objeto y la originada antes de ser transmitida. Una vez obtenidas, las contrasta, obteniendo así una frecuencia de batido con la que detectar el objeto así como su distancia.
- **Rational Resampler:** El bloque rational resampler lleva a cabo un filtro FIR donde la velocidad de entrada es interpolada para su posterior salida en tasas lo más pequeñas posible para ayudar a reducir la complejidad en el cálculo.
- **QT GUI Frequency Sink:** Mediante la implantación de este bloque se pueden obtener las gráficas relativas al diagrama de bloques que acabamos de compilar.
- **Delay:** Con la introducción de un bloque delay, se simula el retardo de la onda en el objeto deseado. Para el presente trabajo se han empleado tres bloques delay siendo el primero el referente al suelo, establecido en un número de muestras igual a 0. Los dos siguientes delays implementados se encuentran a un número de muestras correspondiente a dos y a cuatro respectivamente. El bloque delay ubicado en N=2 representa el comienzo de una plancha metálica situada a 5 cm de profundidad, simulando la profundidad a la que se encontraría una mina antipersonal. Por su parte, el bloque delay ubicado en N=4 representa el final de la plancha metálica que tendría un espesor de 2 cm, por lo que estaría indicando una profundidad de 7 cm.

El desarrollo del diagrama de bloques es el siguiente. La señal generada en el bloque signal source es transformada en frecuencia al introducirse en el bloque VCO donde se ha introducido una frecuencia de muestreo de 9,2 GHz originada por el ancho de banda que tiene un valor de 4,6 GHz, de acuerdo con el criterio de Nyquist:

$$f_s \geq 2 \cdot B \quad \text{Ecuación 38}$$

Donde f_s es la frecuencia de muestreo y B el ancho de banda.

La señal a la salida del bloque VCO, lo hace en forma de onda electromagnética, la cual, sería emitida por la antena transmisora que en este programa se omite para su simplificación. La señal generada, cómo se puede observar en la Figura 4-4 toma tres caminos diferentes. El primero de ellos corresponde a la señal que se deriva al mezclador para ser batida con la señal recibida de la reflexión. Las dos siguientes son aquellas que se emplean para detectar los objetos, en este programa representados por los bloques delay. Estos bloques presentan la limitación de emplear números enteros para efectuar la simulación de un objeto. Esta limitación hace que la profundidad a la que se muestrea en la simulación sea obtenida de la ecuación:

$$N = \frac{2}{c} \cdot f_s \cdot R \quad \text{Ecuación 39}$$

Donde N es el retardo, f_s es la frecuencia de muestreo, c es la velocidad del medio y R es la distancia al blanco que se obtiene mediante la fórmula general del radar desrita a continuación:

$$R = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad \text{Ecuación 40}$$

Con esta distancia obtenemos localización de los artefactos a una profundidad próxima al suelo. Después de haber sido reflejada, la onda es mezclada en el bloque Multiply Conjugate el cual corresponde al mezclador, y del cual, como ya se mencionó previamente, se obtiene la frecuencia de batido, proporcionando una distancia o, en este caso, una profundidad. A continuación, esta onda se pasa por el filtro de paso bajo y se efectúa una conversión a digital siendo proyectada en la pantalla para su análisis como se muestra a continuación:

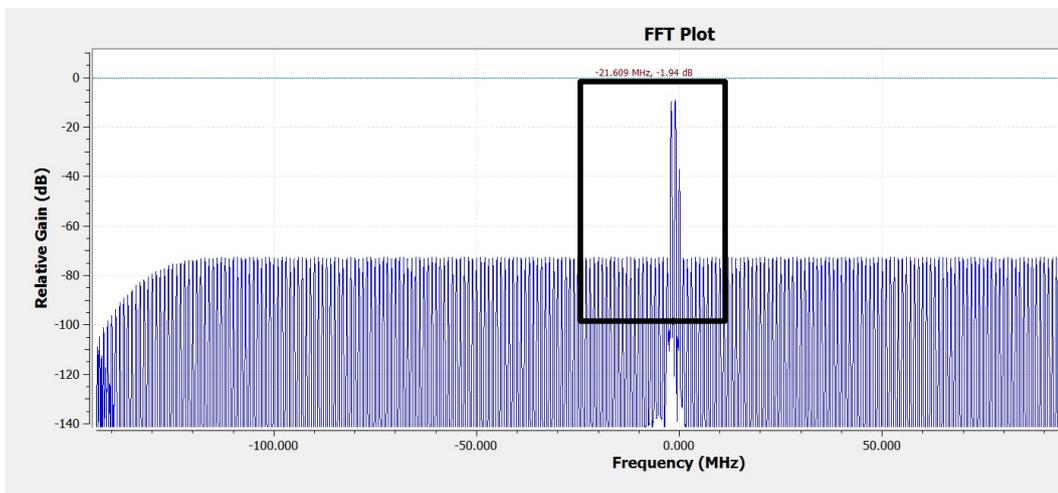


Figura 4-5 Grafica generada por GNURadio donde se observa la detección de los objetos simulados mediante los bloques Delay

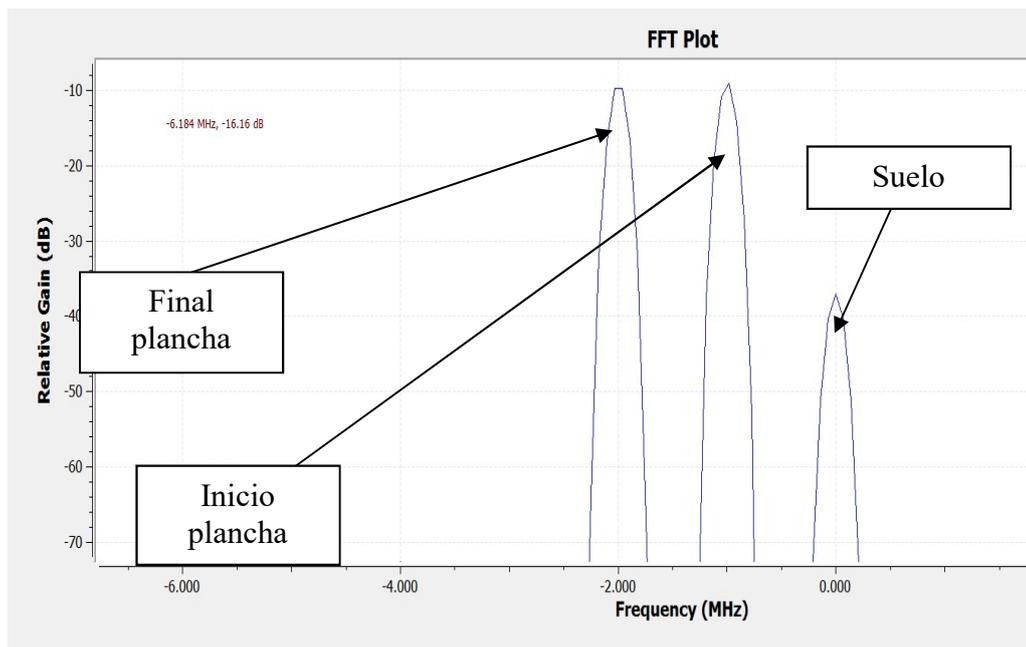


Figura 4-6 Detalle de la gráfica anterior donde se puede diferenciar la detección de ambos objetos simulados

En el análisis de la gráfica mostrada en la Figura 4-6, se pueden observar tres picos. Estos picos son la prueba de la reflexión por parte del *GPR* del suelo y la plancha enterrada. Si observamos el pico relativo al suelo, este tiene un valor de 0 MHz. A continuación, observando el segundo pico, este se encuentra en un valor de 1 MHz y el tercer pico en un valor de 2 MHz donde se puede deducir una frecuencia de batido de 1 MHz. Estos valores son obtenidos al tomar un tiempo T de 1 ms.

Mediante esta simulación se demuestra que el esquema de funcionamiento del *GPR* es válido ya que permite identificar el suelo y la plancha metálica. Mas adelante se simulará una prospección con una antena de *GPR* comercial donde se obtendrán resultados similares.

4.3.2 Diagrama de bloques SFCW

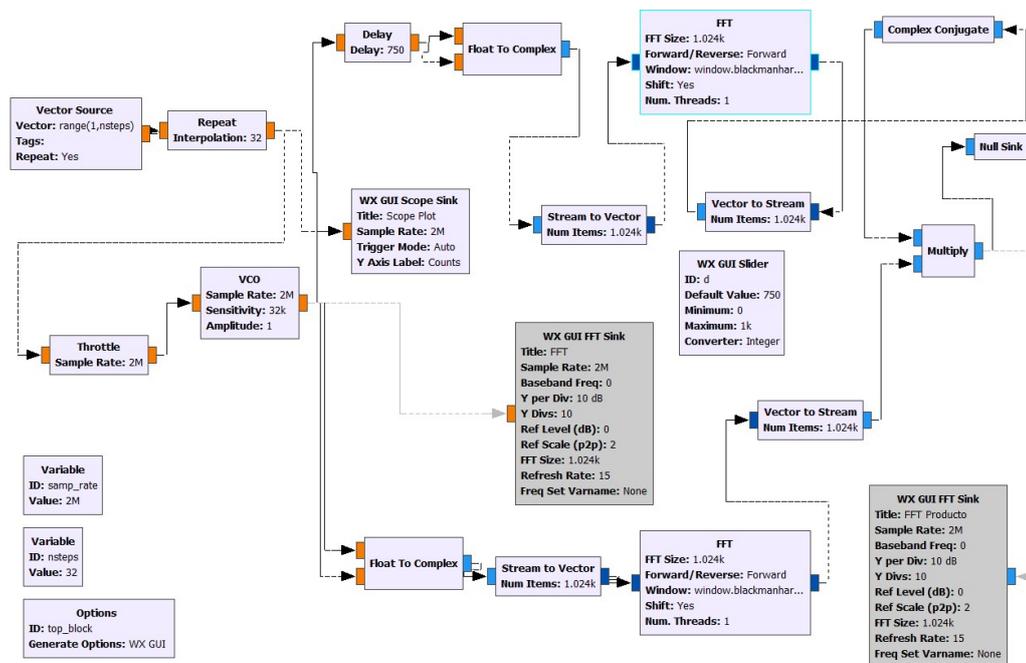


Figura 4-7 Diagrama de bloques del modo SFCW realizado en GNURadio.

Para que el *GPR* diseñado en este proyecto pueda realizar prospecciones mediante el método *SFCW* se ha desarrollado mediante GNURadio un diagrama de bloques que permite generar el citado modo de trabajo y que se puede observar en la Figura 4-7 y anexo III de este trabajo. Para ello se introduce en un bloque de variable el número de frecuencias con las que vamos a trabajar, en este caso 32, cuyo número oscila de 1 a 31. Estas frecuencias toman una frecuencia de muestreo de 2 MHz. La señal es transmitida al pasar por el bloque VCO generando la señal que se puede observar a continuación en la Figura 4-8.

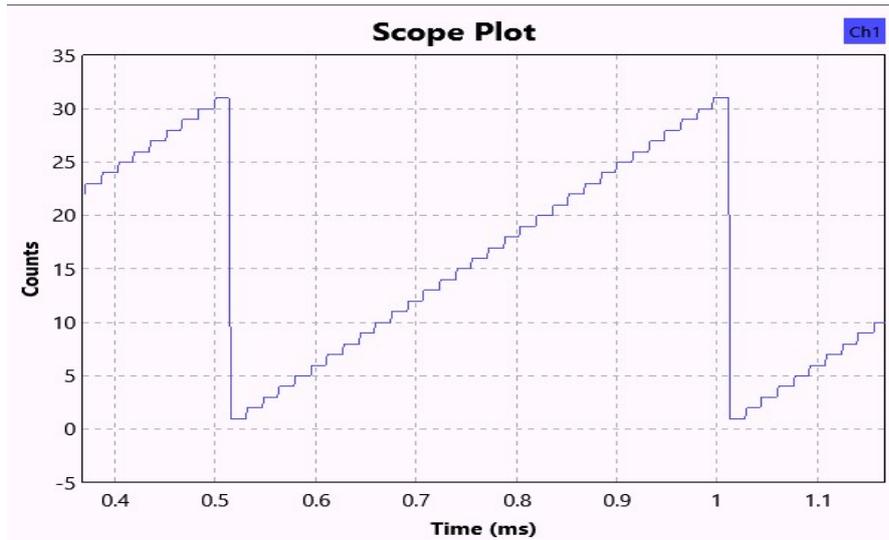


Figura 4-8 Gráfica SFCW generada por el diagrama de bloques

En la Figura 4-8 podemos observar cómo el intervalo de frecuencias oscila de 1 a 31 en un período de tiempo T de 0.5 ms, a partir del cual vuelve a reiniciar la secuencia.

Una vez se observa el funcionamiento de *SFCW*, se colocan sendos retardos en el diagrama de bloques para realizar la simulación de características similares a la realizada con *FMCW*, es decir, la simulación de detección de la plancha metálica. En la Figura 4-9 se puede observar la adición de tres bloques delay cuyo número de muestras se ha establecido en $N=0$, $N=200$ y $N=400$. Estos valores son superiores a los que se emplean en *FMCW* debido a que el barrido es menor.

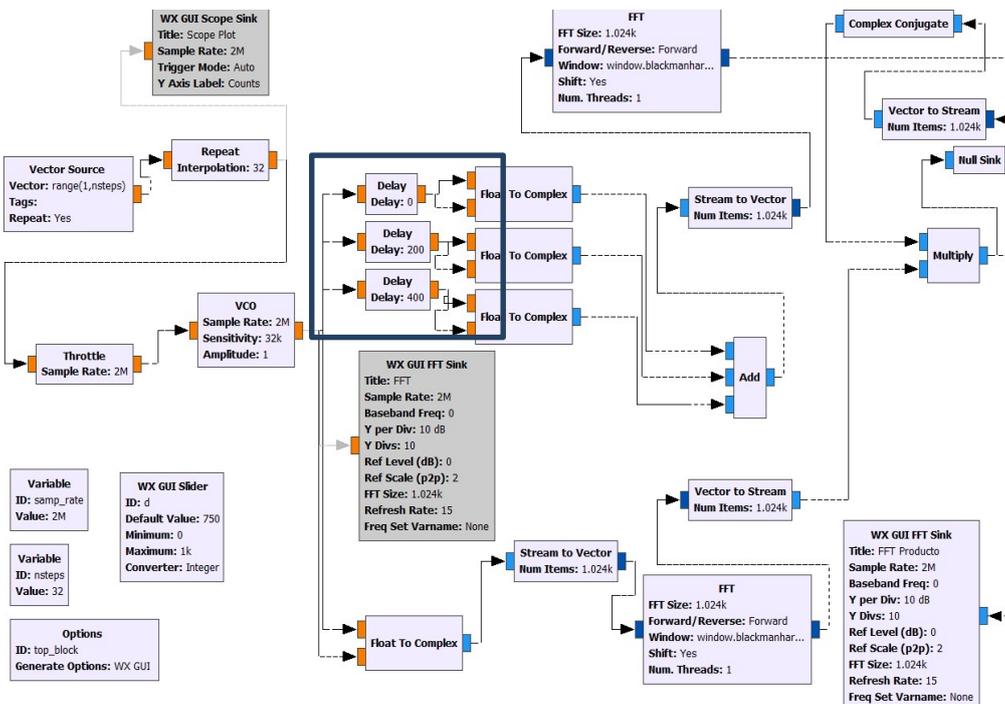


Figura 4-9 Diagrama de bloques con retardos incluidos.

De la introducción de los retardos se obtiene la gráfica en dominio de frecuencia generada que se expone en la Figura 4-10 en la que se puede observar el suelo a 0 MHz y el comienzo y final de lo que representaría la plancha metálica a 0,4 MHz y 0,8 MHz. Posteriormente, se trasladaría al dominio de tiempo mediante una transformada inversa de Fourier para obtener el perfil de tiempos donde observar los retardos implementados.

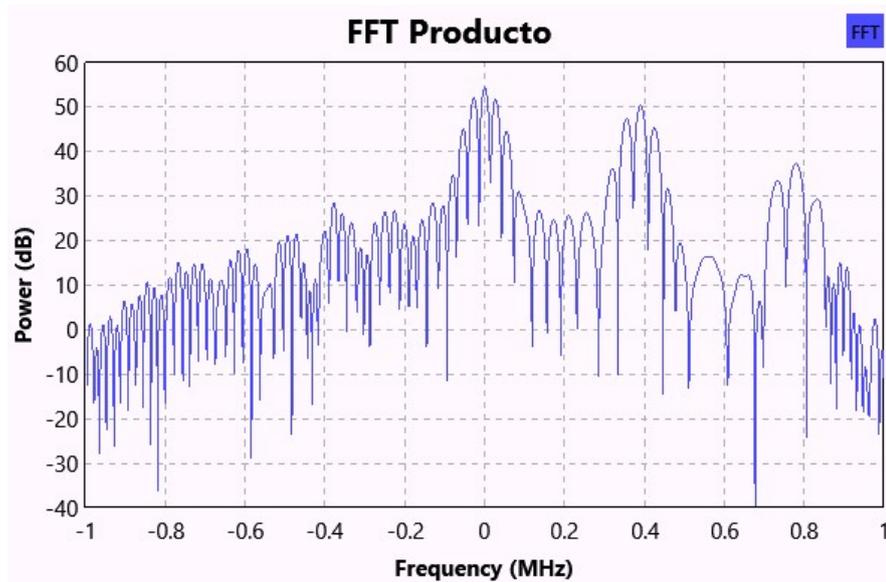


Figura 4-10 Gráfica generada en GNUradio donde se aprecian las señales generadas por los retardos.

4.4 Simulación numérica de un GPR comercial

En relación a la simulación de la señal electromagnética, el software que vamos a utilizar es el programa gprMax. GprMax es una herramienta de desarrollo libre que emplea el algoritmo de Yee para la resolución de las ecuaciones de Maxwell con el método de simulación numérica *FDTD* (*Finite-Difference Time-Domain*). Entre algunas de las características que ofrece en relación a este *TFG* se encuentran [59]:

- Modelado de suelos con propiedades dieléctricas y geométricas realistas.
- Construcción de objetos heterogéneos.
- Construcción de objetos con superficies rugosas.
- Librerías de antenas integradas en el programa.

Para el procesado de la medición efectuada con el programa gprMax, se va a emplear el programa ReflexW [60]. Este programa necesita del programa MATLAB (MATrix LABORatory) para la elaboración de los archivos de entrada. ReflexW cubre todo el espectro de datos de ondas, tanto *GPR*, de interés para este *TFG*, como sísmicas y ultrasonidos.

4.4.1 Ensayos con *gprMax*

Para realizar las simulaciones numéricas, se va a determinar un entorno que presente características similares a las que se encontrarían nuestras tropas en despliegues similares a Afganistán, Irak o Mali. Este terreno se caracteriza por resultar un medio arenoso, por lo que representaremos unas condiciones similares de manera sintética con el software *gprMax*.

Para llevar a cabo construcción del modelo sintético, se ha editado un archivo “.in” en el que se ha transcrito un texto para la configuración del modelo a simular, así como los parámetros de la adquisición de datos. En la Figura 4-6 se puede observar el archivo “.in” generado.

```
#medium: 5.0 0.0 0.0 0.0001 1.0 0.0 arena
-----
#domain: 2.5 2.5
#dx_dy: 0.0025 0.0025
#time_window: 15e-9
-----
#box: 0.0 0.0 2.5 2.0 arena
#box: 1.25 1.93 1.75 1.95 pec

-----
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource
-----
#analysis: 60 test1.out b
#tx: 0.75 2.01 MyLineSource 0.0 15e-9
#rx: 0.754 2.01
#tx_steps: 0.02 0.0
#rx_steps: 0.02 0.0
#end_analysis:
-----
#geometry_file: test1.geo
#title: test Model 1
#messages: y
```

Figura 4-11 Archivo “.in” con el que se va a realizar la simulación

Los diversos comandos implementados en la Figura 4-6 atienden a las siguientes directrices:

- **#medium: f1, f2, f3, f4, f5, f6, str1:** Este comando define los parámetros de un medio establecido. En este caso, hemos escogido arena como medio principal donde realizar la simulación. Cada uno de los comandos representa lo siguiente:
 - F1: Nos indica la permitividad del medio, para esta simulación tendrá un valor de 5.

- F2: Indica permitividad relativa a una frecuencia infinita.
 - F3: Indica el retardo del medio.
 - F4: Proporciona la conductividad del medio (S/m) en nuestra simulación tendrá un valor de 0,0001 S/m.
 - F5: Nos indica la permeabilidad del medio, que para la simulación adopta un valor de 1,00
 - F6: Indica la conductividad magnética del medio.
 - Str1: Es el identificador del medio que para nuestra simulación, se trata de arena.
- **#domain f1, f2:** Este comando es empleado para detallar el tamaño del modelo. Ambos parámetros, f1 y f2, indican el tamaño en metros en los ejes X e Y respectivamente. Para la simulación se ha definido un dominio de 2,5 m de largo por 2 m de profundidad.
 - **#dx_dy: f1, f2:** Este comando es empleado para detallar la resolución espacial en los ejes X e Y respectivamente. Con el parámetro f1 obtenemos la resolución en el eje X, y con el parámetro f2 la respectiva al eje Y. Para la simulación efectuada, se definió una resolución tanto en el eje X, como en el eje Y de 2,5 mm. Si combinamos este comando con el #domain anteriormente descrito, podemos determinar el número de celdas que vamos a emplear para definir el modelo. El tamaño de la celda será cometido de las geometrías que pretendamos simular, así, a mayor resolución geométrica, menor tamaño de celda.
 - **#time_window: f1:** Con este comando se detalla la ventana de tiempos requerida en la simulación. Para esta simulación se ha empleado una ventana de tiempos (tiempo doble) de 15 ns.
 - **#box f1, f2, f3, f4, str1:** El comando #box nos va a introducir un rectángulo en la simulación con unas propiedades específicas del modelo. Los parámetros f1 y f2 son las coordenadas de la esquina inferior izquierda del rectángulo acorde a los ejes X e Y. Por su parte, f3 y f4, indican las coordenadas de la esquina superior derecha referente a los ejes X e Y. Str1, al igual que en el comando #medium, nos indica el medio empleado en la simulación. Para esta simulación, hemos realizado dos comandos #box. El primero dimensiona el área de trabajo de la simulación, en este caso un cajón de arena. Respecto al segundo #box, este define una plancha metálica con dimensiones 0,5 m de largo y 0,02 m de ancho, la cual se presenta como el objeto a ser detectado por el *GPR*. Esta plancha metálica estaría enterrada a una profundidad de entre 5 y 7 cm. Se ha escogido esta profundidad en referencia a la que estaría enterrada una mina antipersonal, objeto de este trabajo.

- **#line_source: f1, f2, str1, str2:** Con este comando introduciremos diferentes variables que definiremos a continuación: f1 y f2, son referidas a la amplitud en Amperios de la corriente de la fuente. F2, por su parte es la frecuencia central de la antena en Hertzios. Para esta simulación el valor de la corriente ha sido de 1 A, y una frecuencia central de 2,3 GHz, la cual permite la detección de artefactos enterrados a profundidades de centímetros. Los dos siguientes parámetros, str1 y str2 determinan el tipo de excitación y las especificaciones de esa fuente con el punto de aplicación respectivamente. Para este TFG se ha considerado una señal Gaussiana.
- **#analysis: f1, file1, c1:** Dentro del comando #analysis, el parámetro f1 nos proporciona el número de elementos que forman el modelo que genera el array y el tiempo cero para cada uno de los f1. File1, se refiere al nombre del fichero. El parámetro c1 puede tomar el valor a ó b originando el formato de salida del archivo en ASCII o BINARY respectivamente. En la simulación efectuada para este trabajo se va a obtener en formato BINARY.
- **#tx: f1, f2, str1, f3, f4:** Con este comando se definen las coordenadas del punto transmisor modelo con los parámetros f1 y f2 como las coordenadas X e Y respectivamente, definidas estas en metros. Srt1 muestra el identificador de la fuente, ya definido anteriormente en el comando #line_source. Por su parte, el parámetro f3 representa un retardo para el inicio de la fuente, y f4 nos da el tiempo. Este tiempo nos es útil para que la fuente deje de funcionar si la simulación durara mas tiempo del requerido.
- **#rx: f1, f2:** Con este comando y sus parámetros f1 y f2 definimos las coordenadas en los ejes X e Y en las que se ubica el punto receptor en el modelo. Estas coordenadas vienen dadas en metros. En este *TFG*, la distancia entre dipolos (antena receptora y antena transmisora) se ha considerado de 4 cm, que es la distancia para una antena de 2.3 GHz comercial (Malå Geoscience).
- **#tx_steps: f1, f2;rx_steps:f1, f2:** Este comando, tanto en emision como en recepción nos va a proporcionar una idea del intervalo de espacio que va a aparecer entre pulso y pulso. Para ello, los parámetros f1 y f2 representan un incremento en metros de las coordenadas de los ejes X e Y.
- **#geometry_file: file 1.geo:** El comando #geometry_file contiene la información referente a la geometría del modelo, la cual será guardada en formato binario. Para ello, dispone del parámetro file1 el cual da nombre a dicho archivo geométrico.
- **#Title: file1:** Es el comando que da título al modelo que estamos realizando.
- **#messages: c1:** Este último comando nos permite el control parcial de la cantidad de información mostrada en la pantalla. El parámetro c1 puede adoptar dos valores: y (yes) o n (no) con los que puede encender o apagar los mensajes en la pantalla.

Además del test1 expuesto previamente, se llevó a cabo una segunda prueba o test2 en el que se efectuará una simulación con los mismos valores de los comandos empleados en el test1. A diferencia de la primera simulación, esta segunda prueba va a variar en la colocación de la plancha metálica que estaría enterrada a una profundidad de entre 10 y 12 cm. Se ha elegido esta profundidad para simular la colocación de un UXO, el cual, a diferencia de las minas antipersonal, precisa ser enterrado a una profundidad mayor para evitar dejar rastro en el terreno y que sea identificado de manera visual.

```
#medium: 5.0 0.0 0.0 0.0001 1.0 0.0 arena
-----
#domain: 2.5 2.5
#dx_dy: 0.0025 0.0025
#time_window: 15e-9
-----
#box: 0.0 0.0 2.5 2.0 arena
#box: 1.25 1.88 1.75 1.9 pec

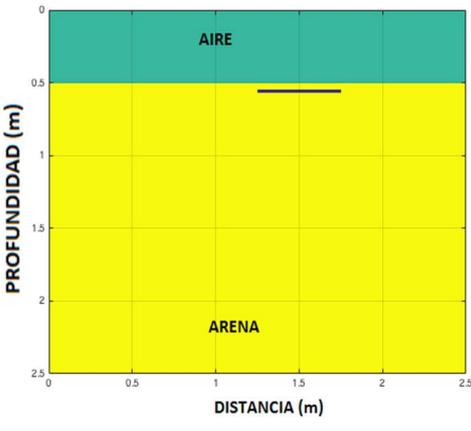
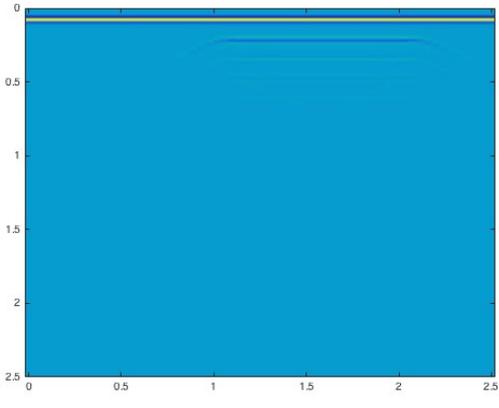
-----
#line_source: 1.0 2300e6 ricker MyLineSource
-----
#analysis: 60 test2.out b
#tx: 0.75 2.01 MyLineSource 0.0 15e-9
#rx: 0.754 2.01
#tx_steps: 0.02 0.0
#rx_steps: 0.02 0.0
#end_analysis:
-----
#geometry_file: test2.geo
#title: test Model 2
#messages: y
```

Figura 4-12 Archivo “.in” referente al test2 realizado para la simulación numérica

5 RESULTADOS OBTENIDOS

5.1 Resultados simulación numérica del *GPR* comercial

Como resultado de la simulación numérica efectuada con gprMax, se obtuvieron dos modelos correspondientes a cada uno de los test realizados con sus radargramas correspondientes, tal y como se observa en la Tabla 5-1.

MODELO	RADARGRAMA GENERADO
 <p>TEST1</p>	

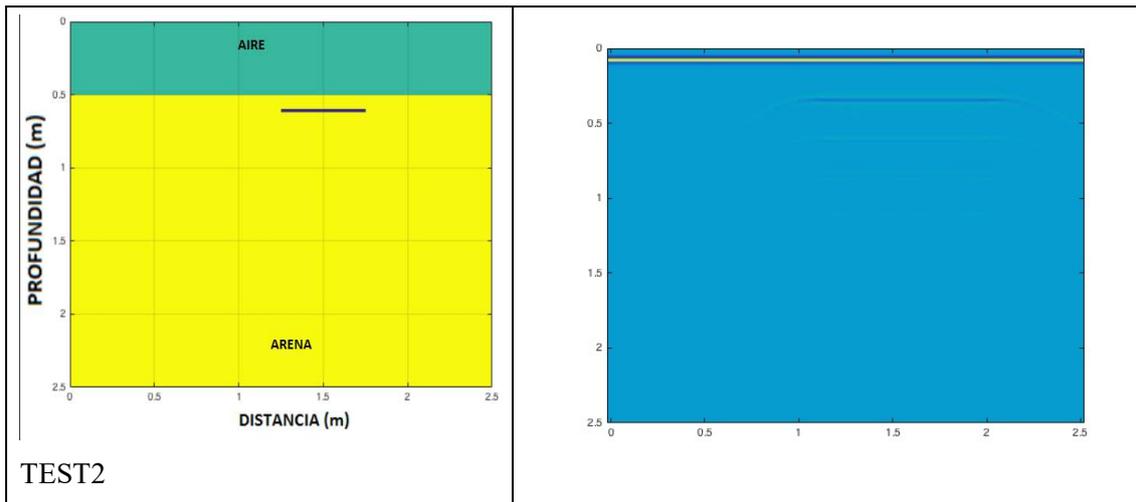


Tabla 5-1 Modelos y radargramas del test1 (superior) y el test2 (inferior)

En ambos radargramas se muestra una reflexión plana de forma continua a lo largo de la extensión de la plancha metálica de 2 cm de espesor simulada. Se trata de una reflexión de gran intensidad (amplitud), puesto que el metal se considera un reflector perfecto.

Para el procesado de los datos sintéticos producidos, se va a emplear el software ReflexW. Previamente, a partir de un código en Matlab, los datos obtenidos de la simulación (.out y .geo) se convierten a formato *GPR*, en concreto al correspondiente a un sistema de la marca Malå Geoscience (.rad y .rd3). El primero de ellos, Figura 5-2, muestra los parámetros de la medición como son: frecuencia de antena (2,3 GHz), intervalo entre trazas (0,01m), ventana de tiempos (1,5 ns) o la separación entre dipolos (0,04 m).

```

test1.rad: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
SAMPLES:2544
FREQUENCY:169588.2182
FREQUENCY STEPS:1
SIGNAL POSITION:0
RAW SIGNAL POSITION:0
DISTANCE FLAG:1
TIME FLAG:0
PROGRAM FLAG:0
EXTERNAL FLAG:0
TIME INTERVAL:0
DISTANCE INTERVAL:0.01
OPERATOR:
CUSTOMER:
SITE:
ANTENNAS:2300 MHZ
ANTENNA ORIENTATION:0
ANTENNA SEPARATION:0.04
COMMENT: Registro generado a partir de modelo GPRMAX
TIMEWINDOW:1.5001e-08
STACKS:1
STACK EXPONENT:1
STACKING TIME:0
LAST TRACE:60
STOP POSITION:0.59
SYSTEM CALIBRATION:0
START POSITION:0
    
```

Figura 5-1 Archivo “.rad” referente al test1

El segundo fichero (.rd3) contiene la matriz de datos, con datos de amplitud o intensidad de reflexión dispuestos en columnas (trazas) y filas (muestras). Una vez abierta esta matriz de datos en el programa ReflexW, se obtiene el radargrama correspondiente (Figura 5-3).

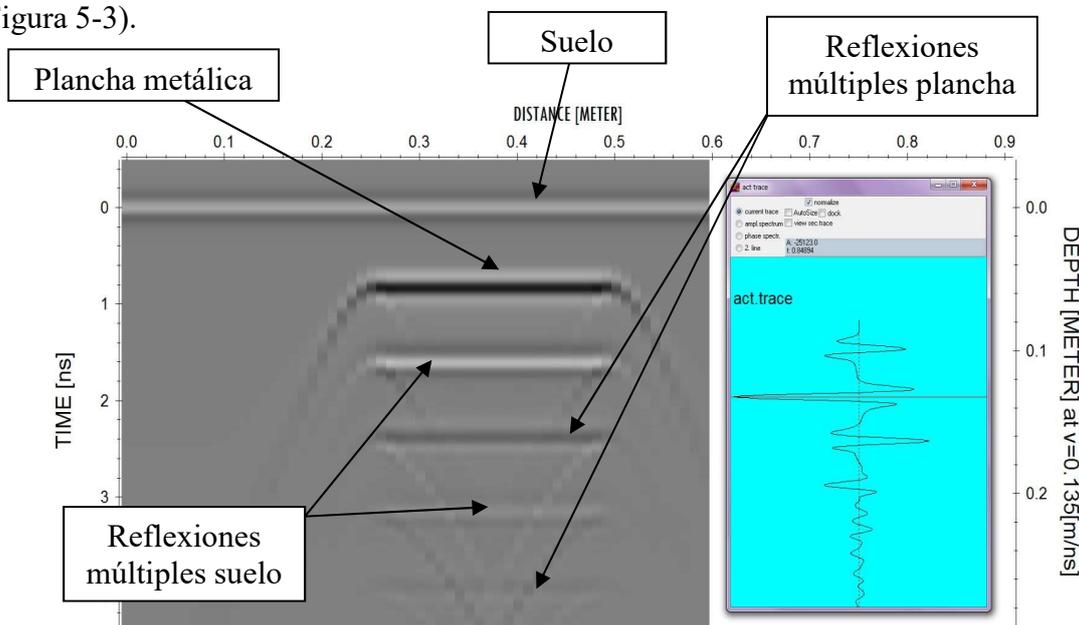


Figura 5-2 radargrama generado en ReflexW perteneciente al test1 donde se aprecian la detección de la plancha metálica y las reflexiones secundarias

Antes de su interpretación, es necesario realizar un procesado o filtrado de los datos.. Este proceso se compone de los siguientes filtros:

- **Establecimiento del tiempo cero:** Con el establecimiento del tiempo cero buscamos conocer la profundidad exacta en la que se va a encontrar el objeto. Si observamos la Figura 5-2, el suelo se encuentra alineado con los ejes tiempo, profundidad y distancia iniciados en 0, lo cual nos indica que se ha realizado el establecimiento de tiempo cero. Estos desajustes pueden ser producidos por derivas térmicas y son necesarios para evitar un salto en las mediciones iniciales debidos a la variación del aire con la antena en el espacio.
- **Filtros de frecuencia vertical:** Este filtro es aplicado para evitar las variaciones que puede sufrir el nivel promedio de la señal debidas a fenómenos de inducción o a limitaciones en los instrumentos. Estas variaciones pueden desplazar el nivel promediado de la señal de cero a un valor diferente. Al observar la parte derecha de la Figura 5-2, observamos que la traza sigue acorde a la amplitud central, por lo que este filtro ha sido aplicado.
- **Ganancia:** Para evitar las atenuaciones producidas por su propagación en el subsuelo, así como por las características electromagnéticas del terreno, se ha llevado a cabo una amplificación de la señal recibida.
- **Filtros de frecuencia horizontal:** Al aplicar estos filtros se busca la eliminación del ruido de baja frecuencia representado por bandas horizontales

a lo largo del radargrama. Este fenómeno es producido por el mal acoplamiento entre la antena y el medio.

Para el segundo modelo de simulación numérica, hemos realizado el mismo procesamiento de la señal, obteniendo el siguiente radargrama:

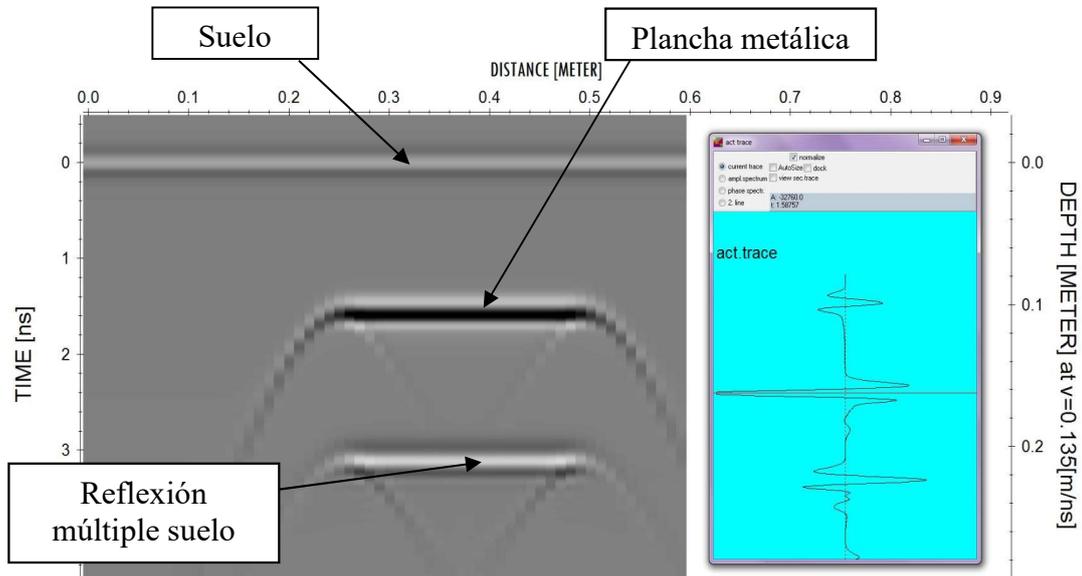


Figura 5-3 Radargrama perteneciente a la segunda medición efectuada donde se observa mayor distancia entre las reflexiones debido al mayor tiempo de detección

La diferencia existente con respecto al primero reside en el tiempo necesario para su detección, que pasa de aproximadamente 0,9 ns a 1,6 ns como podemos observar en el eje vertical izquierdo (temporal) de la Figura 5-3.

5.2 Resultados GPR realizados en el laboratorio.

Como culminación de este trabajo, se efectuó una prueba con el *GPR* diseñado para comprobar la transmisión del mismo y dar paso a futuras investigaciones sobre él. Para ello se generó una señal *SFCW* que comienza en 1,3 GHz con un ancho de banda de 1,5 MHz. La señal obtenida en modo de trabajo *SFCW* podemos observarla en la Figura 5-4 donde en la parte superior se observa una captura del barrido efectuado por la señal que barre el espectro de frecuencias. Abajo se puede observar la traza generada por dicho barrido que se extiende entre 1,3 GHz y 1,301,5 GHz acorde al ancho de banda seleccionado.

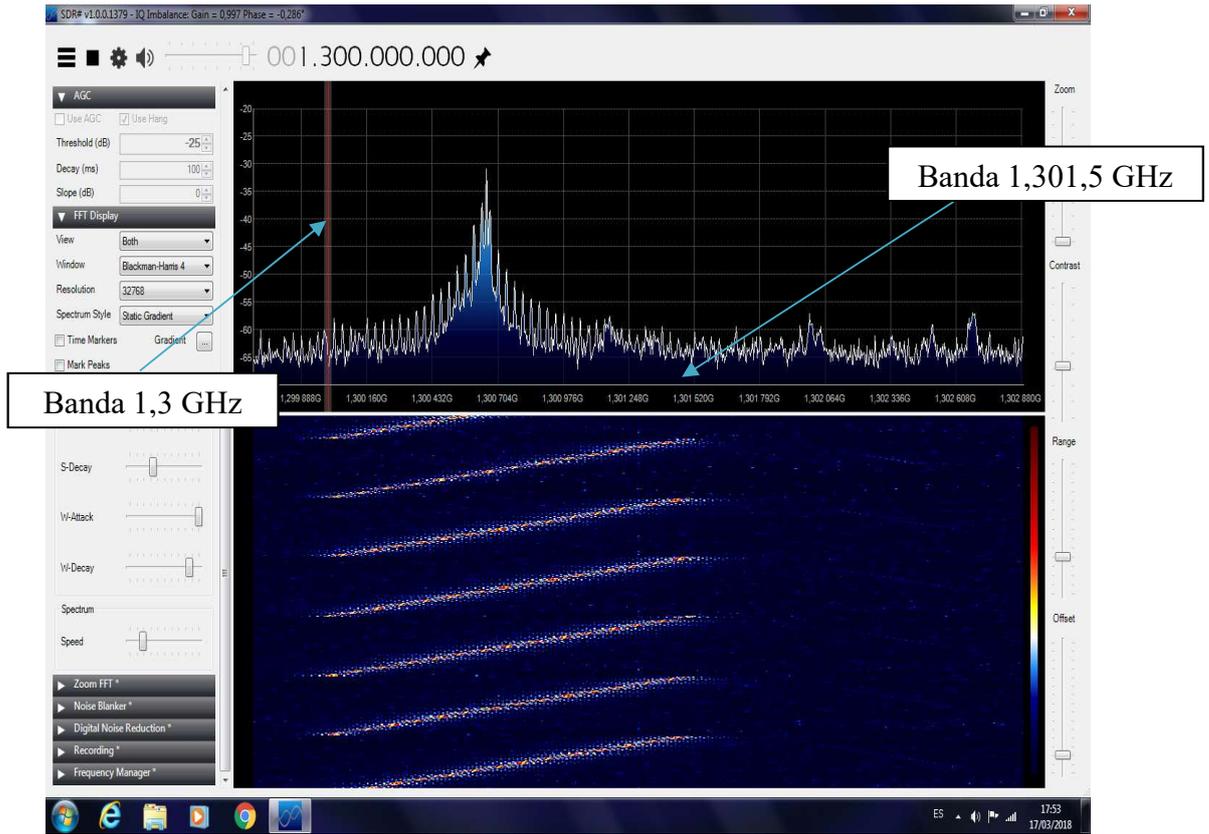


Figura 5-4 captura de pantalla donde podemos observar el barrido *SFCW*

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Conclusiones

Una vez finalizadas las diferentes simulaciones y ensayos que dan forma a este trabajo se han definido una serie de conclusiones en concordancia a los objetivos propuestos en el apartado 1.3.1 de este trabajo de fin de grado. En relación con estos objetivos, se ha diseñado un prototipo simulado de *GPR* para experimentación con diferentes tipos de onda y que emplee tecnología SDR para su funcionamiento. Destacar dentro de este aspecto, que se han llevado a cabo simulaciones con métodos *FMCW* y *SFCW* que permiten un mejor aprovechamiento de los medios disponibles relegando el método de prospección mediante pulsos cortos a un ámbito meramente teórico definido en este trabajo.

Acorde al objetivo alcanzado en el párrafo anterior, se han diseñado los esquemas de transmisión y recepción correspondientes a las dos formas de onda que han sido estudiadas y simuladas durante la realización de este trabajo y que son de aplicación en el *GPR* diseñado. Además, se han comparado los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en GNURadio con los obtenidos de la escenificación virtual de un *GPR* comercial.

A su vez, se ha realizado un modelo de georradar con elementos de bajo coste que cualquier usuario puede llevar a cabo mediante la adquisición del hardware empleado, o bien de otros componentes de características similares y que no suponga un desembolso considerable a nivel individual.

Para concluir este trabajo, se ha realizado una transmisión para comprobar el funcionamiento del georradar implementado mediante la emisión de una señal *SFCW* en la banda de 1,3 GHz pudiendo observar el barrido efectuado por dicha señal.

6.2 Líneas Futuras

Cómo líneas futuras para la continuación y mejora de este *TFG* se han propuesto las siguientes:

- Realización de pruebas de recepción de la señal transmitida que, por motivos de tiempo, no ha sido posible realizar en este trabajo.
- Estudio de la viabilidad de la tarjeta *SDR* empleada en el *TFG*, así como de otros modelos existentes en el mercado.
- Realización de ensayos de campo mediante el soterramiento de diferentes artefactos explosivos como minas y *UXO*.
- Comparación empírica de los resultados del *GPR* diseñado con un *GPR* comercial.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Boudet, Gabriel Cereceda, Simulación de sistemas de vigilancia para la evaluación de herramientas de control de tráfico aéreo, Universidad Politécnica de Madrid, 2015.
- [2] «Pagina Web Naciones Unidas,» [En línea]. Available: <http://www.un.org/es/peace/mine/what.shtml>.
- [3] «www.legaciesofwar.org,» [En línea]. Available: <http://legaciesofwar.org/about-laos/leftover-unexploded-ordnances-uxo/>.
- [4] Fernando M. Mañas y Javier Jordán,, Los Artefactos Explosivos Improvisados (IEDs), Athenea Intelligence. Red de investigación avanzada en insurgencia y terrorismo., 2007.
- [5] Monroy, Hernándo Cortés, «Grupo de Estudios Estratégicos,» [En línea]. Available: <http://www.gees.org/articulos/transformacion-y-nuevos-vehiculos-en-torno-a-los-nuevos-vehiculos-blindados-especiales-del-ejercito-de-tierra-lmv-lince-y-mrap-rg-31>.
- [6] Jorge Rodriguez Moreno, Empleo del GPR para la detección de UXO e IED, Centro Universitario de la Defensa, 2015.
- [7] Kwang Hee Ko, Gyubin Jang, Kyungmi Park, and Kangwook Kim, GPR-Based Landmine Detection and Identification Using, Hindawi Publishing Corporation, 2012.
- [8] «www.ejercito.mde.es,» [En línea]. Available: http://www.ejercito.mde.es/materiales/Vehiculos_ingenieros/husky.html?__locale=es.
- [9] «www.soldiersystems.net,» [En línea]. Available: <http://soldiersystems.net/2015/02/20/iraq-purchases-husky-mine-clearance-vehicles/>.

- [10] Xavier Núñez-Nieto, Mercedes Solla, Paula Gómez-Pérez, Henrique Lorenzo, Caracterización de la señal Georadar para la detección de explosivos enterrados, Centro Universitario de la Defensa, 2014.
- [11] C. Serrano Cordero, O. Perez Curuchet, Análisis, diseño estructural y construcción de un dron para la detección de minas antipersona., Universidad de Vilanova I la Geltrú, 2017.
- [12] Fernando I. Rial, Henrique Lorenzo, Manuel Pereira, Julia Armesto, Waveform Analysis of UWB GPR Antennas, 2009.
- [13] Mercedes Solla, Henrique Lorenzo, Fernando I. Rial, Alexandre Novo, Belén Riveriro., Aplicabilidad del georadar en el estudio de puentes romanos, Pontevedra: Universidad de Vigo, 2008.
- [14] «<http://www.ground-radar-gpr.com>,» [En línea]. Available: <http://www.ground-radar-gpr.com/es/>.
- [15] «www.terraplus.ca,» [En línea]. Available: http://www.terraplus.ca/products/gpr-ground-penetrating-radar/gpr_shielded.aspx.
- [16] «<http://blog-petrolero.blogspot.com.es>,» [En línea]. Available: <http://blog-petrolero.blogspot.com.es/2009/08/georadar.html>.
- [17] «<http://www.panatec-agua.com/>,» [En línea]. Available: <http://www.panatec-agua.com/georadar.php>.
- [18] A. P. Annan, J. L. Davis, «Impulse radar sounding in permafrost,» *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 11, 1976.
- [19] Enrique Lorenzo Cimadevila, Prospección geofísica de alta resolución mediante geo-radar. Aplicación a obras civiles, Madrid: Ministerio de Fomento, 1994.
- [20] Enrique Lorenzo, Vicente Cuellar, Geofísica de alta resolución en la ingeniería civil. Estudios en estructuras de hormigón utilizando geo-radar, Universidad Complutense de Madrid, 1995.
- [21] Sato, Motoyuki, GPR and Its Application to Environmental Study, Tohoku University, 2001.
- [22] Kerly L. Sánchez Mederos, Gustavo Malamé, Miguel González, Aplicación de Radar de penetración de suelos (GPR) para la caracterización geotécnica de suelos, Universidad Central de Venezuela, 2004.
- [23] Alexandre novo, Fernando I. Rial, Manuel Pereira, Henrique Lorenzo, Pedro Arias, Metodologías GPR para estudios 3D en arqueología, 5ª Asamblea Hipaso-Portuguesa de geodesia y geofísica, 2006.
- [24] Xavier Núñez-Nieto, Mercedes Solla, Henrique Lorenzo, «Applications of GPR for Humanitarian Assistance and Security,» de *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*, Springer, 2015.

- [25] Paula Brito_Schimmel, César Carreras, *Metodología Para La Prospección Geofísica En Arqueología*, Universitat Autònoma de Barcelona, 2010.
- [26] Mercè Subirana Domènech, Luis María Planchat Teruel, Ángel Cuquerella Fuentes, Albert Casas Ponsati, «Archivos de Criminología, Criminalística y Seguridad Privada,» Universidad de La Rioja, 2008.
- [27] «www.elpais.com,» [En línea]. Available: https://politica.elpais.com/politica/2017/02/07/actualidad/1486480810_978949.html.
- [28] «<http://www.abc.es>,» [En línea]. Available: <http://www.abc.es/espana/20140919/abci-cronologia-ruth-jose-sepultura-201409191740.html>.
- [29] «www.lavozdetalavera.com,» [En línea]. Available: <http://www.lavozdetalavera.com/noticia/17986/comarca/localizan-una-fosa-de-fusilados-en-la-guerra-civil-mediante-un-georradar.html>.
- [30] Guillermo Sagripanti, Diego Villalba, David Aguilera y Aldo Giaccardi, «Geología forense: Métodos aplicados en la búsqueda de desaparecidos en la región central de Argentina,» *Revista de la Asociación Arqueológica Argentina*, 2013.
- [31] Vega Pérez-Gracia, Mercedes Solla, «Inspection Procedures for Effective GPR Surveying in Buildings,» de *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*, Springer, 2015.
- [32] Mario Tavera, Rafael Pérez García, *Aplicación del georadar para la mejora del rendimiento de una red hídrica.*, Universidad Politécnica de Valencia, 2008.
- [33] Guisella Fabiola Gacitúa Lovera, *Estudio en estructuras de hormigón armado mediante el uso de un radar de penetración terrestre*, Universidad Austral de Chile, 2006.
- [34] Xavier Núñez nieto, Mercedes Solla Carracelas, Henrique Lorenzo Cimadevila, Alexandre Novo Lamoso, «Uso del georadar en aplicaciones militares: Caso particular de detección de tuneles subterráneos,» Centro Universitario de la Defensa, 2014.
- [35] M. Coll, M. López-Blanco y A. Marcuello, *Resultados preliminares en la caracterización geométrica 3D de un litosoma arenoso de progradación deltaica mediante Georadar (GPR)*.
- [36] «www.eppsaviation.com,» [En línea]. Available: <http://eppsaviation.com/about/the-lost-squadron>.
- [37] Olga Lucia Lopera Tellez, Bart Scheers, «Ground-Penetrating Radar for Close-in Mine Detection,» de *Mine Action - The Research Experience of the Royal Military Academy of Belgium*, Royal Military Academy of Belgium, 2017.
- [38] «<http://bitacora.ricardomartin.info>,» [En línea]. Available: <http://bitacora.ricardomartin.info/2012/07/23/el-bunker-de-hitler-en-berlin/>.

- [39] «<https://www.sensoft.ca>,» [En línea]. Available: <https://www.sensoft.ca/products/rescue-radar/overview/>.
- [40] «<https://www.pearson-eng.com>,» [En línea]. Available: <https://www.pearson-eng.com/pearson-engineering-to-introduce-key-combat-engineer-equipment-to-delegations-at-dsei/>.
- [41] «<https://www.epequip.com>,» [En línea]. Available: <https://www.epequip.com/catalogue/unmanned-ground-vehicles/amulet-vehicle-mounted-mine-detection-system/>.
- [42] Alauddin Bhuiyan, Baikunth Nath, «Anti-Personnel Landmine Detection Based on GPR and IR Imaging: A Review,» University of Melbourne, 2010.
- [43] Miguel García Guindo, Gabriel Martínez – Valera González, La guerra híbrida: Nociones preliminares y su repercusión en el planeamiento de los países y organizaciones occidentales, Instituto Español de Estudios Estratégicos, 2015.
- [44] «<http://abcblogs.abc.es/terra-mar-aire>,» [En línea]. Available: <http://abcblogs.abc.es/terra-mar-aire/wp-content/uploads/sites/46/2013/04/AT32buena.jpg>.
- [45] «<http://agenciadenoticias.unal.edu.co>,» [En línea]. Available: <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/articulo/dispositivo-portatil-detecta-minas-antipersona.html>.
- [46] «<http://www.javeriana.edu.co>,» [En línea]. Available: http://www.javeriana.edu.co/blogs/coloradoj/research/uav_mine-2/drone-demining-copy/.
- [47] «<https://www.strategic-culture.org>,» [En línea]. Available: <https://www.strategic-culture.org/news/2016/08/08/tu-214r-deployed-syria-displaying-enhanced-intelligence-capability.html>.
- [48] Gutierrez, Jorge Martín, «Análisis de subsuelo utilizando técnicas geofísicas. Sistema Georradar RAMAC/GPR,» de *VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía*, 2004.
- [49] Jol, Harry M., «Ground Penetrating Radar: Theory and Applications,» Elsevier, 2009.
- [50] Raúl Broseta Gutiérrez, Amparo Núñez Andrés, Jordi Padín Devesa, Georradar aplicado a la Arqueología: El palacio real de Valencia, Universidad Politécnica de Cataluña, 2010.
- [51] Nestor Bonomo, Matias de la Vega, El método Georradar, Facultad de ciencias exactas y naturales, 2006.
- [52] Cam Nguyen, Joongsuk Park, Stepped Frequency Radar Sensors Theory, Analysis and Design..
- [53] Daniel Vargas González, Antoni Broquetas Ibars, Detección de movimiento mediante técnicas radar CW-FM en banda W, Barcelona, 2014.

- [54] «<http://i56578-swl.blogspot.com.es/>,» [En línea]. Available: <http://i56578-swl.blogspot.com.es/2015/02/oth-b-radar-fmcw-principles.html>.
- [55] M. Mercuri, D. Schreurs, and P. Leroux, «SFCW Microwave Radar for In-Door Fall Detection,» *BioWireleSS*, 2012.
- [56] «<https://greatscottgadgets.com/>,» [En línea]. Available: <https://greatscottgadgets.com/hackrf/>.
- [57] Mendoza Patiño, Emele De Jesus Serrano Bernal, Luis Eduardo, Programación de una plataforma sdr (software defined radio) para la detección de minas antipersonas, Universidad Pontificia Javeriana, 2014.
- [58] «<http://www.gprmax.com/>,» [En línea]. Available: <http://www.gprmax.com/about.shtml>.
- [59] «<http://www.sandmeier-geo.de/>,» [En línea]. Available: <http://www.sandmeier-geo.de/reflexw.html>.
- [60] Mngadi, Andile, Design of a SystemView Simulation of a Stepped Frequency Continuous Wave Ground Penetrating Radar, Cape Town, 2004.