



Universidad de León



Escuela Superior y Técnica
de Ingenieros de Minas

GRADO EN INGENIERÍA MINERA

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO PARA LA REHABILITACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE FASGAR (LEÓN).

León, Julio de 2014

Autor: Carlos Pérez Santos
Tutor: Laura Álvarez de Prado

El presente proyecto ha sido realizado por D./Dña. Carlos Pérez Santos, alumno/a de la Escuela Superior y Técnica de Ingenieros de Minas de la Universidad de León para la obtención del título de Grado en Ingeniería Minera.

La tutoría de este proyecto ha sido llevada a cabo por D./Dña. Laura Álvarez de Prado, profesor/a del Grado en Ingeniería Minera.

Visto Bueno

Fdo.: D./Dña. Carlos Pérez Santos
El autor del Trabajo Fin de Grado

Fdo.: D./Dña. Laura Álvarez de Prado
El Tutor del Trabajo Fin de Grado

RESUMEN

Debido a la restauración y futura puesta en marcha de la central hidroeléctrica de Fasgar se decidió realizar un estudio sobre la hidrogeología de la zona ya que la central no se alimenta directamente del cauce del río.

Este estudio se compone fundamentalmente de dos partes, por un lado un estudio de la geología, y por otro lado de la hidrología. Como es conocido en la zona existe una relación directa entre el río Urdiales y el manantial que abastece a la central.

El estudio hidrológico se realizará como cualquier otro, definiendo las características de la cuenca, precipitaciones...etc. con el fin de determinar una curva de caudales para el río, esto le proporcionará la información necesaria al técnico competente para dimensionar la central hidrológica según las posibilidades del lugar.

A la hora de definir las características geológicas, que es lo que nos ocupa principalmente, ya que la central ya ha estado en funcionamiento, nos ayudaremos de los mapas geológicos existentes, las observaciones en el campo y nos apoyaremos de un equipo de georradar que nos ayude a detectar posibles estructuras subterráneas.

De este modo quedará justificado la instalación de la central para el aprovechamiento del caudal de agua, y quedará definido si este procede realmente del río Urdiales.

ABSTRACT

Because the restoration and future operation of the Fasgar hydroelectric was decided to conduct a study about the hydrogeology of the area because the plant is not fed directly from the riverbed.

This study consists of two parts, the first is a study of the geology and hydrology across. As is known in the area exist a direct relationship between the Urdiales river and the spring that supplies the plant.

The hydrological study will be conducted as any other, defining characteristics of the basin, rainfall ... etc. in order to determine a curve for the river flow, this will provide the necessary information to competent technician to size the hydrological station according to the possibilities of the place.

A defining geological features, which is what concerns us, because the plant has been in operation, we help existing geological maps, field observations and we will use a georradar for identify potential underground structures.

This will be justified the installation of the plant to the use of water flow, and will be defined if this comes from the Urdiales river.

ÍNDICE

RESUMEN	3
ÍNDICE	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos.	1
1.2 Situación geográfica.....	1
1.2.1 Acceso.	2
1.3 Metodología de trabajo.	2
1.3.1 Fases:	3
1.3.1.1 Fase 1: Trabajos de documentación.....	3
1.3.1.2 Fase 2: Trabajos de campo.	3
1.3.1.3 Fase 3: Trabajos de gabinete.....	3
1.3.2 Métodos de obtención de información.....	3
2 SITUACIÓN GEOLÓGICA.....	4
2.1 Introducción.....	4
2.2 Estratigrafía.....	4
2.2.1 Precámbrico.....	5
2.2.2 Cámbrico inferior (Formación Cándada-Herrería, CA1).	6
2.2.3 Cámbrico inferior medio:(Caliza de Vegadeo, CA1-2).	7
2.2.4 Cámbrico Medio- Ordovícico Inferior:(Serie de los Cabos, CA2-O1).....	7
2.2.5 Cuaternario.	7
2.3 Tectónica.....	8
2.3.1 Deformación Hercínica.	9
2.3.1.1 -Primera fase de deformación Hercínica.....	9
2.3.1.2 -Segunda fase de deformación.....	9
2.3.1.3 -Tercera fase de deformación.	9
2.3.1.4 -Deformaciones tardihercínicas.	10
3 GEOFÍSICA.....	11
3.1 Concepto.....	11
3.1.1 Métodos eléctricos.....	11

3.1.1.1	Sondeo eléctrico vertical, SEV.	12
3.1.1.2	Tomografía eléctrica.....	12
3.1.2	Métodos gravimétricos.....	13
3.1.3	Método sísmico.	14
4	EXPLORACIÓN MEDIANTE GEORRADAR.....	15
4.1	Introducción.....	15
4.2	Teoría de propagación de los campos electromagnéticos.	15
4.2.1	<i>Parámetros electromagnéticos característicos del medio.</i>	17
4.2.1.1	Conductividad eléctrica σ	17
4.2.2	Permitividad eléctrica ϵ	19
4.2.3	Permeabilidad magnética μ	22
4.3	Propagación de las ondas.....	22
4.3.1	Características principales de las ondas electromagnéticas	24
4.3.1.1	Velocidad de propagación.	24
4.3.1.2	Longitud de onda.....	25
4.3.1.3	Impedancia de un medio.....	25
4.3.1.4	Profundidad nominal de penetración.	26
4.3.2	Reflexión de las ondas.	26
4.3.3	Refracción de las ondas:	26
4.4	Fenómenos en la propagación de las ondas.....	27
4.4.1	Ruido.	27
4.4.2	Dispersión.	27
4.4.3	Atenuación Geométrica.....	27
4.4.4	Difusión (Scattering).	27
4.4.5	Interferencias.....	27
4.4.6	Absorción.	27
4.5	Resolución.....	28
4.5.1	Resolución vertical.....	28
4.5.2	Resolución horizontal:	30
4.6	Descripción del equipo.....	31
4.7	Exploración mediante Georradar.....	32
4.7.1	Determinación de los parámetros más significativos.....	32
4.7.1.1	Características del medio de propagación:	32
4.7.1.2	Constante de propagación γ :	33

4.7.1.3	Impedancias para la frecuencia de 225MHz	34
4.7.1.4	Velocidad de propagación para 225MHz:	35
4.7.1.5	Longitud de onda:.....	36
4.7.1.6	Coeficientes de reflexión y transmisión entre medios:.....	36
4.7.1.7	Resolución vertical:	37
4.7.1.8	Otros parámetros	37
4.7.2	Planificación previa al trabajo de campo.....	37
4.7.3	Trabajo de campo	38
4.7.3.1	Procedimiento seguido para la toma de datos con el equipo:	38
4.7.4	Análisis de los datos obtenidos.....	42
4.7.4.1	Perfiles realizados.....	42
5	Conclusiones.	49
6	Estudio Hidrológico.....	52
6.1	Características de la cuenca del Duero.	52
6.1.1	Características físicas	52
6.1.2	Características hidrológicas generales.....	54
6.1.3	Características biológicas.....	54
6.2	Disponibilidades hidrológicas:	56
6.2.1	Subcuenca del Rio Urdiales.....	57
6.2.2	Precipitaciones.....	57
6.3	Caudal Ecológico.	60
6.4	Curva de caudales clasificados:.....	61
6.5	Peculiaridades Hidrológicas.	64
7	Resumen de conclusiones:	66
8	Bibliografía.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Situación geográfica en la provincia de León	1
Figura 1-2 Vista aérea del valle, la localidad y de la carretera de acceso	2
Figura 2-1 Esquema geológico regional de la zona	5
Figura 2-2 Extracto del mapa geológico en el área de influencia y leyenda del mismo	8
Figura 2-3 Kink- Bands	9
Figura 2-4 Pliegues del tipo Chevrón.	9
Figura 2-5 Trazado del corte geológico correspondiente a la Figura 2.6	10
Figura 2-6.- Corte geológico próximo a Fasgar.	10
Figura 2-7 Solución propuesta en la memoria del mapa geológico a la deformación estructural en Fasgar	10
Figura 3-1 Esquema unifilar que representa las características eléctricas del medio rocoso	12
Figura 3-2 Configuraciones eléctricas según el método de Wenner a la izquierda, y de Schulenberg a la derecha.	12
Figura 3-3 Representación simplificada del funcionamiento de un gravímetro	13
Figura 3-4 Esquema de funcionamiento del método sísmico, mediante el disparo de una carga explosiva en superficie y diversos geófonos colocados equidistantemente.	14
Figura 4-1 Representación de la transmisión de una onda electromagnética en un medio	23
Figura 4-2 refracción sobre una superficie dieléctrica perfecta.	26
Figura 4-3 Esquema de refracción de una onda entre dos medios con diferentes propiedades	26
Figura 4-4 Representación esquemática que simula la resolución vertical en un equipo de georradar	29
Figura 4-5 Detección de un objeto aislado mediante georradar.	30
Figura 4-6 Imagen obtenida del programa Run, correspondiente a las trazas de uno de nuestros perfiles.	31
Figura 4-7 Ejemplo de hipérbolas visibles en un radargrama	31
Figura 4-8 Partes que componen el georradar	32
Figura 4-9 Esquema propuesto inicialmente para el trazado de los perfiles	38
Figura 4-10 Montaje de las antenas y preparación del equipo.	39
Figura 4-11 Transporte del equipo a la izquierda y antenas del georradar mientras se realiza un perfil	39
Figura 4-12 Fotografía del momento en el que se está montando el equipo	40

Figura 4-13 Esquema I de los perfiles realizados sobre el terreno.....	41
Figura 4-14 Esquema II de los perfiles realizados sobre el terreno.....	41
Figura 4-15 vista del programa Win Ekko, utilizado para tratar los perfiles obtenidos. en él se ve en la parte superior todos los perfiles realizados en el estudio, y en la parte inferior un cuadro en el que se introducen los procesos que se quieren aplicar.	42
Figura 4-16 Punto en el que el agua se infiltra y sobre el que están realizados los perfiles A y D	43
Figura 4-17 Perfil D	44
Figura 4-18 Perfil A.....	44
Figura 4-19 Perfil B.....	45
Figura 4-20 Perfil B con otro contraste, en el que destacan más otros elementos que en el perfil anterior.....	46
Figura 4-21 Perfil E	47
Figura 4-22 Perfil H	47
Figura 4-23 Perfil I.....	48
Figura 5-1 Rango de posibilidades en la trayectoria del agua hacia su salida.....	49
Figura 5-2 Esquema que representa la dirección de salida del agua en la ladera.	50
Figura 5-3 salida del agua y muestra del terreno presente, compuesto por tierra con grandes rocas procedentes de los derrubios.....	50
Figura 5-4 Leyenda correspondiente a la Figura 5-5	50
Figura 5-5 Representación esquemática de la geología, obtenida a partir del mapa geológico y de las observaciones en el campo.....	51
Figura 6-1 Caracterización geológica de la Cuenca del Duero.....	53
Figura 6-2 Mapa de isoyetas correspondiente a la provincia de León, elaborado a partir de la información disponible en el ministerio de agricultura pesca y medio ambiente.	54
Figura 6-3 Series de vegetación presentes en la Cuenca del Duero.....	55
Figura 6-4 Cuenca del Rio Urdiales utilizada para el cálculo del caudal a su paso por la localidad de Fasgar.	57
Figura 6-5 Precipitaciones meses de enero y febrero.	58
Figura 6-6 Precipitaciones meses de marzo y abril.	58
Figura 6-7 Precipitaciones meses de mayo y Junio.	58
Figura 6-8 Precipitaciones meses de Julio y agosto.....	59
Figura 6-9 Precipitaciones meses de septiembre y octubre.....	59
Figura 6-10 Precipitaciones meses de noviembre y diciembre.....	59
Figura 6-11 Rio Omañas en verde y su afluente, el rio Urdiales, en rojo	61
Figura 6-12 Curva de caudales del rio Urdiales para cada mes.....	63

Figura 6-13 Curva de caudales del Rio Urdiales a lo largo del año.....	64
Figura 6-14 Toma de agua en el rio de forma natural.....	64
Figura 6-15 Punto en el que se tomará el agua para alimentar la central (en este momento el caudal es mínimo porque está bloqueado el paso del agua)	65
Figura 6-16 Aspecto del rio Urdiales a la entrada de Fasgar los días que se realizaron las actividades de campo	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Coordenadas de los límites de la zona de estudio	2
Tabla 4-1 Valores de conductividad para distintos materiales	17
Tabla 4-2 Valores de permitividad eléctrica para distintos materiales.....	19
Tabla 4-3 Valores de permeabilidad magnética de algunos materiales.....	22
Tabla 4-4 Coordenadas del inicio y fin de los perfiles realizados.....	40
Tabla 6-1 Tipos de Bosques en La cuenca del Duero.....	56
Tabla 6-2 Precipitaciones medias de cada mes	60
Tabla 6-3 Valores medios de las precipitaciones y su transformación a escorrentía de superficie.....	61
Tabla 6-4 Aforos del Rio Omañas desde1970 hasta 1990	62
Tabla 6-5 Caudal del Rio Urdiales calculado y su corrección para obtener los valores reales.....	63

1 INTRODUCCIÓN.

1.1 Objetivos.

Debido a la restauración y futura puesta en marcha de la central hidroeléctrica de Fasgar, se ha estudiado la posibilidad de determinar la fuente de agua que abastece a la central.

Este caudal de agua surge del macizo que se encuentra al sur de la localidad llamado Chano del Miro. El objetivo de este estudio será determinar las características de esta surgencia de agua, procedencia, caudal, estructura geológica que provoca este fenómeno y la relación que pueda tener con la escorrentía superficial de la zona.

Como punto de partida se conoce por los habitantes de la localidad que existe una relación directa entre la surgencia de agua que abastece a esta central y el río Urdiales, que atraviesa la localidad. A pesar de que esta central ya ha estado en funcionamiento no se ha profundizado demasiado en determinar estas características, por lo tanto con los nuevos datos que obtengamos del estudio, y los datos históricos recopilados en la zona se pretende alcanzar los objetivos antes descritos.

1.2 Situación geográfica.

La central hidroeléctrica se sitúa al margen derecho del río Urdiales, uno de los principales afluentes del río Omaña que transcurre por el Valle Gordo en la localidad de Fasgar, perteneciente al municipio de Murias de Paredes, comarca de Omaña, en la comunidad autónoma de Castilla y León.

Las coordenadas UTM de la central referidas al Huso 29 son las siguientes:

X: 727.131,6 Y: 4.743.488,6



Figura 1-1 Situación geográfica en la provincia de León

Este valle se encuentra a una altitud aproximada de 1250m sobre el nivel del mar, rodeado por cumbres de más de 2000m pertenecientes a la sierra de Gistredo. Situándose esta localidad dentro de una zona clasificada como Reserva de la Biosfera, Lugar de Importancia Comunitaria y Zona de Especial Protección para las Aves. Esto se debe a la presencia de importantes especies amenazadas como son el oso pardo y el Urogallo Cantábrico.

La zona de estudio queda limitada por las coordenadas UTM referidas al Huso 29, siendo las siguientes:

Tabla 1-1 Coordenadas de los límites de la zona de estudio

	Coordenada X	Coordenada y
Punto A	726322,00	4743609,00
Punto B	726322,00	4743389,00
Punto C	727237,00	4743389,00
Punto D	727237,00	4743609,00

1.2.1 Acceso.

La forma más rápida de acceder a la localidad comenzando la ruta desde la ciudad de León es salir por la carretera C-623 hacia el norte, y seguir por la C-626 hasta llegar a La Magdalena. Una vez nos encontramos en este punto continuamos por la carretera LE-493 aproximadamente 24 km, cuando lleguemos a Aguasmestas tomamos el desvío por la calle Don Segundo García, después de 14 km llegaremos a Fasgar.



Figura 1-2 Vista aérea del valle, la localidad y de la carretera de acceso

1.3 Metodología de trabajo.

El presente estudio se elaborará siguiendo la programación propuesta para su desarrollo, combinando las actividades de campo con las de gabinete y con la participación del personal involucrado por parte de la universidad, de la persona que ejecuta el estudio y las personas de la localidad en la que se realizará el estudio.

Para cumplir estas metas se dividirán los trabajos en distintas fases:

1.3.1 Fases:

1.3.1.1 Fase 1: Trabajos de documentación.

-Recopilación de la información básica del área afectada (datos cartográficos, hidrológicos, geología, meteorología).

-Recopilación de la información relacionada con el funcionamiento, aplicación y software para el control del Georradar, modelos y expresiones matemáticas.

1.3.1.2 Fase 2: Trabajos de campo.

- Reconocimiento de la superficie y la cuenca en el campo.
- Reconocimiento de la ubicación donde se encuentra la estructura de interés
- Toma de datos y realización de todas las medidas correspondientes.

1.3.1.3 Fase 3: Trabajos de gabinete.

- Procesamiento de la información.
- Interpretación de los datos obtenidos.
- Cálculos y deducciones geológico-estructurales e hidrológicas.
- Informe final de conclusiones y resultados.

1.3.2 Métodos de obtención de información

La metodología de recolección de datos a partir de los que se ha elaborado este estudio son las siguientes:

- Bases de datos informáticas, como son las bases de datos de IGME (geología), ITACYL y CENTRO NACIONAL DE DESCARGAS (cartografía), CONFEDERACIÓN HIRDOGRÁFICA DEL DUERO (datos hidrológicos), AEMET(datos climatológicos) etc...
- Recopilación de información de estudios anteriormente realizados, como estudios hidrológicos, o estudios relacionados o de la misma índole que pudieran ser de interés.
- Métodos de recolección de información en el campo, comenzando con un recorrido por la parte de la cuenca hidrológica con mayor influencia sobre la estructura, y reconocimiento de la propia estructura para evaluar las características estructurales geomorfológicas e hidrogeológicas. También se tomarán fotografías para la elaboración de la memoria y aclaración de dudas si las hubiera.
- Consulta con los habitantes de la zona, a quienes se les solicitará la información de interés que podría ser útil.

- Toma de datos medidos en campo, ya sea con el Georradar, y con otros equipos que se pudiera considerar de interés a lo largo del estudio.

2 SITUACIÓN GEOLÓGICA.

2.1 Introducción.

La geología correspondiente a la zona de interés la encontramos analizada en La Hoja 127 (Noceda) está situada en la provincia de León limitado por las comarcas del Bierzo, las Omañas y el valle del alto Sil.

Se trata de una zona de montaña con muy poca población, que se encuentra repartida en pequeños núcleos, con la parte central de la hoja prácticamente despoblada y con pequeños pueblos abandonados. Las zonas habitadas se reducen a la cabecera del Vallegordo, las Omañas, la Zona de Tremor, la depresión de Noceda, y el valle del Sil que con la minería y el sector servicios es el área más próspera de la hoja.

Fasgar se encuentra en la zona NE, una zona con una erosión muy activa debido a los ríos Órbigo, Tremor, Boeza y Primout, y a los numerosos arroyos, se pueden observar terrazas colgadas y el encajamiento de los ríos.

El relieve es muy abrupto, combinando los crestones de cuarcitas verticalizadas que nos proporcionan las cotas más altas de la hoja, con las lomas y los barrancos profundos en los materiales pizarrosos.

La Hoja de Noceda, desde el punto de vista geológico, está situada en la zona Asturoccidental-leonesa, que es una de las unidades en que ha sido dividido el macizo hercínico de la península Ibérica por sus características paleogeográficas y estructurales. Estratigráficamente está bien representado desde el Precámbrico indiferenciado hasta el Silúrico

2.2 Estratigrafía.

En el área comprendida se diferencian cuatro conjuntos separados por discordancias angulares, el primero son los materiales Precámbricos, escasamente representados, que pertenecen al contacto del Antiforme del Narcea, y sobre ellos se deposita el Paleozoico inferior en sucesión continua hasta el Silúrico delimitado por el Antiforme del Narcea en su base, y el cabalgamiento basal del Manto de Mondoñedo.

Los sedimentos procedentes del paleozoico son continuos hasta la base del Silúrico donde se detecta una laguna estratigráfica, la sedimentación se pone de manifiesto por los pasos graduales entre las diferentes formaciones

En la cartografía se han reconocido regionalmente las formaciones, de muro a techo:

- Formación Cándana-Herrería
- Caliza de Vegadeo.

- Serie de los Cabos.
- Capas de transición.
- Pizarras de Luarca.
- Formación Agüeira.
- Cuarcita de Vega.
- Pizarras y ampelitas silúricas.

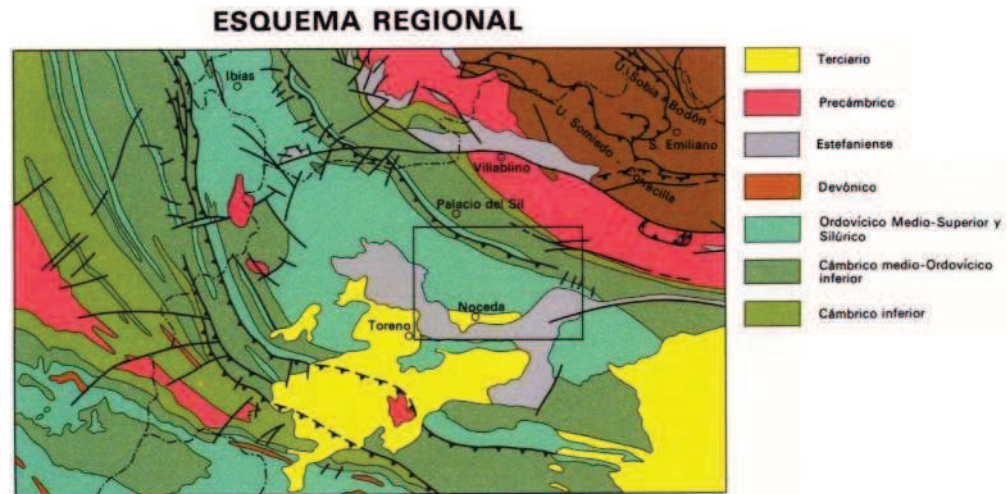


Figura 2-1 Esquema geológico regional de la zona

2.2.1 Precámbrico

Son los terrenos más antiguos que encontramos en el área de estudio. Afloran en la esquina nororiental del mapa geológico, bajo la discordancia de los sedimentos cámbricos, y forman parte del núcleo del Anticlinorio del Narcea, constituido por una ancha banda de materiales precámbricos que se extienden en forma de arco desde la costa asturiana hasta La Robla.

Debido a la discordancia angular, y a las linealidades de intersección originadas en la primera fase de deformación hercínica se ha deducido que estos materiales sufrieron una deformación precámbrica, sin esquistosidad ni metamorfismo, con pliegues asimétricos de traza axial distinta a la dirección de los ejes hercínicos, pero debido a la complicación tectónica no se ha establecido ninguna serie estratigráfica definitiva aunque algunos autores tienden a diferenciar dos tipos de materiales, uno con rocas procedentes de la deformación de rocas volcánicas, y otra con una alternancia rítmica de areniscas y cuarcitas con características sedimentarias.

En nuestra zona, predomina la serie detrítica, pero el alto metamorfismo no permite apreciarlo bien.

Litológicamente está formado por una alternancia entre micasquitos y filitas con biotita de color gris y verde, con cuarcitas feldespáticas amarillentas, cortados todos ellos por numerosos filones de cuarzo lechoso.

2.2.2 Cámbrico inferior (Formación Cándada-Herrería, CA1).

Esta formación aparece discordante sobre el Precámbrico, se inicia la sucesión con una serie detrítica con tramos evaporíticos en la base, y que termina en el nivel carbonatado del tránsito Cámbrico Inferior-Medio de extensión regional.

En los alrededores de Fasgar aflora en posición monoclinas sobre el Precámbrico (exceptuando las fallas posteriores), formando parte del flanco Meridional del Anticlinorio del Narcea.

En la Loma de la Bargaña se ve claramente la discordancia de la base, y se pueden reconocer los distintos miembros, separados por algunos autores, siendo la sucesión de muro a techo la siguiente:

- ❖ 50 m. de microconglomerados y areniscas de grano grueso de colores claros, bien estratificadas en estratos de orden decimétrico, con estratificación cruzada tabular. La composición litológica es similar en todos los tipos de rocas, están formadas por clastos de cuarzo muy redondeado de color blanco o rosado con diámetros máximos de 1 cm., y en menor proporción feldespatos (plagioclasas sobre todo) y minerales pesados; con cemento silíceo que aumenta en proporción en las areniscas y cuarcitas. A unos metros antes del techo empiezan a aparecer pizarras en alternancia con areniscas ferruginosas y calizas.
- ❖ El siguiente miembro comienza con 1-2 m de estratos calcosilicatados de color amarillento, que pasan a ser dolomías masivas rojizas. La potencia es variable, del orden de 40-50 m. Estas dolomías están recristalizadas y silicificadas por el metamorfismo hercínico, pero si nos vamos a la Zona Cantábrica se observa que son dolomías primarias bien estratificadas con laminaciones paralelas. Constituyen un nivel evaporítico muy extendido y de gran interés sedimentológico.
- ❖ Siguen de 70 a 80 m de pizarras verdes, con paquetes de pizarras limosas amarillentas, con algunos niveles lenticulares de dolomías.
- ❖ Sobre estas pizarras siguen unos 20 m de una alternancia con pizarras verdes como las anteriores y areniscas o cuarcitas, también verdosas, bien estratificadas. La proporción pizarra/cuarcita disminuye, presentándose el conjunto como una transición entre el miembro anterior y el siguiente, predominantemente cuarcítico. En las areniscas se observa laminación paralela y estratificación cruzada.
- ❖ A continuación encontramos un tramo de 50-60 m de cuarcitas de grano grueso de color blanco y rosado por los óxidos de hierro. Se observa asimismo estratificación cruzada tabular.

- ❖ Finalmente sigue hasta el techo sigue una alternancia de pizarras grises y cuarcitas en estratos con una potencia decimétrica, con predominio de las primeras, sobre todo en el contacto con las calizas.

2.2.3 Cámbrico inferior medio:(Caliza de Vegadeo, CA1-2).

Se sitúan concordante sobre la formación anterior, aflorando en posición monoclinas. Están afectadas por la fracturación posterior y solo afloran como una banda estrecha tapada por los derrubios cuaternarios.

Desde el accidente de Fasgar hacia el N aparecen como dolomías debido a la dolomitización secundaria provocada por fluidos ligados a la falla. Desde Fasgar hacia el E, consisten en mármoles blancos y grises que conservan las estructuras sedimentarias de las que se deduce que provienen de calizas con laminación paralela.

2.2.4 Cámbrico Medio- Ordovícico Inferior:(Serie de los Cabos, CA2-O1).

A pesar de que ya se aleja de la zona de interés la consideraremos de todos modos en este estudio por relación con las demás estructuras.

Se trata de una potente sucesión detrítica caracterizada por una alternancia de cuarcitas y pizarras con marcado predominio de las primeras. El límite inferior lo marcan las calizas, y el superior las capas de transición a las Pizarras de Luarca.

La sucesión consta de los tramos siguientes:

- ❖ 100 m de pizarras verdes limolíticas y en la base margosas con estratos decimétricos de cuarcitas.
- ❖ Sigue un tramo fundamentalmente cuarcítico, que se inicia con alternancia de pizarras y cuarcitas verdosas y culmina con cuarcitas blancas bien estratificadas, con una potencia estimada es de 400-500 m.
- ❖ Por último, al techo de la serie hay un tramo cuarcítico de unos 200 m. El paso es progresivo comenzando con paquetes de cuarcita bien estratificada de orden métrico y culmina con tramos de 60m de cuarcitas blancas recristalizadas, bien estratificadas proporcionando un horizonte bien destacado en la topografía.

2.2.5 Cuaternario.

La distribución es muy irregular, encontrándose en las laderas pronunciadas del río Tejera y en la cabecera del Vallegordo, los depósitos cuaternarios adquieren gran importancia. Entre los distintos depósitos que nos encontramos, vamos a centrarnos en los presentes en el área de trabajo, descartando algunos tipos como los depósitos glaciares.

Los depósitos **de origen fluvial**, separan las llanuras aluviales más recientes son de muy poca extensión, limitándose casi totalmente a los cauces y las terrazas de los ríos. Presentan cantos de tamaño relativamente elevado y en general están poco rodados y calibrados.

Otro tipo de cuaternario, y posiblemente uno de los de mayor interés para nosotros son los coluviones, derrubios de ladera y canchales de cuarcita (QL), Se sitúan en las fuertes pendientes de los valles, recubriendo las paredes de los valles tienen gran angulosidad y el calibrado es proporcional a la cota

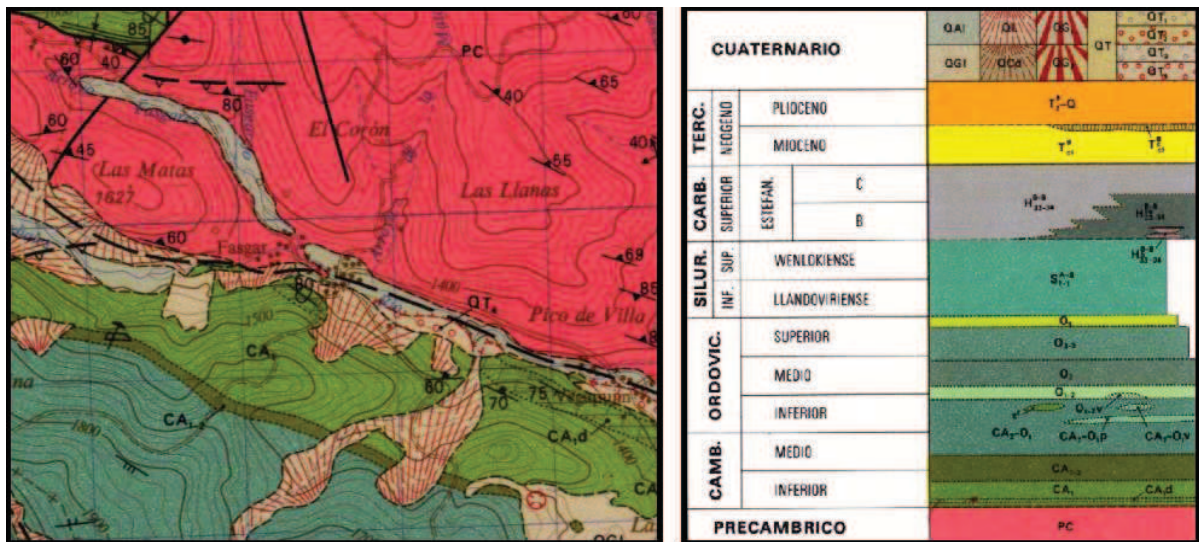


Figura 2-2 Extracto del mapa geológico en el área de influencia y leyenda del mismo

QAl – Depósitos aluviales.

QL – Derrubios de ladera.

Qd – Conos de deyección.

QT – depósitos aluviales por acumulación de terrazas.

QT_{1,2,3 y 4} – Niveles de aterramiento relativos al cauce de los ríos.

CA_{1,-2} – Mármoles blancos y Dolomias.

CA_{1,-d} – Dolomias.

CA₁ – Areniscas feldespáticas, cuarcíticas y pizarras verdes .

PC – Cuarzitas y Micasquistos.

2.3 Tectónica.

En esta zona Asturoccidental-leonesa, se ha establecido un esquema tectónico válido para toda ella. Hay tres discordancias que reflejan otras etapas de deformación; una prehercínica, que afecta sólo al Precámbrico; otra hercínica, responsable de la tectónica de esta hoja; afecta a los materiales precámbricos, superponiéndose a las estructuras anteriores y borrándolas prácticamente puesto que es más intensa.

En esta deformación Hercínica se pueden diferenciar tres fases principales de deformación ligadas a un polimetamorfismo regional de bajo grado. Además estas cuencas Estefanienses están constituidas por una deformación que da lugar a pliegues muy suaves sin metamorfismo, La Orogenia Alpina que podemos considerar una etapa de fracturación. Además en esta zona de estudio encontramos otras estructuras debidas a la fracturación, con una dirección E-W.

2.3.1 Deformación Hercínica.

2.3.1.1 -Primera fase de deformación Hercínica.

Las formaciones pertenecientes a este periodo consisten en un plegamiento penetrativo a todas las escalas, es vergente hacia las zonas internas del arco, aunque en la actualidad está subvertical debido a que son las primeras estructuras y están muy deformadas por las fases posteriores.

Se trata de pliegues con charnela cilíndrica isoclinal y a veces asimétricos, muy apretados, de tipo similar.

2.3.1.2 -Segunda fase de deformación.

Se trata fundamentalmente de una fase de cabalgamientos de gran envergadura, perteneciendo a este periodo el cabalgamiento de Salentinos, que se extiende a lo largo de un centenar de kilómetros desde la costa asturiana, hasta por lo menos al N. de Colinas, siendo indicativo de pliegues de grandes estructuras con gran desarrollo de flancos normales

2.3.1.3 -Tercera fase de deformación.

Esta fase es la responsable de la disposición actual de las estructuras y de la cartografía, las estructuras originadas son de varios órdenes de magnitud, pero siempre penetrativas. A escala regional se manifiesta como grandes pliegues muy laxos de plano axial subvertical o vergente al sur.

Va acompañada esta fase por varias estructuras menores, observables a escala de afloramiento; unas son pliegues decimétricos con ejes paralelos a la crenulación. Se desarrollan sobre todo en las pizarras poco competentes, tratándose a menudo de pliegues del tipo Chevrón, haciéndose visibles en algunos casos como se transforman a Kink-bands.



Figura 2-4 Pliegues del tipo Chevrón.

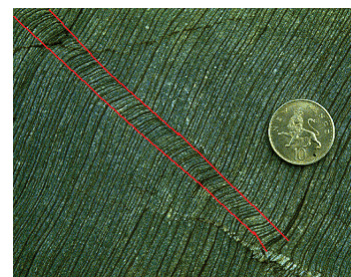


Figura 2-3 Kink-Bands

2.3.1.4 -Deformaciones tardihercínicas.

Se trata de estructuras menores aunque de varios órdenes de tamaño, desde un metro a escala microscópica; todas propias de deformación superficial, esta deformación también incluye pliegues similares a los de la tercera fase de deformación.

Por último, están las fracturas y varios juegos de diaclasas en las que se puede enmarcar la estructura de Fasgar. Aunque cabe destacar que la mayor parte es deducida ya que los depósitos cuaternarios la recubren en sus puntos más interesantes.

Según la interpretación dada por algunos autores, se trata de una estructura de Norte a Sur resultando una figura en forma de "S". Ésta en una segunda etapa se rompería por su flanco inverso dando lugar a un cabalgamiento importante. Y finalmente han deducido que se trate de una falla tardihercínica no aflorante deducible morfológicamente por la linealidad del Valle del río Vallegordo.

En la siguientes figuras podemos observar el corte geológico realizado por el IGME, en la que se aprecia los contactos entre los diferentes materiales, y las grandes estructuras anteriormente mencionadas.

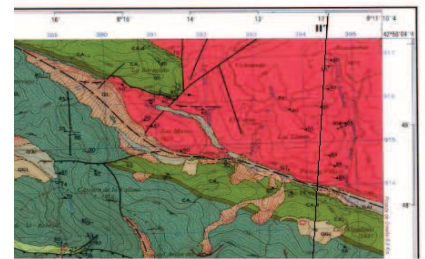


Figura 2-5 Trazado del corte geológico correspondiente a la Figura 2.6

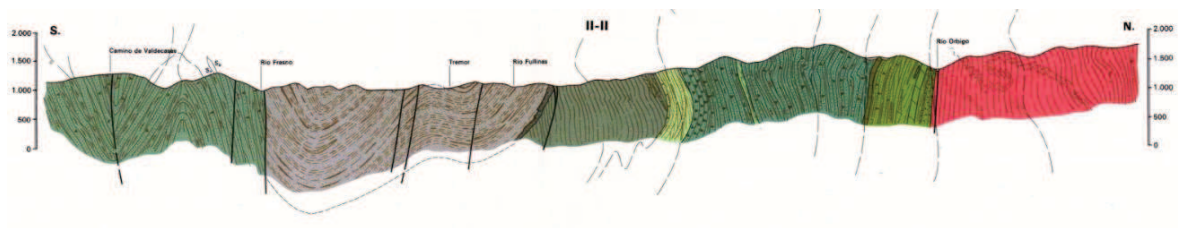


Figura 2-6.- Corte geológico próximo a Fasgar.

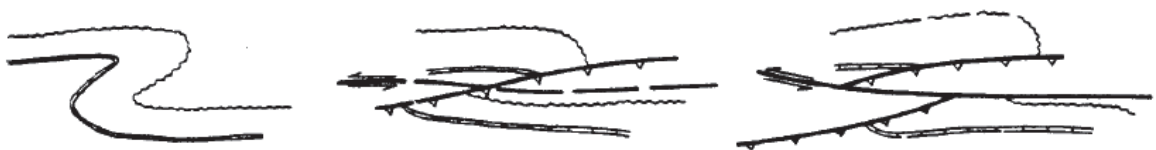


Figura 2-7 Solución propuesta en la memoria del mapa geológico a la deformación estructural en Fasgar

3 GEOFÍSICA.

3.1 Concepto.

La exploración tradicional está apoyada por una inspección geológica de la superficie del terreno, a lo que se le suman algunas calicatas someras y varios sondeos de investigación para la descripción y muestreo de los materiales, y finalmente ensayos físicos para la caracterización de los materiales.

De ahí que las secciones geológicas del subsuelo eran definidas a partir de la interpolación y extrapolación de los sondeos ejecutados, lo que muchas veces se traducía en serios problemas durante la etapa constructiva, ya que generalmente el subsuelo puede presentar bruscos cambios laterales que no siempre pueden ser detectados a través de los sondeos, debido a que un sondeo sólo es representativo de su eje vertical y no necesariamente representa la extensión lateral de la estratigrafía cortada.

Ante esta incertidumbre y los frecuentes problemas en importantes obras de ingeniería, se comenzó a utilizar, cada vez más, los avances tecnológicos de la exploración geofísica, a fin de zonificar, horizontal y verticalmente, todo el subsuelo de interés, antes de proceder a ejecutar los sondeos mecánicos necesarios.

La geo-resistividad eléctrica, la refracción sísmica y las imágenes de geo-radar son hoy día modernas y valiosas metodologías que bien combinadas nos permiten zonificar adecuadamente el subsuelo e identificar áreas cavernosas y diferenciar los distintos materiales y estructuras que predominan en el subsuelo.

Estos métodos han sido exitosamente aplicados en nuestro país en grandes y modernas obras de ingeniería como presas, túneles, carreteras, torres, al extremo de que grandes y costosos proyectos, han tenido que ser totalmente rediseñados y revalorados después de que los estudios geofísicos mediante geo-resistividad eléctrica y refracción sísmica demostraran claramente que las condiciones del subsuelo eran completamente disímiles y peores de las originalmente establecidas.

La elección de él o los métodos geofísicos más apropiados para un problema específico dependerá siempre del análisis previo y de los objetivos básicos del problema y de la posibilidad de aplicación a nuestro estudio.

A continuación listaremos los métodos geofísicos principales con la justificación por la que se ha descartado tal método.

3.1.1 Métodos eléctricos.

Estos métodos son la modalidad de investigación geofísica más antigua y la utilizada para distinguir y caracterizar el subsuelo. Se basan en la medición de las propiedades eléctricas del subsuelo.

Con este método obtendremos secciones 2-D de resistividades reales del subsuelo, modelo a partir del cual podremos determinar la presencia o no de filtraciones de agua o distintos materiales en profundidad, mediante la localización de áreas en donde tengamos una variación anómala del valor de la resistividad del terreno.

Los materiales de la Tierra oponen resistencia al flujo de la corriente eléctrica. Esta propiedad se llama resistividad geoelectrica, la cual nos permite diferenciar entre distintos materiales.

El circuito de la derecha representa la configuración eléctrica de una sustancia rocosa, de acuerdo con diversos estudios se ha demostrado que la resistividad eléctrica de los materiales es única, y no varía con la fuente de excitación, por lo que con los valores que vayamos obteniendo de los equipos podremos hacer una simulación de los posibles materiales que componen nuestra área.

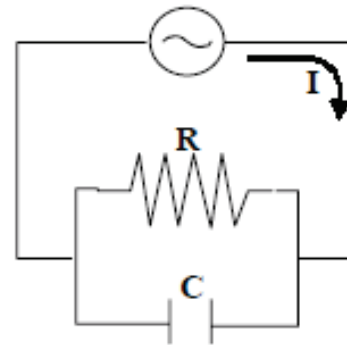


Figura 3-1 Esquema unifilar que representa las características eléctricas del medio rocoso

3.1.1.1 Sondeo eléctrico vertical, SEV.

Se utilizan para poder identificar contrastes de la resistividad geoelectrica a distintas profundidades, es decir, la realización de un “sondeo” eléctrico vertical, se realiza mediante una formula así: intensidad (I), por medio de unos electrodos (AB), el cual nos permite medir una diferencia de potencial (dV) entre dos electrodos (MN).

La resistividad geoelectrica se obtiene por aplicación de la Ley de Ohm.

3.1.1.2 Tomografía eléctrica

Se trata de un método de prospección geoelectrica consistente en la medición de resistividades aparentes de los materiales del subsuelo permitiendo obtener un perfil o en 2D (longitud x profundidad).

En este caso, en lugar de ir desplazando los electrodos como en el apartado anterior, cada vez que se toma una medida, se colocan entre 25 y 50 electrodos en la superficie del suelo y se toma una sola medida.

Ambos métodos la base teórica de funcionamiento son análogas a los métodos convencionales, solo que varía el número de electrodos. Las principales configuraciones que se suelen utilizar son Wenner y Schulenberg, como podemos ver en la Figura 3-2.

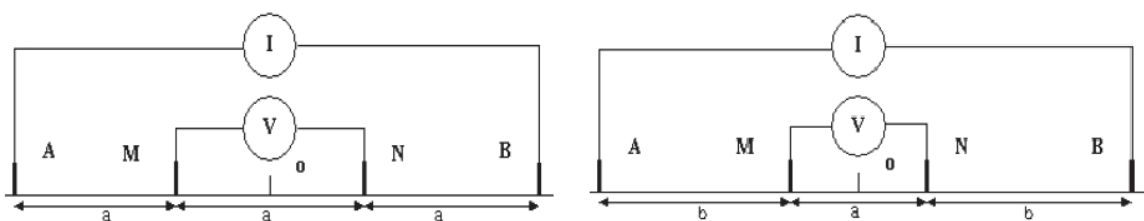


Figura 3-2 Configuraciones eléctricas según el método de Wenner a la izquierda, y de Schulenberg a la derecha.

Este método lo hemos descartado porque, a pesar de que puede parecer ser el adecuado debido a que detecta la presencia de agua no lo es. Un estudio con este equipo nos indicaría la presencia de agua y las posibles rocas que componen el macizo dependiendo de la cantidad de agua que alberga, ambas cosas son ya conocidas con mayor o menor precisión.

La geología no es el objeto de estudio de este proyecto, y la presencia de agua ya se conoce debido a que mana del macizo hacia la central hidroeléctrica. Los estudios y análisis previos nos hacen pensar que se trate de algún tipo de estructura como sería el caso de un Karst, una fractura o una pequeña falla por la que circula el agua. En tal caso este método no es el adecuado.

3.1.2 Métodos gravimétricos.

El objetivo principal de la gravimetría es medir las anomalías en el campo gravitatorio de la Tierra causadas por cambios de densidad entre distintos materiales. Los datos de campo deben ser corregidos respecto a puntos de referencia de conocida gravedad. Las correcciones serán respecto al tiempo, altura topográfica, posición geográfica... etc.

Este método se aplica fundamentalmente para localizar yacimientos de minerales, para la modelización del substrato rocoso o para la detección de cavidades.

El equipo necesario para realizar este método son:

- Magnetómetro de presión nuclear
- Gravímetro
- GPS
- Brújula de campo
- Cinta métrica de 50 m
- Estacas y pintura

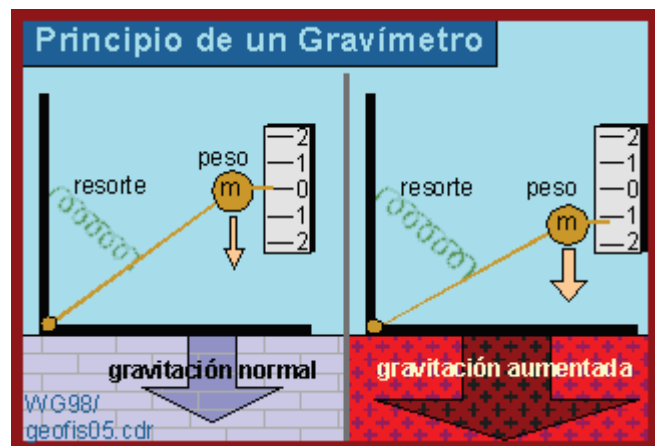


Figura 3-3 Representación simplificada del funcionamiento de un gravímetro

El procedimiento de trabajo consiste en determinar el área de estudio, donde de antemano se tenga información de la presencia de anomalías magnéticas y gravimétricas; trazar un perfil de la longitud determinada y señalar estaciones para realizar las medidas a distancias equidistantes, donde se obtendrán mediciones de gravedad y del campo magnético.

Después de hacer las correcciones debidas se deben interpretar para ser asociadas con la geología estructural del subsuelo y con la presencia de cuerpos causantes de las anomalías.

En nuestro caso se ha descartado este método ya que para un estudio de esta envergadura no disponemos datos gravimétricos relativos a un estudio previo, por otra

parte este método está pensado para áreas mucho mayores que la nuestra, como son grandes masas de rocas o cuevas. Y finalmente y uno de los factores que tienen gran importancia, es que disponer de este equipo es mucho más complejo que comparándolo con otros métodos.

3.1.3 Método sísmico.

Este procedimiento se fundamenta en las diferentes velocidades de propagación de las ondas sísmicas a través de diferentes medios materiales. Las mediciones permiten establecer que esa velocidad de propagación varía en los suelos, siendo los más compactos los que mayores velocidades presentan. En roca sana los valores fluctúan dependiendo de las propiedades de cada roca.

Esencialmente el método consiste en provocar una explosión en un punto determinado del área a explorar usando una pequeña carga de explosivo con el objetivo de provocar una onda sísmica que poder medir en distintos sitios. Por la zona a explorar se sitúan geófonos, separados entre sí, estos captan la vibración, que se transmite amplificada a un oscilógrafo que marca varias líneas, una para cada geófono.

El procedimiento a seguir consiste en elegir un perfil definido por cuatro estaciones, preferiblemente en línea recta, estas captarán los registros de la propagación de ondas. El perfil será emplazado en una zona donde se estime por la geología local que el basamento se encuentra a poca profundidad.

La información posteriormente debe ser interpretada de acuerdo con la técnica establecida que proporcionará información de los diferentes estratos que componen el subsuelo dentro de los límites de investigación.

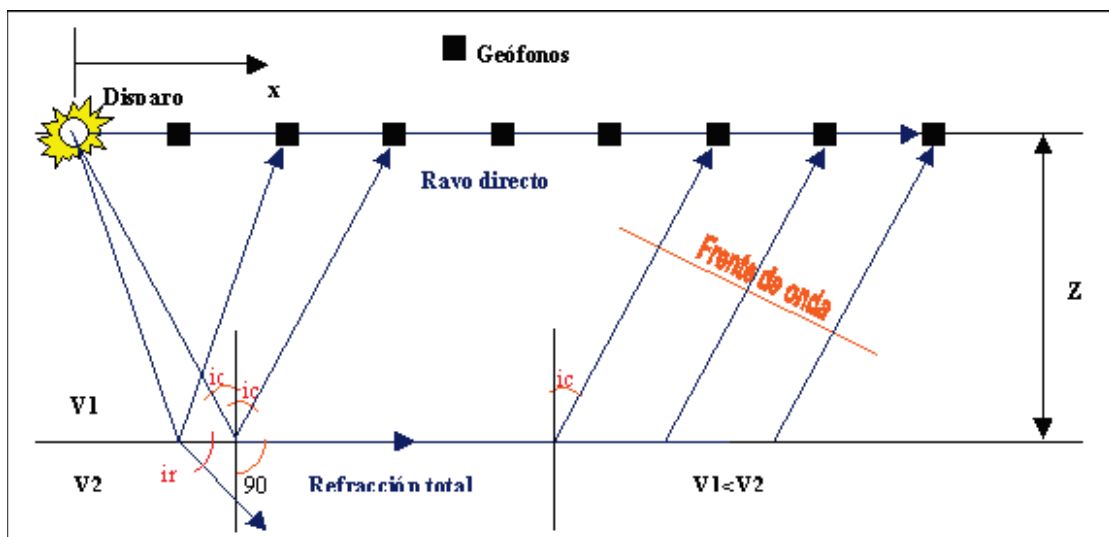


Figura 3-4 Esquema de funcionamiento del método sísmico, mediante el disparo de una carga explosiva en superficie y diversos geófonos colocados equidistantemente.

4 EXPLORACIÓN MEDIANTE GEORRADAR.

4.1 Introducción.

El Georradar, también conocido por sus siglas en inglés GPR (Ground Penetrating Radar) es un método de prospección geofísica, que se puede utilizar en una amplia variedad de trabajos como la ingeniería geotécnica, debido a su versatilidad operativa.

Algunas de las principales características de estos equipos son las siguientes:

- Es un método no destructivo.
- Su primera utilización en este campo de aplicación fue para medir los espesores de hielo glaciar, evolucionando su aplicación a detectar espesores de suelo congelado.
- Se basa en la propagación por el suelo de un pulso de onda electromagnética.

Sus principales aplicaciones actuales son muy diversas, estando presente en distintas áreas de la ingeniería civil, medio ambiente, geotecnia, arqueología, geofísica, geología y minería. Para determinar la estratificación de los suelos, la detección de huecos y carst, la profundidad del nivel freático o la profundidad de la roca inalterada. También tiene cabida en estudios medioambientales para elaborar mapas de vulnerabilidad de acuíferos, reconocimiento de vertederos y zonas contaminadas con hidrocarburos por ejemplo.

La principal desventaja es que es muy dependiente de las características locales de aplicación, sobre todo en zonas con excesiva conductividad eléctrica que condiciona la penetración de las ondas.

El funcionamiento de este equipo se basa en la emisión de un pulso a una determinada frecuencia que se genera en la antena emisora, éste se refleja en los lugares del subsuelo en los que se produce un cambio en la impedancia del terreno. Este cambio puede ser debido al cambio de materiales que componen el suelo, debido a la presencia de estructuras, huecos, presencia de agua... etc. Las antenas se desplazan a lo largo de una línea de barrido mientras se emiten los pulsos en cada posición. La reflexión de estos impulsos se captura con la otra antena y se tratan mediante un conversor analógico-digital que los envía en formato digital a un ordenador en el que se procesa la información.

4.2 Teoría de propagación de los campos electromagnéticos.

A continuación se desarrollarán las bases teóricas que tomaremos para determinar los fenómenos de propagación transmisión y reflexión de las ondas electromagnéticas en las que se basa el funcionamiento del equipo.

Las ecuaciones de propagación de las ondas se fundamentan en las Leyes de Maxwell, definiendo su dependencia con los parámetros de propagación del medio. Los vectores que definen el campo magnético se definen mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \cdot \vec{H} &= \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\end{aligned}$$

Donde:

E es la intensidad de campo eléctrico (V/m)

B es la intensidad de flujo magnético (*Tesla*)

H es la intensidad de campo magnético (A/m)

J es la densidad de corriente (A/m^2)

D es el vector de desplazamiento eléctrico (C/m^2)

ρ es la densidad de carga libre (C/m^3)

Estas ecuaciones relacionan la variación con el tiempo de las magnitudes de campo en un punto cualquiera del espacio. Para medios homogéneos e isótropos las ecuaciones de Maxwell se complementan con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\vec{j} &= \sigma \cdot \vec{E} \\ \vec{D} &= \varepsilon \cdot \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \cdot \vec{H}\end{aligned}$$

Donde σ , ε y μ son constantes para cada material, independientes de los campos. Las dos últimas relaciones corresponden a las ecuaciones constitutivas de un medio dieléctrico y de un medio magnético respectivamente, mientras que la primera es la conocida ley de Ohm puntual. σ es la conductividad eléctrica (Siemens/m), ε es la constante dieléctrica del material (F/m) y μ es la permeabilidad magnética (H/m). Estos parámetros definen al medio al paso de una onda electromagnética.

Suponiendo la ausencia de cargas eléctricas libres en el área a estudiar, las ecuaciones de Maxwell toman la expresión:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H} &= \varepsilon \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{E} &= 0 \\ \nabla \cdot \vec{H} &= 0\end{aligned}$$

4.2.1 Parámetros electromagnéticos característicos del medio.

Las propiedades eléctricas y magnéticas de rocas y suelos definen la velocidad de propagación de las ondas del radar y sus amplitudes. En la mayoría de las ocasiones las propiedades eléctricas son más importantes que las magnéticas.

En las frecuencias que trabaja el georradar las propiedades eléctricas están mayoritariamente controladas por la densidad del medio, sus propiedades químicas, estado físico, distribución (porosidad) y contenido de agua., siendo estos parámetros los que limitan las posibilidades de penetración de las ondas a través del medio.

4.2.1.1 Conductividad eléctrica σ

La conductividad eléctrica es la capacidad de un cuerpo de permitir el paso de la corriente eléctrica a través de sí. Es una propiedad natural y característica de cada cuerpo que representa la facilidad con la que los electrones (y huecos en el caso de los semiconductores) pueden pasar por él. Es una de las características más importantes de los materiales y varía con diversos factores, siendo los más importantes la humedad, el contenido de sales disueltas en el agua o la temperatura.

Es una proporción entre la densidad de corriente del material y la intensidad del campo eléctrico externo, además de ser la inversa de la resistividad. $\sigma = \frac{1}{\rho}$

En función de la conductividad se clasifican los materiales en:

- Materiales conductores, valores de conductividad superiores a 10^5 S/m
- Materiales semiconductores, valores de conductividad entre 10^5 S/m y 10^{-8} S/m
- Materiales aislantes, valores de conductividad superiores a 10^{-8} S/m

Tabla 4-1 Valores de conductividad para distintos materiales

MATERIAL	σ (S/m)
Agua destilada	10^{-4}
Agua dulce	$10^{-4} - 10^{-2}$
Agua salada	4
Arenisca seca	$10^{-8} - 10^{-6}$
Arenisca húmeda	10^{-2}
Cuarzo	$1.6 \cdot 10^{-3}$
Carbón	$2.5 \cdot 10^{-4}$
Arcilla seca	$10^{-4} - 10^{-3}$
Arcilla saturada	$10^{-3} - 1$
Aire	0
Cobre	10^8

MATERIAL	$\sigma(S/m)$
Aluminio	sr^1
Aluviones	$sr^{2.6} F sr^{2.5}$
Arena Saturada	$sr^{2.7} F sr^{2.6}$
Arena seca	$sr^{2.7} F sr^{2.7}$
Asfalto húmedo	$sr^{2.7} F sr^{2.5}$
Asfalto seco	$sr^{2.6} F sr^{2.5}$
Caliza húmeda	$sr^{2.6} F sr^{2.5}$
Caliza seca	$sr^{2.6} F sr^{2.5}$
Carbón húmedo	$sr^{2.7} F sr^{2.5}$
Carbón seco	$sr^{2.7} F sr^{2.6}$
Esquisto húmedo	$sr^{2.7} F sr^{2.5}$
Cuarzo	$sr^{2.7} F sr^{2.7}$
Esquisto seco	$sr^{2.7} F sr^{2.6}$
Granito húmedo	$sr^{2.7} F sr^{2.6}$
Granito seco	$sr^{2.6} F sr^{2.5}$
Hielo	$sr^{2.7} F sr^{2.8}$
Hormigón húmedo	$sr^{2.6} F sr^{2.5}$
Hormigón seco	$sr^{2.7} F sr^{2.6}$
Limo saturado	$sr^{2.6} F sr^{2.5}$
Margas	$sr^{2.7} F sr^{2.5}$
Sal Gema	$sr^{2.8} F sr^{2.7}$
Suelo agrícola	$sr^{2.7} F sr^{2.5}$
Zahorra	$sr^{2.7}$
Suelo arcilloso	$sr^{2.8} F sr^{2.7}$
Suelo arcilloso húmedo	$sr^{2.7} F s$

MATERIAL	$\sigma(S/m)$
Suelo arcilloso seco	$10^{-2} - 10^{-1}$
Suelo arenoso	$10^{-4} - 10^{-3}$
Suelo arenoso húmedo	$10^{-2} - 10^{-1}$
Suelo arenoso seco	$10^{-4} - 10^{-2}$
Suelo cemento	$10^{-2} - 10^{-1}$
Suelo limoso	$10^{-4} - 10^{-3}$
Suelo limoso húmedo	$10^{-2} - 10^{-1}$
Suelo limoso seco	$10^{-4} - 10^{-3}$

4.2.2 Permitividad eléctrica ε .

Es una constante de proporcionalidad, propia de cada material, entre la intensidad del campo eléctrico externo aplicado (\vec{D}) y el vector de desplazamiento eléctrico (\vec{E}).

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}$$

$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$, Constante dieléctrica del material.

$\varepsilon_r =$ Constante dieléctrica relativa.

$\varepsilon_0 =$ Constante dieléctrica en el vacío, $\frac{10^{-9}}{36\pi} F/m$

Tabla 4-2 Valores de permitividad eléctrica para distintos materiales

MATERIAL	ε_r
Agua destilada	80
Agua dulce	80-81
Agua salada	81-88
Aire	1
Aluminio	1
Aluviones	9-23
Arcilla limosa	35-50
Arcilla Saturada	8-15
Arcilla seca	3

MATERIAL	ϵ_r
Arena seca	20-30
Arenisca húmeda	5-10
Arenisca seca	2-6
Asfalto húmedo	6-12
Asfalto seco	2-4
Basalto	8
Caliza húmeda	8-9
Caliza seca	4-7
Carbón húmedo	8
Carbón seco	3.5
Cuarzo	4.3
Dolomita	6.8-8
Esquisto saturado	9-16
Esquisto seco	4-9
Gneis	9-10
Anhidrita	6.7
Granito húmedo	7-15
Granito seco	5-6
Grava arenosa saturada	15-22
Grava cemento	13
Hormigón húmedo	10-20
Hormigón seco	4-10
Hulla	2.5-15
Limo saturado	10-40

MATERIAL	ϵ_r
Limo seco	3-10
Macadam	9-11
Margas	5-15
Mármol	8,3-13
Nieve polar	1,4-3
Nylon	3,6
Piedra pómez	4-7
Sal gema	5-6
Suelo agrícola	9-25
Suelo agrícola arenoso-limoso saturado	10-15
Suelo agrícola grueso seco	8-15
Suelo agrícola húmedo	15-22
Suelo agrícola promedio	15
Suelo agrícola saturado	20-26
Suelo arcilloso seco	2-10
Suelo arenoso húmedo	10-30
Suelo arenoso seco	2-10
Suelo cemento	16
Suelo de bosque	12
Zahorra	4-6
Turba	50-78
Suelo limoso húmedo	10-30
Suelo limoso seco	2-10
Suelo promedio	16

4.2.3 Permeabilidad magnética μ .

Se denomina así a la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de él los campos magnéticos, la cual está dada por la relación entre la intensidad de campo magnético existente, \mathbf{H} , y la inducción magnética, \mathbf{B} , que aparece en el interior de dicho material.

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$$

$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$, Permeabilidad magnética del material.

$\mu_r =$ Permeabilidad magnética relativa relativa.

$\mu_0 =$ Permeabilidad magnética en el vacío, $\frac{4\pi}{10^7} \text{ H/m}$

Tabla 4-3 Valores de permeabilidad magnética de algunos materiales

MATERIAL	μ_r
Agua destilada	1
Agua dulce	1
Agua salada	1
Aire	1,003
Basalto húmedo	1,18 (5% Magnetita)
Basalto seco	1,08 (2% Magnetita)
Caliza seca	0,999987
Cuarzo	0,999985
Granito húmedo	1,04 (1% Magnetita)
Granito seco	1 (0% Magnetita)

4.3 Propagación de las ondas.

La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro. A diferencia de otros tipos de onda, como el sonido, que necesitan un medio material para propagarse, la radiación electromagnética se puede propagar en el vacío. Esto es debido a que las ondas electromagnéticas son producidas por las oscilaciones de un campo eléctrico, en relación con un campo magnético asociado.

La velocidad de propagación de estas ondas es muy alta y constante, comportándose como una onda transversal, es decir, su dirección de vibración del campo eléctrico y magnético son perpendiculares a la dirección de propagación.

Dependiendo de la frecuencia, las ondas electromagnéticas pueden no atravesar medios conductores. Esta es la razón por la cual las transmisiones de radio no funcionan bajo el mar y los teléfonos móviles se quedan sin cobertura dentro de una caja de metal. Pero si tenemos en cuenta que la energía no se crea ni se destruye, cuando una onda electromagnética choca con un conductor pueden suceder dos cosas. La primera es que se transformen en calor: este efecto tiene aplicación en los hornos de microondas. La segunda es que se reflejen en la superficie del conductor (como en un espejo).

Cuando un objeto conductor (como una antena) conduce corriente alterna, la radiación electromagnética se propaga en la misma frecuencia que la corriente. Del mismo modo, cuando una radiación electromagnética incide en un conductor eléctrico, hace que los electrones de su superficie oscilen, generándose de esta forma una corriente alterna cuya frecuencia es la misma que la de la radiación incidente. Este efecto se usa en las antenas, que pueden actuar como emisores o receptores de radiación electromagnética.

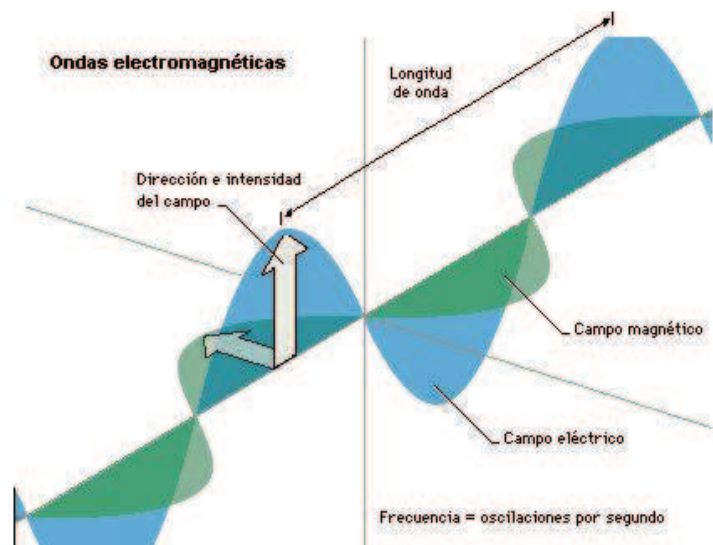


Figura 4-1 Representación de la transmisión de una onda electromagnética en un medio

Si consideramos una onda electromagnética de una sola frecuencia, polarizada linealmente en la dirección del eje Z, obtenemos las ecuaciones de intensidad del campo eléctrico y magnético siguientes:

$$E_x(z, t) = E_0 \cdot e^{-\alpha z} \cdot e^{i(\omega t - \beta z)}$$

$$H_y(z, t) = H_0 \cdot e^{-\alpha z} \cdot e^{i(\omega t - \beta z - \theta)}$$

El campo eléctrico (E) lo representamos en el eje x, mientras que el campo magnético lo representamos en el eje Y.

Las propiedades del medio, permeabilidad magnética permitividad eléctrica conductividad eléctrica y la frecuencia angular las agruparemos en un término denominado γ^2 denominado constante de propagación:

$$\nabla^2 E = i\omega\mu(\nabla \times H)$$

$$\nabla^2 H = -(i\omega\mu + \sigma)(\nabla \times \mathbf{E})$$

$$\nabla^2 E = (i\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon)\mathbf{H}$$

$$\nabla^2 H = (i\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon)\mathbf{E}$$

Finalmente obtenemos las ecuaciones que rigen el fenómeno de propagación de las ondas electromagnéticas en un medio homogéneo e isótropo.

$$\nabla^2 E = \gamma^2 E$$

$$\nabla^2 H = \gamma^2 H$$

A su vez este factor de atenuación se expresa en función de sus componentes real e imaginario.

$$\gamma = \alpha + i\beta$$

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

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right)}$$

Siendo α el factor de atenuación, y β la constante de fase. Estos valores nos servirán para calcular otros factores más adelante.

4.3.1 Características principales de las ondas electromagnéticas

Todas las radiaciones del espectro electromagnético presentan las propiedades típicas del movimiento ondulatorio, como la difracción y la interferencia. La longitud de onda (λ) y la frecuencia (f) de las ondas electromagnéticas, relacionadas importantes para determinar su energía, su visibilidad, su poder de penetración y otras características.

Las características principales que determinan la propagación de las ondas son las siguientes:

4.3.1.1 Velocidad de propagación.

Este factor es un parámetro fundamental en el fenómeno de la propagación, ya que si conocemos su valor para un material concreto, con este equipo midiendo el tiempo que tarda la onda desde que se emite hasta que se refleja podemos calcular las profundidades de reflexión.

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right)}}$$

Sustituyendo los valores y verificando para la propagación en el vacío obtenemos la ecuación en función de la velocidad de la luz.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\frac{\varepsilon_r}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right)}}$$

4.3.1.2 Longitud de onda.

Las ondas del espectro electromagnético se propagan por el espacio generando ondas a partir del punto donde comienza la propagación hasta que su energía se termina o se acaba el medio de propagación.

Estas ondas del espectro electromagnético poseen picos o crestas, así como valles o vientres. La distancia horizontal existente entre dos picos consecutivos, dos valles consecutivos, o también el doble de la distancia existente entre un nodo y otro de la onda electromagnética, constituye lo que se denomina "longitud de onda" y su valor corresponde a la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right)}}$$

Del mismo modo que antes expresamos esta ecuación en función de la velocidad de la luz:

$$\lambda = \frac{c}{f \sqrt{\frac{\varepsilon_r}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right)}}$$

4.3.1.3 Impedancia de un medio.

Para un punto instante y frecuencia determinados los módulos de los campos eléctrico y magnéticos de un frente de ondas, están relacionados mediante un parámetro denominado impedancia característica o intrínseca, η .

$$\eta = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = |\eta| e^{-i\theta}$$

4.3.1.4 Profundidad nominal de penetración.

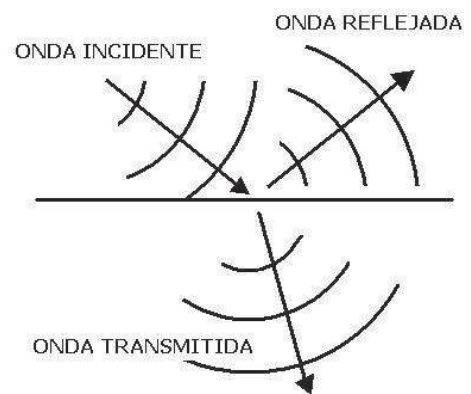
Los parámetros más críticos de los que depende la propagación de estas ondas son σ y ω hasta el punto de dividir los medios de propagación en tres grupos, los dieléctricos perfectos, los malos conductores y los buenos conductores.

Se define profundidad nominal de penetración como la distancia a la cual un campo de amplitud inicial $1 V/m$ ha disminuido hasta $e^{-1}V/m$. Se considera que a una distancia equivalente a la profundidad nominal de penetración la magnitud del campo puede considerarse cero.

4.3.2 Reflexión de las ondas.

Al alcanzar la energía de una onda una discontinuidad parte de la energía es reflejada y parte es transmitida.

Las ondas incidentes y reflejadas se propagan en el mismo medio. Existe otra onda, denominada transmitida o refractada, que ingresa al nuevo medio, transportando así energía en este medio. Esta onda transmitida en el nuevo medio puede ser considerada como onda incidente en tal medio



La ley que rige la reflexión de esta onda es la conocida ley de reflexión muy simple, y que nos dice que el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

Figura 4-2 refracción sobre una superficie dieléctrica perfecta.

4.3.3 Refracción de las ondas:

La refracción sólo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si éstos tienen índices de refracción distintos. El índice de refracción es una medida que determina la reducción de la velocidad de propagación al propagarse por un medio homogéneo.

Los ángulos de incidencia y de refracción vienen relacionados por: $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

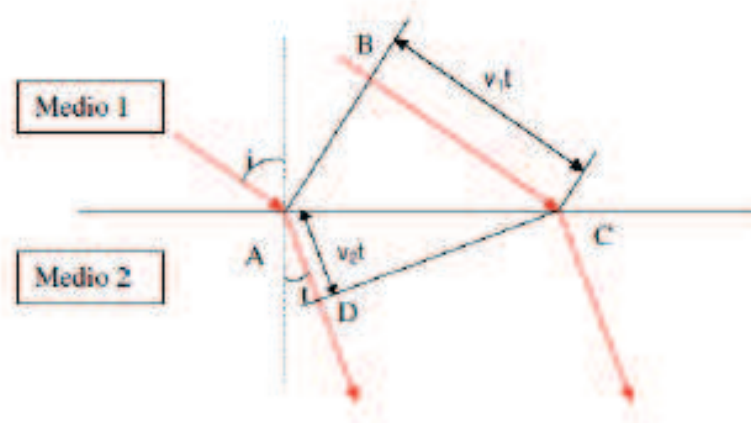


Figura 4-3 Esquema de refracción de una onda entre dos medios con diferentes propiedades

4.4 Fenómenos en la propagación de las ondas.

El comportamiento de la señal emitida por el equipo durante su propagación depende de un conjunto de parámetros que limitan las posibilidades de éxito, por este motivo Los sistemas de georradar deben reducir diferentes fuentes de señales no deseadas para definir claramente los elementos que nos interesan.

4.4.1 Ruido.

El ruido aparece como variaciones aleatorias en la señal recibida. Cuanta menor potencia tiene la señal que nos interesa, más difícil es distinguirla del ruido, este fenómeno se debe entre otros motivos a que el medio que estamos analizando no es perfectamente isótropo y por lo tanto tiene variaciones.

4.4.2 Dispersión.

Se dice que el georradar emite ondas en una determinada frecuencia, pero en realidad emite una serie de ondas que sumadas componen la frecuencia dominante. Las características de la señal en el medio como la velocidad o longitud de onda dependen de la frecuencia y por tanto, cada onda tendrá un comportamiento diferente. Esto es lo que se conoce como dispersión

4.4.3 Atenuación Geométrica.

La energía emitida por una antena se reparte alrededor de ésta sobre la superficie de una esfera, lo que provoca la atenuación de la amplitud de la señal recibida en un factor proporcional al inverso de la distancia del emisor.

4.4.4 Difusión (Scattering).

Este término de Scattering se refiere a la dispersión de la energía causada por la falta de homogeneidad del medio por el que está viajando la energía. Por tanto los fenómenos de reflexión y difracción también entrarían en este grupo.

No obstante el término suele emplearse para obstáculos menores que la longitud de onda, mientras que la difracción se produce cuando la onda incide sobre un elemento único como bordes o esquinas. En resumen la dispersión se produce cuando la onda encuentra una discontinuidad en las propiedades eléctricas o magnéticas del material, siendo estas discontinuidades del orden de la longitud de onda en el medio o inferior. Este fenómeno se manifiesta más en las antenas que emplean frecuencias mayores ya que la longitud de onda es en consecuencia más pequeña.

4.4.5 Interferencias

El uso de ciertos dispositivos inalámbricos mientras se está trabajando con el georradar son una fuente importante de ruido, como puede ser el caso más común el uso de los móviles.

4.4.6 Absorción.

Se ocasiona cuando parte de la energía electromagnética se convierte en calor, esto se puede producir por la polarización de las partículas. En general la permitividad dieléctrica y la conductividad eléctrica se expresan como números complejos que describen las características de los materiales.

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

Donde $\sigma'(\omega)$ representa la conductividad óhmica, y $\sigma''(\omega)$ es la conductividad compleja que determina la amplitud de la corriente desfasada respecto al campo eléctrico externo.

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

Por otro lado, $\varepsilon'(\omega)$ produce una corriente en fase respecto al campo eléctrico externo mientras que $\varepsilon''(\omega)$ representa las pérdidas de energía debido a un retardo en la polarización.

La conductividad eléctrica y la permitividad dieléctrica están relacionadas entre sí. Por un lado, la parte real la permitividad dieléctrica y la imaginaria de la conductividad generan una corriente que varía en fase con el campo eléctrico aplicado. Mientras que por otro lado, la parte imaginaria de la constante dieléctrica y la real de la conductividad generan una corriente desfasada respecto al campo eléctrico.

En el rango de frecuencias que trabaja el georradar se produce el efecto de polarización orientacional de moléculas polares., esto consiste en la orientación de la molécula en la que su carga positiva se desplaza respecto a la negativa en la dirección del campo eléctrico aplicado. Este fenómeno depende fuertemente de la temperatura del sistema.

Aunque aquí no la enunciemos, con la ecuación de Debye obtenemos la descomposición en parte real e imaginaria de la permitividad dieléctrica según ω . En general los materiales del subsuelo no tienen mucha capacidad de polarización, sin embargo el agua sí que tiene esa capacidad y por ello los medios con mayor contenido de humedad tienen mayores pérdidas.

4.5 Resolución.

La resolución de una antena es la capacidad para distinguir elementos independientes, ya sea en el tiempo o en tamaño. Podemos hablar de resolución vertical u horizontal.

4.5.1 Resolución vertical

Esta es la capacidad de una antena para distinguir dos señales cercanas en el tiempo. Este parámetro depende de la frecuencia de emisión y de la duración del pulso. Cuando la duración del pulso disminuye, el ancho de banda aumenta. Los sistemas de georradar están diseñados para conseguir anchos de banda que tengan una frecuencia próxima a la central. Consiguiendo que la duración del pulso y el ancho de banda sean inversamente proporcionales.

También se puede definir como el espesor mínimo que es capaz de distinguir para la capa intermedia siendo el conjunto de tres capas, como se puede ver en el siguiente ejemplo.

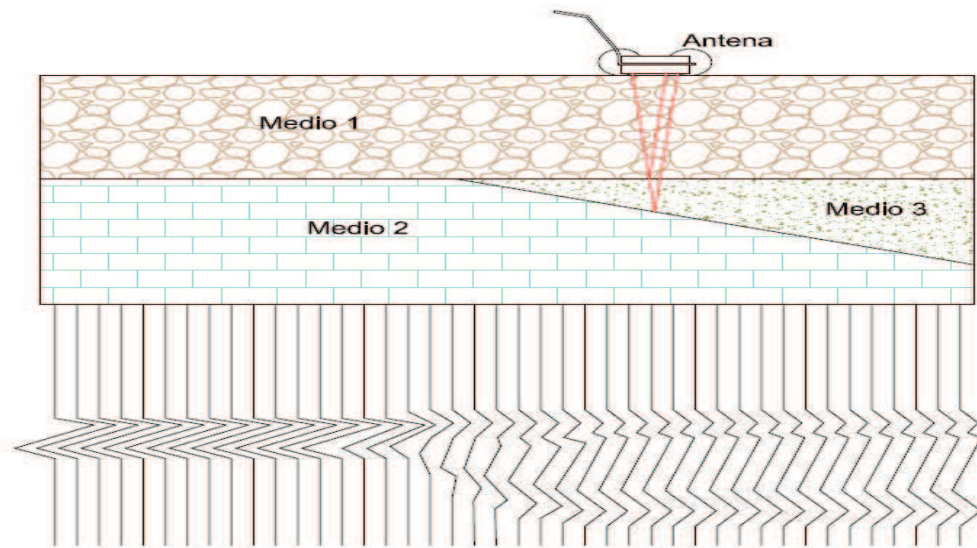


Figura 4-4 Representación esquemática que simula la resolución vertical en un equipo de georradar

Para que el georradar pueda distinguir completamente la capa intermedia, se debe cumplir que la señal que ha incidido en la superficie que separa los medios 3 y 2 previamente se haya reflejado en la separación de los medios 1 y 3. Es decir, se trata de que el equipo distinga entre dos reflexiones que se produzcan de forma consecutiva en dos reflectores cercanos en el espacio

La resolución vertical con esta consideración se expresa como:

$$r_v = \frac{V \cdot \Delta t}{2}$$

Donde:

r_v = resolución vertical

V = velocidad de propagación de las ondas en el medio.

Δt = duración de la señal.

Esta definición nos garantiza la resolución vertical debido a que los factores que la componen son el tiempo y la velocidad, factores que nos determinarán el solape entre dos señales distintas seguidas en el tiempo.

Por lo tanto para mejorar la resolución de las muestras obtenidas podemos optar por equipos con menor duración del pulso (inversamente proporcional a la frecuencia), Por lo que la resolución mejorará al aumentar la frecuencia, aunque así también aumentará la atenuación, siendo necesario encontrar un equilibrio. Otra opción sería aprovechar la disminución de la propia velocidad de propagación del medio, pero esta opción es más teórica y compleja de llevar a cabo comparándola con la anterior ya que en el equipo podemos variar la frecuencia de trabajo utilizando una antena u otra.

4.5.2 Resolución horizontal:

Con el nombre de resolución horizontal se define la capacidad de una antena para detectar y resolver un reflector y su geometría considerando la influencia del movimiento de la antena por la superficie del terreno.

Los factores a tener en cuenta son; la velocidad de desplazamiento de la antena, el número de impulsos por segundo emitidos, la geometría del haz y la profundidad del reflector.

Se ha visto que el radar emite impulsos cortos con una frecuencia fija. Estos impulsos se agrupan en ondas de barrido dando lugar a un número de trazas generadas por segundo, dependiendo del número de impulsos empleados para formar cada una de ellas.

El número de trazas emitidos se determina dividiendo el número de trazas por segundo entre la velocidad de desplazamiento, aumentando la velocidad de desplazamiento las trazas se repartirán a lo largo de una superficie mayor y por lo tanto disminuyendo la densidad de trazas.

Para determinar el número de trazas que alcanzan al reflector utilizamos la fórmula siguiente, donde z es la distancia entre la antena y el reflector, V_a es la velocidad de desplazamiento de la antena, tr/s es el número de trazas por segundo que se registran.

$$nt = (tr/s) \frac{2z}{v_a}$$

Según los estudios de diferentes autores se establece que se puede resolver un objeto cuando inciden sobre él más de 20 trazas.

Por lo tanto en función de la resolución deseada la velocidad de desplazamiento debe de ser acorde, ya que una velocidad excesivamente lenta también producirá una distorsión de la imagen de la "estructura" que se visualiza en el monitor, por el contrario cuando el área de estudio es muy grande y no se desea un detalle de los objetos aislados, se utiliza una velocidad de traslación más elevada con el fin de disminuir la nitidez de objetos irrelevantes.

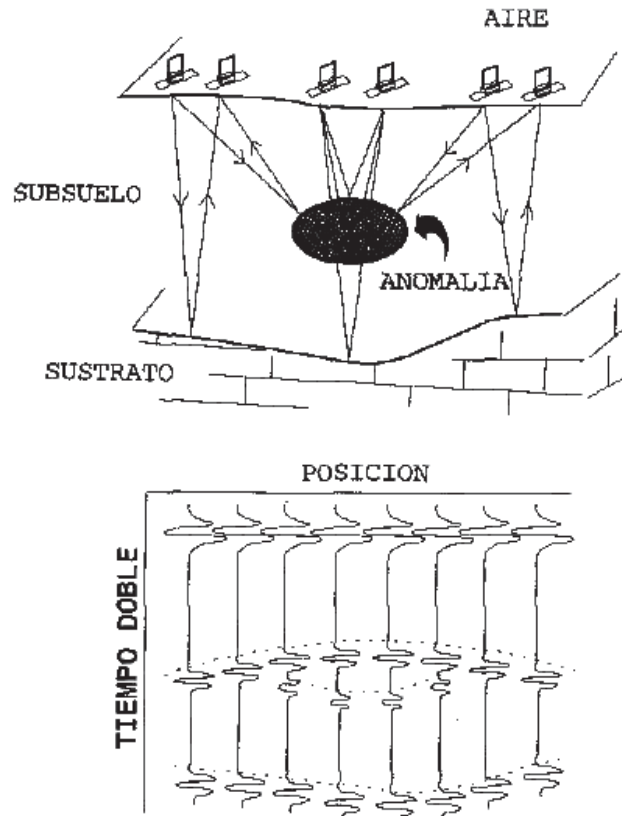


Figura 4-5 Detección de un objeto aislado mediante georradar.

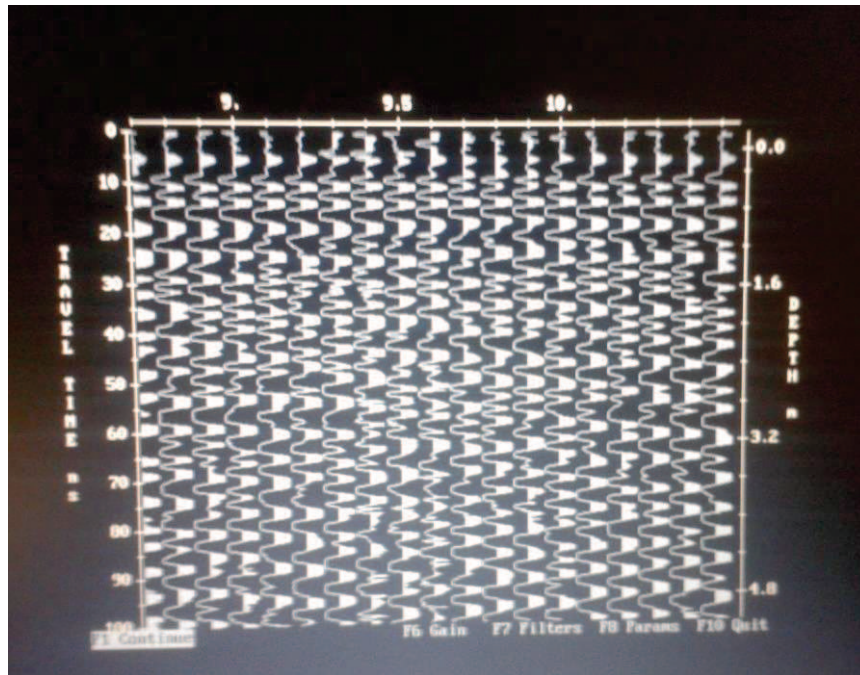


Figura 4-6 Imagen obtenida del programa Run, correspondiente a las trazas de uno de nuestros perfiles.

Cuando se trata de objetos aislados, la detección de estos por el georradar comienza desde una posición anterior a la vertical del mismo, aproximadamente a partir de una distancia equivalente a la profundidad del reflector.

El resultado es la aparición del reflector como una figura de forma hiperbólica, geometría que es característica de los registros de radar, la forma de esta hipérbola depende del número de trazas que alcanzan al reflector.

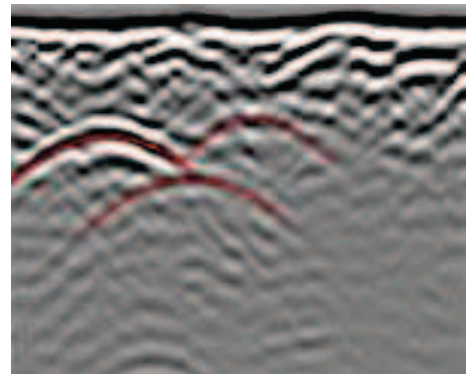


Figura 4-7 Ejemplo de hipérbolas visibles en un radargrama

4.6 Descripción del equipo

Para poder trabajar con el equipo, a parte del propio equipo, necesitamos fuente de alimentación que será una batería de 12 V y un ordenador que almacene los datos obtenidos.

El georradar se compone de distintas partes que mostraremos a continuación, consta de un bastón con el que se realizan los perfiles y se dirigen las antenas. Las antenas emisoras y receptoras, de las que se dispone de dos juegos, uno de 225 MHz y

otro de 450MHz. Una bobina de cables que comunica las antenas con la unidad de control, y la propia unidad de control que gobierna el equipo.



Figura 4-8 Partes que componen el georradar

4.7 Exploración mediante Georradar.

4.7.1 Determinación de los parámetros más significativos.

Es muy importante determinar adecuadamente las características del medio de propagación donde se va a realizar el estudio para obtener unos datos que se puedan interpretar y que nos proporcionen datos interesantes.

Para ello a continuación se van a definir algunos de los parámetros más significativos aplicando las fórmulas expuestas en el apartado de teoría de propagación de los campos electromagnéticos.

4.7.1.1 Características del medio de propagación:

Se han diferenciado dos medios de propagación, uno para la zona más superficial, el suelo, caracterizado como bosque- agrícola con vegetación y bastante húmedo (medio 1), y un segundo medio al que se le atribuirán las características de una roca dolomítica (Medio 2).

A pesar de que se realizaron los cálculos necesarios para el uso de la antena de 450 MHz no se incluyen en este apartado ya que finalmente no se utilizó dicha antena en los trabajos de campo.

Conductividad, permitividad eléctrica y permeabilidad magnética para el medio 1:

$$\sigma = 10^{-2} - 10^{-1} \approx 0.05 \text{ S/m}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$$

$$\varepsilon_r = 15;$$

$$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$$

$$\varepsilon = 1.33 \cdot 10^{-10} \text{ F/m}$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

$$\mu_r = 1$$

$$\mu_0 = \frac{4\pi}{10^7}$$

$$\mu = 1.256 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$$

Conductividad, permitividad eléctrica y permeabilidad magnética para el medio 2:

$$\sigma = 10^{-2} - 10^{-1} \approx 0.05 \text{ S/m}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$$

$$\varepsilon_r = 8;$$

$$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$$

$$\varepsilon = 7.07 \cdot 10^{-11} \text{ F/m}$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

$$\mu_r = 1$$

$$\mu_0 = \frac{4\pi}{10^7}$$

$$\mu = 1.256 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$$

4.7.1.2 Constante de propagación γ :

$$\gamma = \alpha + i\beta$$

Constante para el medio 1 y 225MHz: $\omega = 2\pi \cdot 225 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$

$$\alpha = \omega \cdot \sqrt{\frac{1.256 \cdot 10^{-6} H/m \cdot 1.33 \cdot 10^{-10} F/m}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + \left(\frac{0.05 \frac{S}{m}}{\omega \cdot 1.33 \cdot 10^{-10} \frac{F}{m}} \right)^2} - 1 \right)}$$

$$\alpha = 2.4089 \text{ Np/m}$$

$$\beta = \omega \cdot \sqrt{\frac{1.256 \cdot 10^{-6} H/m \cdot 1.33 \cdot 10^{-10} F/m}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + \left(\frac{0.05 \frac{S}{m}}{\omega \cdot 1.33 \cdot 10^{-10} \frac{F}{m}} \right)^2} + 1 \right)}$$

$$\beta = 18.42993 \text{ rad/s}$$

Constante para el medio 2 y 225MHz: $\omega = 2\pi \cdot 225 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$

$$\alpha = \omega \cdot \sqrt{\frac{1.256 \cdot 10^{-6} H/m \cdot 7.07 \cdot 10^{-11} F/m}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + \left(\frac{0.05 \frac{S}{m}}{\omega \cdot 7.07 \cdot 10^{-11} \frac{F}{m}} \right)^2} - 1 \right)}$$

$$\alpha = 3.2378 \text{ Np/m}$$

$$\beta = \omega \cdot \sqrt{\frac{1.256 \cdot 10^{-6} H/m \cdot 7.07 \cdot 10^{-11} F/m}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + \left(\frac{0.05 \frac{S}{m}}{\omega \cdot 7.07 \cdot 10^{-11} \frac{F}{m}} \right)^2} + 1 \right)}$$

$$\beta = 13.7097 \text{ rad/s}$$

4.7.1.3 Impedancias para la frecuencia de 225MHz

Para el medio 1:

$$|\eta| = \frac{\sqrt{\frac{1.256 \cdot 10^{-6} H/m}{1.33 \cdot 10^{-10} F/m}}}{\sqrt[4]{1 + \left(\frac{0.05 S/m}{2\pi \cdot 225 \cdot 10^6 \text{ rad/s} \cdot 1.33 \cdot 10^{-10} F/m} \right)^2}} = 95.612 \text{ V/m}$$

$$\tan 2\theta = \frac{0.05 \text{ S/m}}{2\pi \cdot 225 \cdot 10^6 \text{ rad/s} \cdot 1.33 \cdot 10^{-10} \text{ F/m}} = 0.2653$$

$$0.2653 = \frac{2 \tan \theta}{1 - \tan^2 \theta}; \theta = 0.12967 \text{ rad}$$

$$\eta = 95.612 \cdot e^{0.12967} = \mathbf{108.85 \text{ V/m}}$$

Para el medio 2:

$$|\eta| = \frac{\sqrt{\frac{1.256 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}}{7.07 \cdot 10^{-11} \text{ F/m}}}}{\sqrt[4]{1 + \left(\frac{0.05 \text{ S/m}}{2\pi \cdot 225 \cdot 10^6 \text{ rad/s} \cdot 7.07 \cdot 10^{-11} \text{ F/m}}\right)^2}} = \mathbf{126.048 \text{ V/m}}$$

$$\tan 2\theta = \frac{0.05 \text{ S/m}}{2\pi \cdot 225 \cdot 10^6 \text{ rad/s} \cdot 7.07 \cdot 10^{-11} \text{ F/m}} = 0.50025$$

$$0.50025 = \frac{2 \tan \theta}{1 - \tan^2 \theta}; \theta = 0.12254 \text{ rad}$$

$$\eta = 126.048 \cdot e^{0.12254} = \mathbf{158.93 \text{ V/m}}$$

4.7.1.4 Velocidad de propagación para 225MHz:

En el medio 1:

$$v = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\frac{15}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{0.05 \text{ S/m}}{2\pi \cdot 225 \cdot 10^6 \text{ rad/s} \cdot 1.33 \cdot 10^{-10} \text{ F/m}}\right)^2} + 1 \right)}}$$

$$v = \mathbf{76795311.7 \text{ m/s} = 0.0768 \text{ m/ns}}$$

En el medio 2:

$$v = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\frac{8}{2} \left(1 + \left(\frac{0.05 \text{ S/m}}{2\pi \cdot 225 \cdot 10^6 \text{ rad/s} \cdot 7.07 \cdot 10^{-11} \text{ F/m}} \right)^2 + 1 \right)}}$$

$$v = 103065490.3 \text{ m/s} = 0.103 \text{ m/ns}$$

4.7.1.5 Longitud de onda:

En el medio 1:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{103065490.3 \text{ m/s}}{225 \cdot 10^6 \text{ rad/s}} = 0.458 \text{ m}$$

En el medio 2:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{103065490.3 \text{ m/s}}{225 \cdot 10^6 \text{ rad/s}} = 0.458 \text{ m}$$

4.7.1.6 Coeficientes de reflexión y transmisión entre medios:

Estos valores se obtienen de la permitividad dieléctrica relativa

$$R = \frac{\sqrt{15} - \sqrt{8}}{\sqrt{15} + \sqrt{8}} = \mathbf{0.15587}$$

$$T = \frac{2\sqrt{8}}{\sqrt{15} + \sqrt{8}} = \mathbf{0.84413}$$

4.7.1.7 Resolución vertical:

Este parámetro nos definirá el intervalo de tamaños a partir del cual el equipo comienza a distinguir las anomalías para los distintos materiales. Lo calculamos a partir del ancho de banda (Δf).

$$\Delta t = \frac{1}{\Delta f}; \Delta t = \frac{1}{2\pi \cdot 225 \cdot 10^6} = 2 \cdot 10^{-9} s = \mathbf{2 ns}$$

Resolución del medio 1

$$v = \frac{2 ns \cdot 7.68 cm/ns}{2} = \mathbf{7.86 cm}$$

Resolución del medio 2

$$v = \frac{2 ns \cdot 10.31 cm/ns}{2} = \mathbf{10.31 cm}$$

4.7.1.8 Otros parámetros

Distancia entre antenas:

Este factor viene determinado por el fabricante, para la frecuencia de 225MHz la separación entre antenas es de 0.50 m

Distancia de paso:

Se define así al desplazamiento del georradar, entre un pulso emitido y el siguiente, guiados por el fabricante esta distancia nos recomienda que no sea superior a 10 cm. Nosotros configuraremos el equipo para utilizar este valor.

4.7.2 Planificación previa al trabajo de campo.

Los radargramas nos proporcionan un perfil del terreno, por lo que para definir adecuadamente la estructura, resulta lógico realizar los perfiles perpendiculares a la estructura a estudiar. Ya que hay un gran desconocimiento de la zona, en un principio vamos a elegir la dirección de los perfiles perpendicular a la línea recta que une la

entrada y la salida del agua. Además estos perfiles se realizarán siempre en el mismo sentido con el fin de evitar interpretaciones erróneas.

Por supuesto, esto solo sirve como punto de partida, una vez se reconozca la zona de trabajo y las posibilidades orográficas, se elaboraran los perfiles donde el terreno lo permita y se considere interesante para el estudio.

Por lo tanto estos perfiles servirán a priori, pero al no tratarse de definir lo que encontramos en el subsuelo en un punto concreto, sino de determinar la trayectoria del caudal de agua, estos perfiles se variaran en el propio momento de la medición según el criterio de las personas que participen en la medición, y de los datos que se puedan interpretar in-situ.

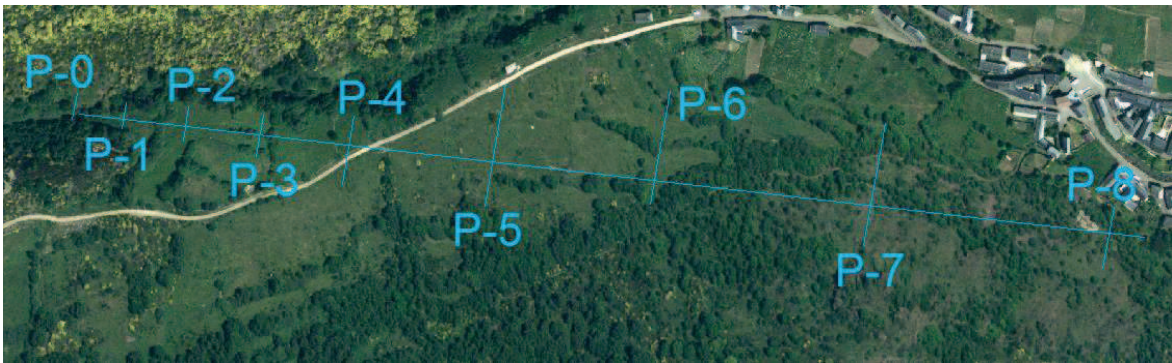


Figura 4-9 Esquema propuesto inicialmente para el trazado de los perfiles

4.7.3 Trabajo de campo

Una vez tenidas en cuenta las consideraciones previas, la toma de datos se ha realizado siguiendo el procedimiento que se describirá a continuación.

El día tres de junio nos desplazamos con el equipo hasta el lugar, Como resulta lógico lo primero que se hizo fue reconocer el terreno, para planificar adecuadamente el trabajo. Debido fundamentalmente a la orografía, la vegetación y a las construcciones presentes (muros de piedra y vallas) se decidió dejar a un lado las premisas iniciales sobre dirección longitud y espaciamiento entre perfiles. Se optó por levantar diversas estaciones en las zonas más despejadas, en las que se montaría el equipo y desde ellas realizar una serie de perfiles.

4.7.3.1 Procedimiento seguido para la toma de datos con el equipo:

1. Preparar el equipo y asegurarse de que todo está en buenas condiciones.
2. Transporte del equipo hasta el punto elegido (Batería, ordenador, mesa, antenas, unidad de control, Bobina de cables, caja con los conectores necesarios y un cuaderno de apuntes con planos)
3. Retirar las protecciones de los conectores.
4. Conexión de las antenas a la unidad de control mediante la bobina de cables.

5. Conectar la unidad de control al ordenador.
6. Conectar todo el equipo a la batería.
7. Con todas las conexiones hechas, se ejecuta el software de adquisición de datos y se comienzan a realizar los perfiles.
8. Una vez se han realizado los perfiles desde la misma estación se realiza el proceso inverso y se traslada hasta el próximo lugar.

A continuación se muestran algunas fotografías de alguna de las etapas anteriores.

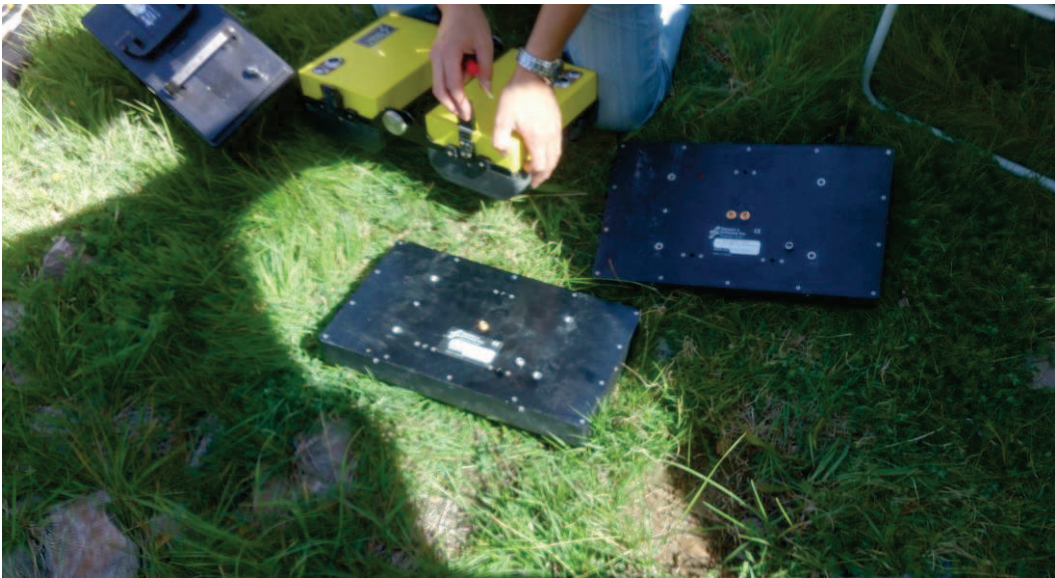


Figura 4-10 Montaje de las antenas y preparación del equipo.



Figura 4-11 Transporte del equipo a la izquierda y antenas del georadar mientras se realiza un perfil



Figura 4-12 Fotografía del momento en el que se está montando el equipo

Finalmente se realizaron un total de 10 perfiles desde cuatro estaciones, que quedan definidos geográficamente en la tabla 4.4 y en las figuras 4-13 y 4-14 que se muestran a continuación.

Tabla 4-4 Coordenadas del inicio y fin de los perfiles realizados

	Coordenadas de inicio		coordenadas finales	
	x	y	x	y
estación 1	726.306,01	4.743.555,07		
Perfil A	726.302,83	4.743.554,74	726.316,27	4.743.556,72
Perfil B	726.312,99	4.743.556,28	726.310,99	4.743.551,28
Perfil C	726.308,50	4.743.551,28	726.308,86	4.743.548,58
Perfil D	726.301,91	4.743.557,83	726.278,59	4.743.554,17
estación 2	726.318,95	4.743.542,15		
Perfil E	726.293,98	4.743.543,63	726.334,35	4.743.549,60
estación 3	726.355,37	4.743.542,91		
Perfil F	726.335,15	4.743.538,47	726.336,07	4.743.550,53
Perfil G	726.345,54	4.743.534,71	726.354,37	4.743.549,76
estación 4	727.100,09	4.743.453,21		
Perfil H	727.112,86	4.743.438,75	727.122,22	4.743.447,70
Perfil I	727.108,05	4.743.451,28	727.086,55	4.743.482,57

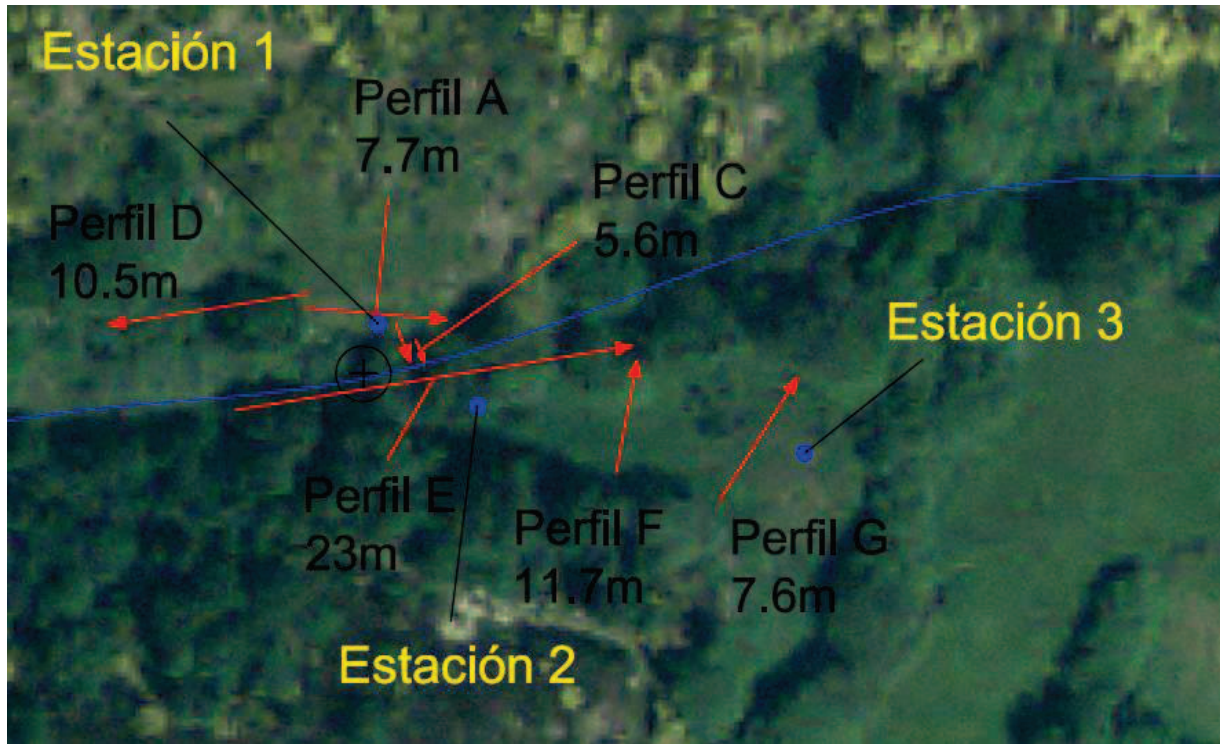


Figura 4-13 Esquema I de los perfiles realizados sobre el terreno



Figura 4-14 Esquema II de los perfiles realizados sobre el terreno

4.7.4 Análisis de los datos obtenidos

En este apartado se van a analizar los datos obtenidos con el georradar, para ello primero clasificaremos los perfiles en dos grupos, por un lado los que no nos aportan datos relevantes, y por otra parte analizaremos las características de los perfiles que se consideran interesantes.

Los programas informáticos de los que nos hemos ayudado para la elaboración de estos perfiles son el Run (programa propio del equipo Pulse Ekko y de la empresa sensors & software), programa que sirve para realizar los perfiles y en el que se introducen los parámetros correspondientes al medio de propagación y las configuraciones del equipo. Y por otro lado los programas Win_Ekko y Transform que nos sirven para editar introducir filtros y modificar los perfiles ya elaborados.

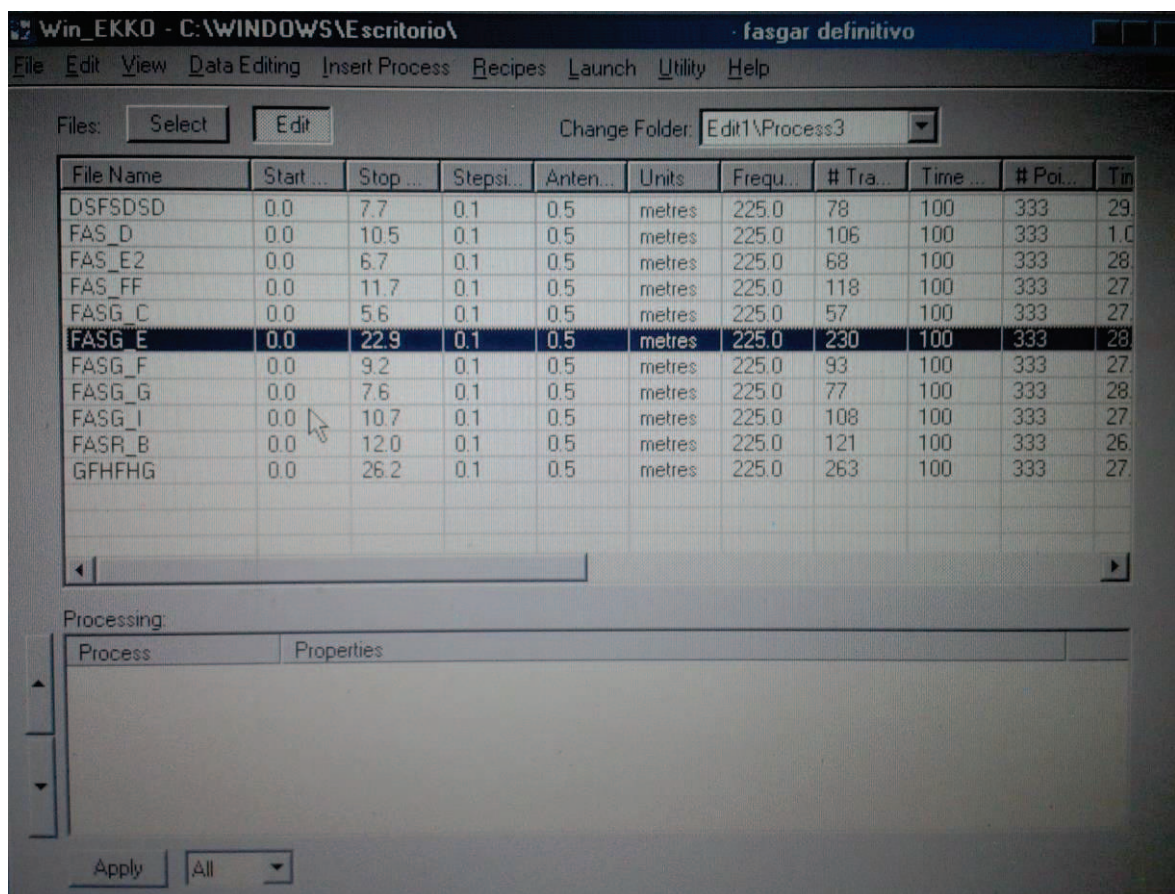


Figura 4-15 vista del programa Win Ekko, utilizado para tratar los perfiles obtenidos. en él se ve en la parte superior todos los perfiles realizados en el estudio, y en la parte inferior un cuadro en el que se introducen los procesos que se quieren aplicar.

4.7.4.1 Perfiles realizados.

Como se dijo anteriormente se realizaron un total de 10 perfiles que se van a comentar a continuación.

Debido a las malas condiciones en las que se han tenido que realizar estas mediciones, como son un suelo con una vegetación muy densa que limita mucho la propagación de la onda, una climatología en la que ha coincidido un periodo de lluvias (bastante intensas) previo al estudio, lo que aumentan la conductividad del terreno limitando significativamente las posibilidades del equipo y una orografía mucho más compleja de lo esperado. Han supuesto, de un modo general, que los resultados obtenidos con no sean todo lo satisfactorios que se podía esperar.

Del total de los perfiles realizados se han descartado y no se han incluido en el estudio gran parte de ellos ya que no aportaban información relevante o interpretable debido, sobre todo, a la gran presencia de ruido que no se ha conseguido eliminar. Siendo los perfiles que se han tenido en cuenta en el estudio los Perfiles A, D, B, E, H e I.

4.7.4.1.1 Perfil A y perfil D:

Estos perfiles fueron los primeros que se realizaron, su trayectoria pasa justo por encima del punto en el que se introduce el agua en el suelo, pero desplazado aproximadamente 3 metros en dirección noroeste del mismo. El objetivo de estos perfiles era determinar si existía continuidad, en el caso de que se tratase de una fractura similar a una falla que uniera los puntos de entrada y salida del agua.

Al analizar el perfil A no observamos nada destacable, solo se puede diferenciar una zona superior, de menos de 1m de potencia que se diferencia de resto del radargrama y que corresponde a la zona más superficial del terreno, una capa de roca más alterada que el resto y el suelo.

En el perfil D se distinguen los mismos elementos que en el caso anterior, es decir una capa superficial correspondiente al suelo, y además en la parte inferior derecha a partir de los 4 metros de profundidad (correspondiente a los últimos metros del perfil) donde a pesar de la mala calidad del radargrama y la gran presencia de ruido se puede interpretar que hay un cambio en el subsuelo, correspondiente en mi opinión al techo o la parte superior de una zona más alterada, ya sea debido a la tectónica o a la propia naturaleza de los materiales. Lo que sí que se puede afirmar es que a pesar de que esta anomalía puede formar parte de la estructura, lo que se ve en el radargrama no se trata de una zona saturada en agua debido a dos factores fundamentalmente. Por un lado tenemos un factor orográfico, el cauce del río está ligeramente por debajo de esta cota y nos situamos muy cerca del "barranco" del río, lo que hace improbable esta presencia. Y por otra parte es que la presencia de agua atenúa la señal, lo que no se observa en este caso.



Figura 4-16 Punto en el que el agua se infiltra y sobre el que están realizados los perfiles A y D

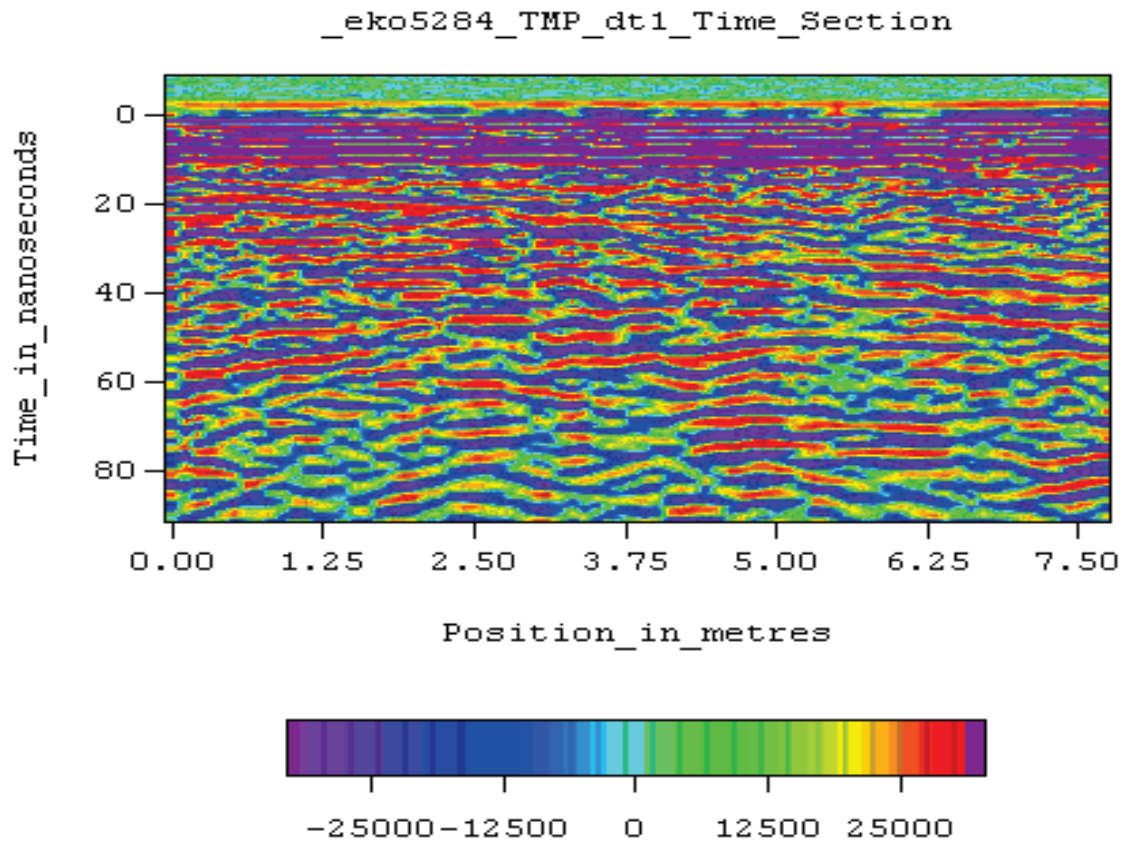


Figura 4-18 Perfil A

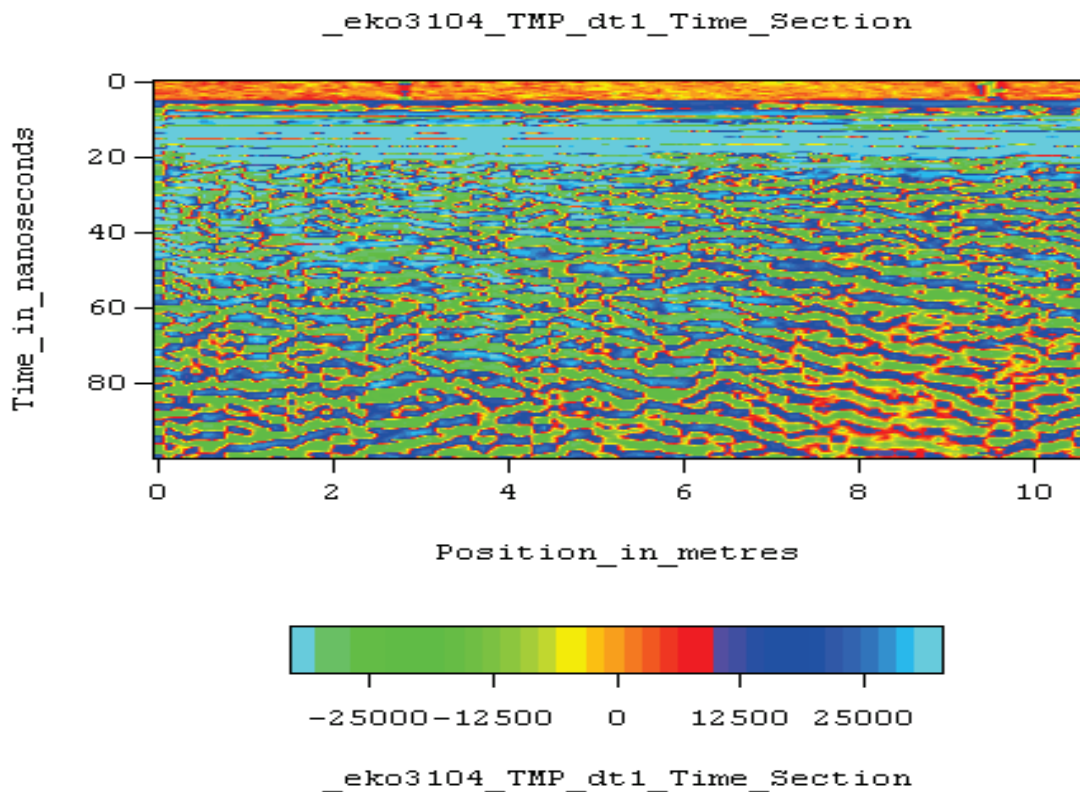


Figura 4-17 Perfil D

4.7.4.1.2 Perfil B

Este perfil se realizó a lo largo de la ladera, en una posición más o menos perpendicular a la dirección del río, unos metros a la derecha del punto de interés en dirección al pueblo.

Cabe destacar que lo que vemos en el perfil como superficie horizontal en el terreno tiene un ángulo de talud elevado (aproximadamente entre 45 y 55 grados). En este caso también podemos distinguir elementos comunes a los perfiles anteriores, como es el suelo que cubre los primeros metros, pero también se observan otros nuevos. Se pueden ver unas trazas que forman cierto ángulo con la superficie, estas corresponden con la estratificación de la roca (Figura 4-19). En los últimos metros de este perfil se distingue como hay una variación en las ondas reflejadas. Según mi criterio se trata de alguna de la capa de estratos que se encuentra saturada en agua, y que probablemente esta comunicada con el punto anterior, por lo que podría tratarse de parte del curso que sigue el agua, aunque también hay que destacar que nos encontramos bastante cerca del cauce del propio río, por lo que no podemos descartar cierta influencia del mismo.

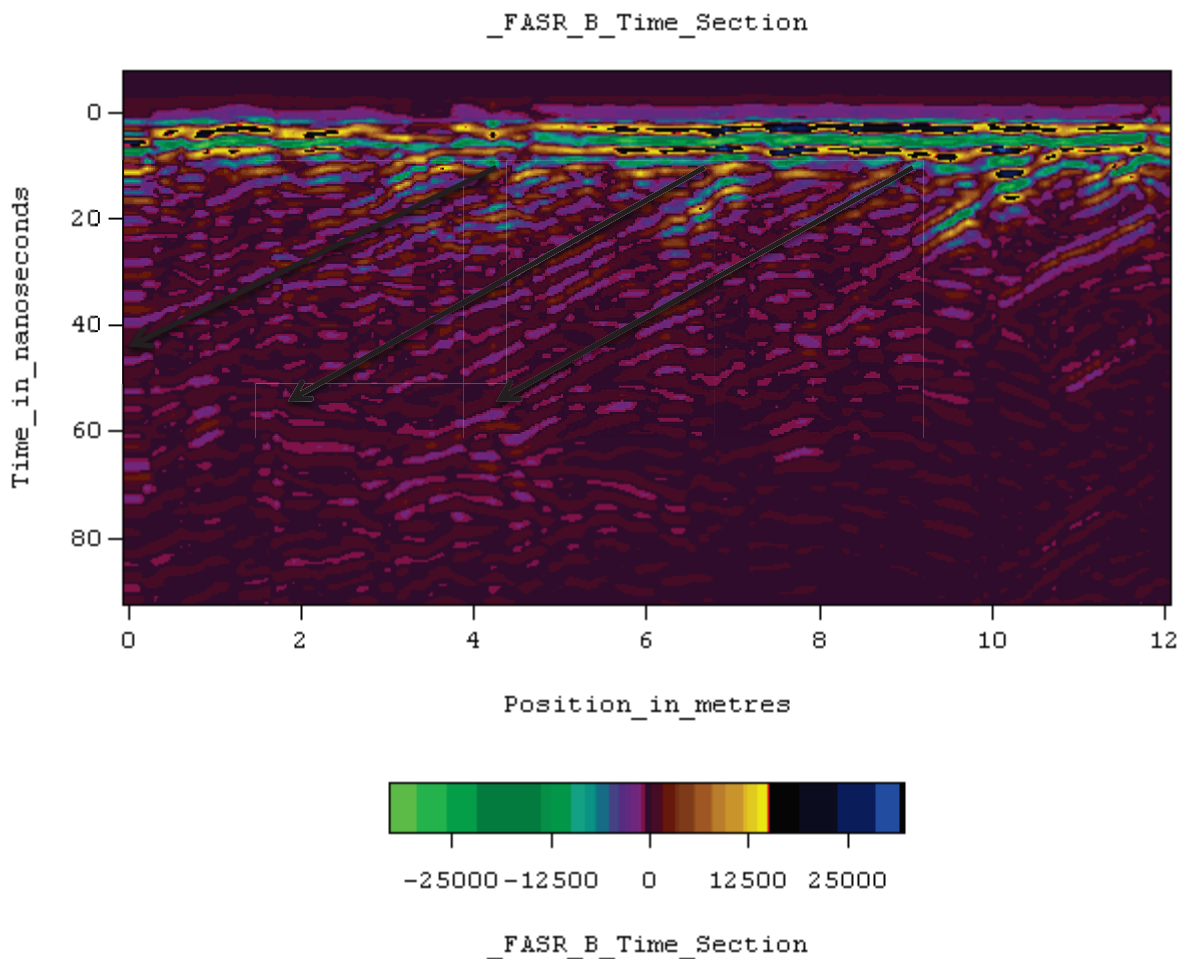


Figura 4-19 Perfil B

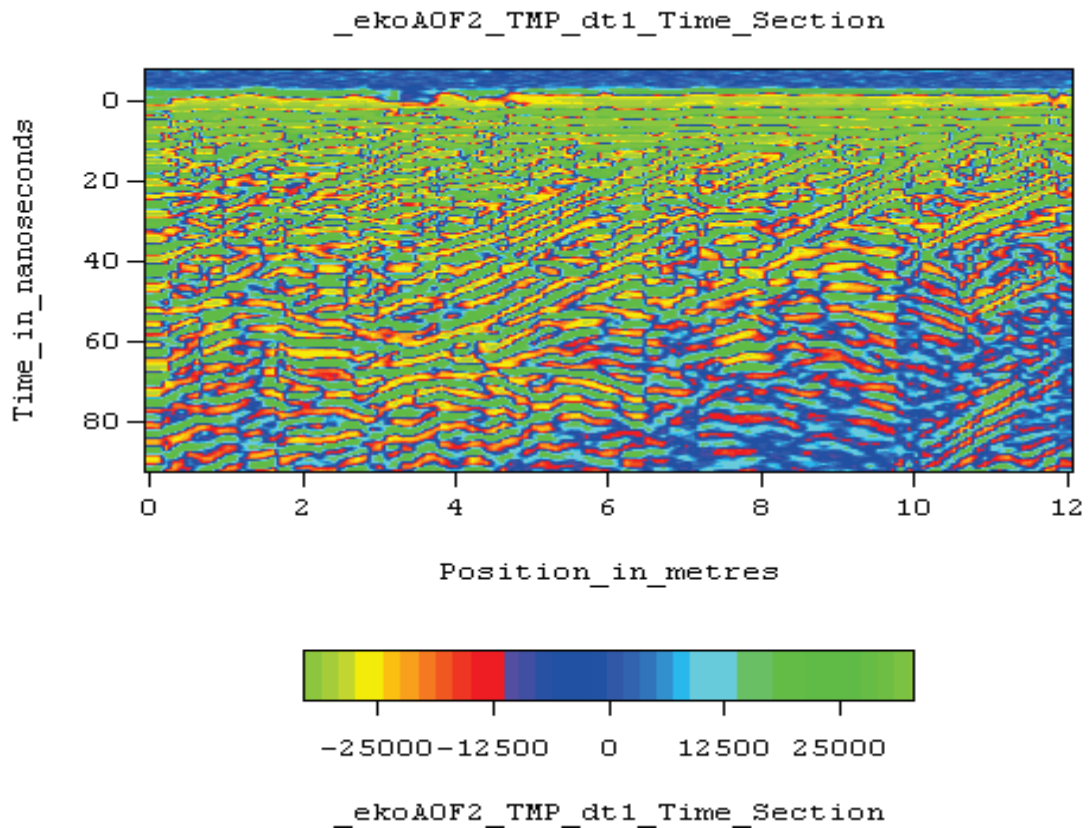


Figura 4-20 Perfil B con otro contraste, en el que destacan más otros elementos que en el perfil anterior.

4.7.4.1.3 Perfil E

Se realizó desde el margen derecho del río prácticamente paralelo al mismo y a unos 10 metros de él. Es un perfil bastante largo (casi 25m) que nos proporciona cierta información de un modo indirecto. Contradictoriamente, destaca por no tener nada destacable, En este caso no se aprecia ninguna anomalía a parte del límite entre el suelo y la roca.

El punto en el que se observa la entrada de agua está situado al margen izquierdo del río, y la central al margen derecho, como resulta obvio el agua debe cruzar el río en algún punto. Con el trazado de este perfil tan largo, y la ausencia de anomalías en el mismo, podemos limitar la dirección de este “cauce subterráneo”. Formando el cauce del río y el cauce objeto de estudio un ángulo bastante agudo en dirección al pueblo.

El resto de los perfiles realizados en las proximidades del río se han descartado debido a que, como se ha dicho anteriormente, la profundidad que se esperaba obtener superó las posibilidades de prospección del equipo.

En este punto pasamos a analizar los perfiles correspondientes a la zona de la salida del agua, de donde tenemos dos perfiles el H e I.

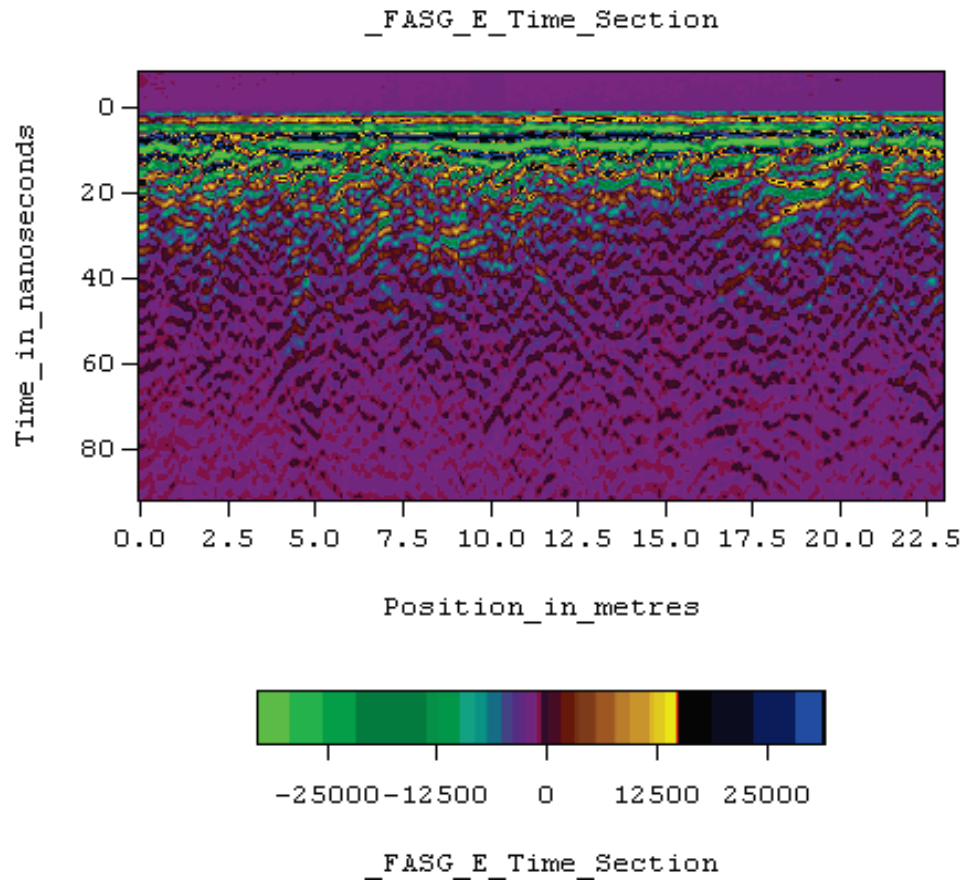


Figura 4-21 Perfil E

4.7.4.1.4 Perfil H

Como podemos ver en la Figura 4.14 (esquema de perfiles), este perfil se realizó en la dirección aproximada N60W, a lo largo del camino que transcurre por detrás de las casas. De su trazado cabe destacar que los tres primeros metros tienen una pendiente muy superior al resto del perfil.

El terreno que tenemos debajo de esta zona se trata de derrubios de ladera, lo que sumado al ruido que tenemos de fondo, hacen que no quepa destacar nada significativa. Por lo que este perfil tiene la misma consideración que el anterior.

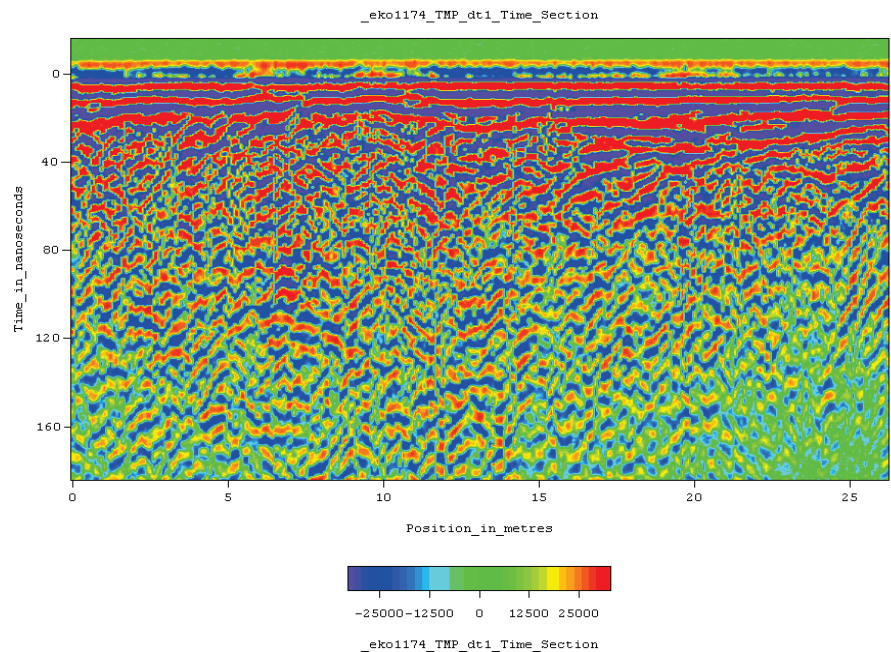


Figura 4-22 Perfil H

4.7.4.1.5 Perfil I

El trazado de este perfil se realizó por encima de la salida del agua, más o menos perpendicular a esta y a unos 6-7 metros.

En este perfil podemos diferenciar distintas zonas. La primera zona se encuentra al principio del perfil y lo que se puede ver es una anomalía provocada por grandes raíces de los árboles y parte de la base de un muro superficial que limitaba distintas propiedades. La segunda zona se trata del propio suelo presente en los otros radargramas. Una tercera zona al final del perfil que corresponde a un muro que tiene como fin contener la tierra de una de las terrazas situadas en la falda de la montaña. Y por último podemos diferenciar una cuarta zona en la que las ondas se atenúan bastante, lo que probablemente es debido a la presencia de la corriente de agua que alimenta la central y las zonas con aire localizadas entre los grandes bloques que componen esta parte de la montaña.

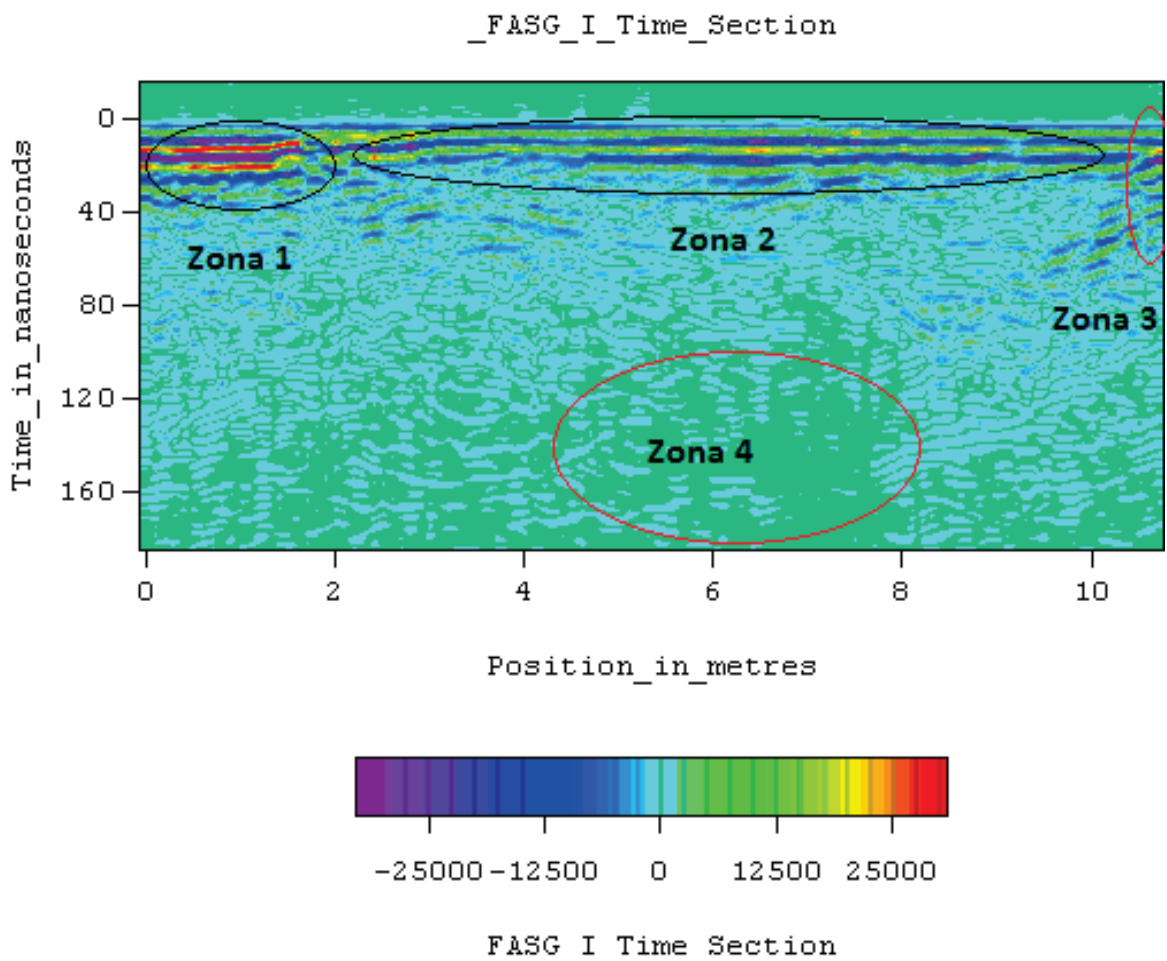


Figura 4-23 Perfil I

5 Conclusiones.

Con los datos presentados a lo largo del estudio y las observaciones realizadas en el campo se ha llegado a la conclusión que vamos a exponer a continuación.

Como se dijo anteriormente nos encontramos en contacto entre el precámbrico y el cámbrico inferior, en una zona de discordancia angular, en ambos materiales se pueden encontrar pliegues debido a la tectónica, y a pesar de que en las proximidades no se ha situado ninguna falla visible, ya en la geología se vio la posibilidad de una falla tardihercínica no aflorante deducible morfológicamente por la linealidad del Vallegordo, siendo muy probable que existan fisuras y que el material esté dañado y debilitado debido a los procesos de tectónica.

Por otra parte, con los datos obtenidos con el georradar, hemos limitado las posibilidades acerca de cuál es el trayecto que recorre el agua desde el sumidero hasta la salida. Como se muestra en la figura 5-1, la trayectoria que debe seguir tiene una dirección entre N80°E y N85°E. Una dirección similar a la que tienen los estratos en estos materiales.



Figura 5-1 Rango de posibilidades en la trayectoria del agua hacia su salida.

En el pueblo, en la zona de salida del agua se determinó que el caudal de agua sale con una dirección aproximada de N10°E, esta dirección se obtuvo de unir la salida del agua con la zona 4 del radargrama I, al tratarse de una zona de derrubios de ladera, además de los 5 metros que se han determinado, lo más probable es que esta trayectoria se introduzca en el monte unos metros más. Es decir, este último trozo coincidente con un terreno muy alterado puede corresponder a la propia acción del agua al fluir entre los clastos y la tierra en la dirección de la línea de máxima pendiente, hasta excavar la estructura que se puede ver actualmente.



Figura 5-2 Esquema que representa la dirección de salida del agua en la ladera.



Figura 5-4 salida del agua y muestra del terreno presente, compuesto por tierra con grandes rocas procedentes de los derrubios.

Si recordamos en unas líneas la geología que está implicada, nos encontramos en la formación Cándada-Herrería, compuesta por una sucesión de muro a techo que contiene una primera capa de microconglomerados y areniscas de grano grueso, seguida por un miembro de transición de estratos calcosilicatados que pasan a ser dolomías masivas rojizas y después va seguido de pizarras verdes y pizarras arenosas, si representamos esta geología en la zona, obtenemos la composición de la Figura 5-5.



Figura 5-3 Leyenda correspondiente a la Figura 5-5

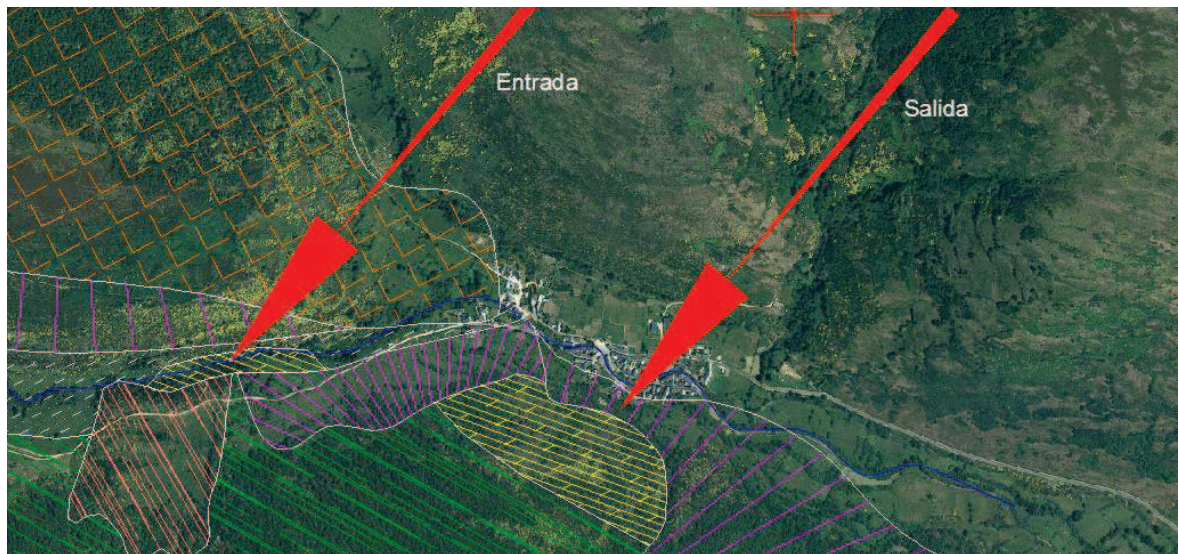


Figura 5-5 Representación esquemática de la geología, obtenida a partir del mapa geológico y de las observaciones en el campo.

Por todo lo dicho anteriormente se ha llegado a la conclusión de que el agua procedente del río Urdiales se introduce en el punto de coordenadas $X=726.302,83$ $Y=4.743.557,83$ en donde se puede ver que ha habido algún derrumbamiento por alguna de las juntas presentes en el macizo y formándose así el espacio necesario para que se introduzca el agua. Por debajo de estas rocas más superficiales encontramos unas capas anteriormente citadas de microconglomerados y areniscas.

Son en estas capas donde se supone que la corriente circula a través de ellas en dirección al pueblo. A pesar de que esta teoría es la más probable también cabe destacar que al tratarse de un terreno calcáreo, podría existir una estructura del tipo Karst (situación en la que el agua a disuelto parte de la roca creando así una "galería natural"), aunque esta teoría no tiene fuerza suficiente ya que no se aprecian otros fenómenos asociados a las mismas como son las Simas o Poljés.

Por lo tanto se supone que el agua circula a lo largo de estos estratos porosos y permeables desde el río, por debajo de los derrumbios de laderas y de los depósitos aluviales hasta el monte en el que sale el agua, donde, debido a algún tipo de fractura o arrosamiento en los estratos se produzca una discontinuidad en los mismos provocando que el agua atraviese estos y comienza a fluir. Otra posibilidad sería que estos estratos saturados queden descubiertos y aflore el caudal, pero esta posibilidad es más improbable ya que este manantial es puntual y no se localizan otros en las inmediaciones ni a lo largo de la ladera.

Una vez ha salido el agua de este estrato discurre subterráneamente a lo largo de la ladera entre los propios derrumbios creando así la surgencia de agua que alimentará la central hidroeléctrica.

6 Estudio Hidrológico.

La fuente de agua superficial representa el elemento vital para la supervivencia del hombre, más aún cuando este lo utiliza para los distintos usos, entre los de mayor importancia están los de abastecimiento para uso poblacional, agrícola, pecuario, minero y en este caso concreto, el abastecimiento energético. Por lo tanto es necesario definir, su ubicación, cantidad y distribución dentro de la cuenca.

Para ello, se ha visto la necesidad de efectuar en la Cuenca del río Urdiales este estudio hidrológico

Mediante el Estudio Hidrológico podemos relacionar y evaluar sus características físicas y geomorfológicas de la cuenca ya descritas anteriormente, con la información hidrometeorológica existente de la cuenca, determinar la esorrentía y evaluar la viabilidad de la obra proyectada.

6.1 Características de la cuenca del Duero.

Esta cuenca es la más extensa de la Península Ibérica con cerca de 98.000 km², comprende el territorio de la cuenca hidrográfica del río Duero así como las aguas de transición del estuario de Oporto y las costeras atlánticas asociadas. Este territorio está compartido entre Portugal (20% de la superficie) y España (80%).

La parte española de la demarcación del Duero limita por el noroeste con la demarcación del Miño – Sil, por el norte con la del Cantábrico, al noreste y este con la del Ebro, y al sur con la del Tajo; hacia el oeste la cuenca continúa con Portugal.

En España la cuenca se extiende por las comunidades autónomas de Castilla y León, Galicia, Asturias, Cantabria, La Rioja, Castilla – La Mancha, Madrid y Extremadura.

6.1.1 Características físicas

Las principales características geológicas, climáticas, hidrográficas y biológicas configuran el marco físico y biológico de la parte española de la demarcación del Duero condicionando los recursos hídricos globales de la misma.

Desde un punto de vista geológico, en la cuenca del Duero se diferencian tres tipos de dominios:

1. Macizo Ibérico y Sistema Central, presenta las rocas más antiguas (hercínicas), son de naturaleza magmática y metamórfica, de baja permeabilidad y se localizan en la zona occidental y meridional de la parte española de la demarcación.

2. Cadenas alpinas, que en nuestra cuenca están presentes dos, la zona occidental pirenaica (Cadena Cantábrica) y la Cadena Ibérica. En ellas predominan las rocas carbonatadas, margas y evaporitas, con permeabilidades muy diferenciadas, que albergan acuíferos de gran interés.
3. Cuenca sedimentaria del Duero, que cubre la gran extensión de la cuenca hidrológica con una extensión aproximada de 55.000 km², y que se ha ido rellenando con depósitos terciarios y cuaternarios procedentes del desmantelamiento de las cadenas periféricas, y que alberga los mayores acuíferos de la demarcación.

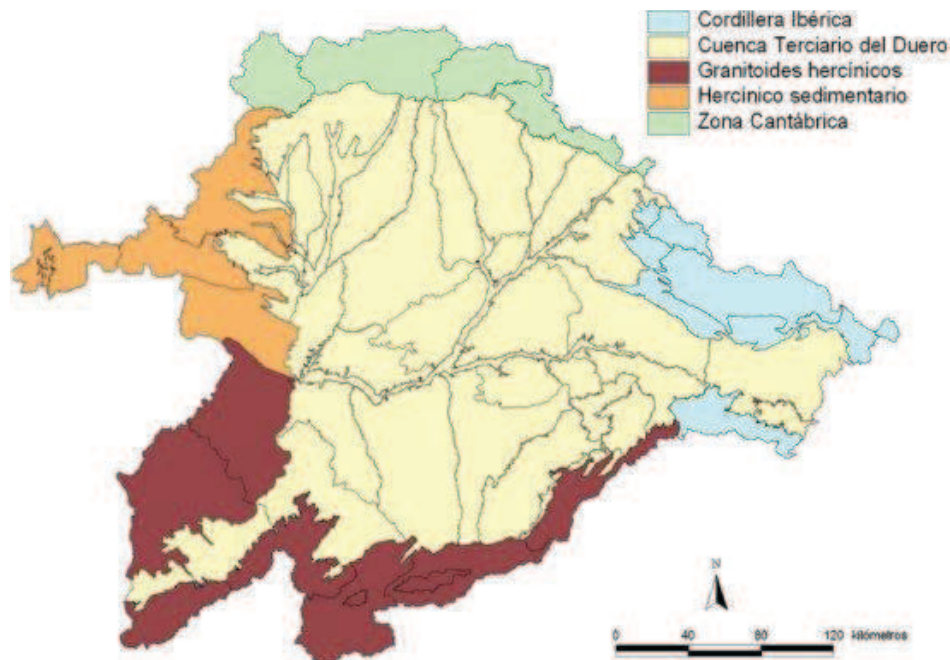


Figura 6-1 Caracterización geológica de la Cuenca del Duero

Este territorio presenta un clima predominantemente mediterráneo a pesar de que la franja norte se corresponde con un clima atlántico continentalizado a causa del aislamiento orográfico. Este rasgo implica unas condiciones de sequía estival que afecta al 90% de la superficie de la cuenca del Duero.

Las temperaturas medias presentan unos inviernos largos y fríos, especialmente en los páramos leoneses, en las montañas del norte y noreste de la cuenca, y en la sierra de Ávila. Por el contrario los veranos son cortos y suaves, en particular en la zona septentrional de la cuenca.

La distribución territorial de la precipitación anual se sitúa en 612 mm, registrándose los valores más elevados en las montañas que rodean la cuenca, encontrándose valores por encima de 1.500 mm en la montaña de León.

En los Sistema Central e Ibérico las precipitaciones son menores, no sobrepasando normalmente los 1.000 mm anuales. Los valores más bajos, dentro de la isoyeta de los 400 mm, se dan en el bajo Duero, entre Salamanca, Zamora y Valladolid.

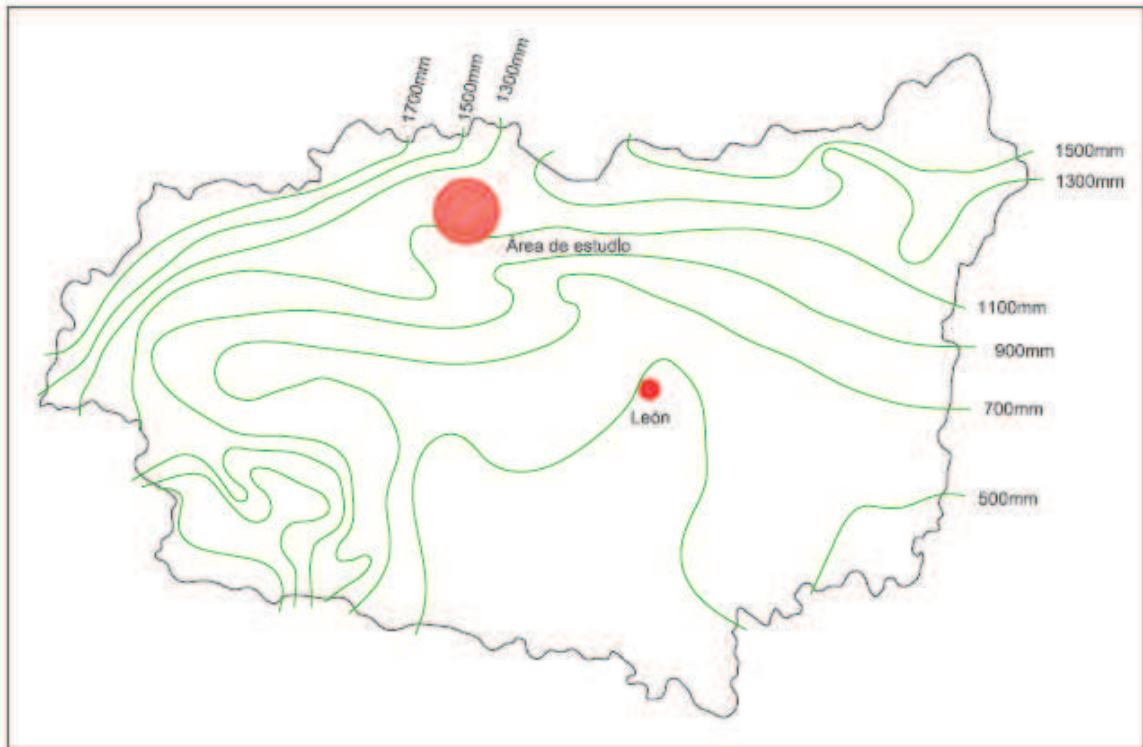


Figura 6-2 Mapa de isoyetas correspondiente a la provincia de León, elaborado a partir de la información disponible en el ministerio de agricultura pesca y medio ambiente.

6.1.2 Características hidrológicas generales

La mayor parte de los ríos de la cuenca tienen su origen en las sierras que la bordean y bajan al eje principal del Duero, que divide la cuenca. Se diferencia así una margen derecha o septentrional dividida a su vez en la red del Pisuerga y la del Esla que se despliega en abanico

Con relación a las masas de agua subterránea de la cuenca del Duero puede decirse que todo el ámbito territorial han sido identificadas en dos horizontes; uno superior que alberga 63 masas de agua y otro inferior con una sola masa, que corresponde con el acuífero detrítico de la región central del Duero que subyace bajo los páramos carbonatados.

6.1.3 Características biológicas

Los dos factores señalados, clima y orografía condicionan la diferenciación de los pisos bioclimáticos de la cuenca del Duero:

La región eurosiberiana, con una temperatura media entre 6° y 10° C, mínimas inferiores a 0°, máximas entre 3° y 8° Se extiende por toda la zona montañosa cantábrica y leonesa. Altitudes entre 500 y 1.600 m.

Región mediterránea, diferenciando la zona Crioromediterránea y la zona Supramediterránea, con temperaturas más suaves, que corresponden con la región central del Duero

La región eurosiberiana se reconoce en el ámbito de las cadenas montañosas del norte de la cuenca, el resto se encuentra dentro de la región mediterránea, El rio Urdiales, y por lo tanto nuestra zona de estudio, corresponde a estas características climatológicas ya que se encuentra en la montaña, al Noroeste de León, yo como se muestra en la figura XX el mapa de isoyetas podemos ver que nos encontramos en un área con unas precipitaciones medias anuales muy elevadas, comprendidas entre 1100 y 1300mm.

De acuerdo con los pisos bioclimáticos y la distribución biogeográfica, en esta parte de la demarcación hidrográfica del Duero, las series de vegetación que aparecen son la que se observan en el mapa de la Figura 2.7. En él cabe destacar, por su relación con el medio hídrico en el que estamos trabajando (como ya se ha dicho se trata de un clima subalpino-montero) las siguientes series de vegetación, correspondientes a las Series de los robledales montanos pirenaicos, la serie 7b) Serie montana pirenaica oriental acidófila del roble peciolado, y la serie 10). Serie montana pirenaica del roble peloso.

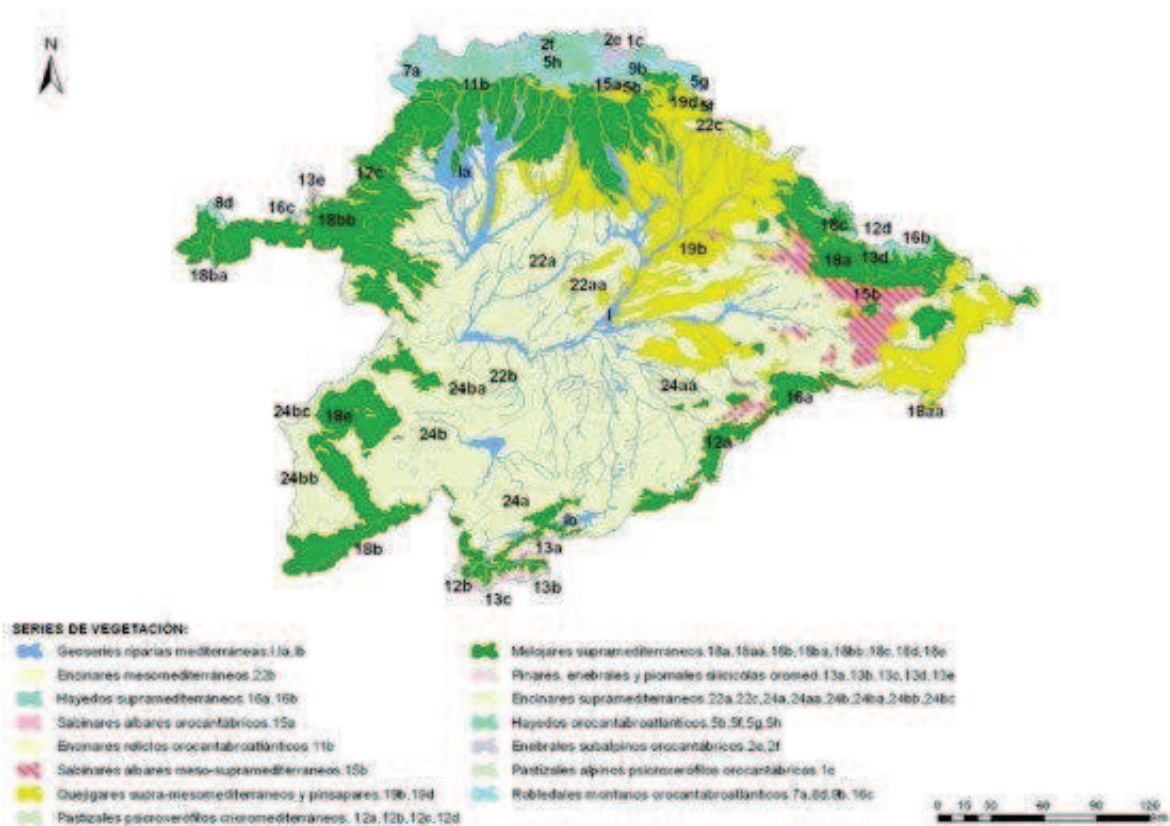


Figura 6-3 Series de vegetación presentes en la Cuenca del Duero

Estas características de las series de vegetación, las encontramos totalmente descritas y caracterizadas en la memoria del Mapa de Series de Vegetación de España, Salvador Rivas-Martínez. Debido a que no es el objeto de este estudio la vegetación de la zona, pero sí que es un factor de gran importancia solo voy a mostrar un cuadro resumen en la tabla 6.1 con los tipos de bosques dependiendo de la vegetación dominante en esta región.

Tabla 6-1 Tipos de Bosques en La cuenca del Duero.

TABLA 7
ETAPAS DE REGRESION Y BIOINDICADORES. SERIES 7b, 10.
Ce. ROBLEDALES PIRENAICOS MONTANOS

Nombre de la serie	7b. Acidófila del roble peقولado	10. Pirenaica del roble peloso
Arbol dominante	<i>Quercus petraea</i>	<i>Quercus pubescens</i>
Nombre fitosociológico	<i>Lathyrus montani-Querceto petraeae sigmetum</i>	<i>Buxo-Querceto pubescentis sigmetum</i>
I. Bosque	<i>Quercus petraea</i> <i>Lathyrus montanus</i> <i>Melampyrum pratense</i> <i>Teucrium scoradonia</i>	<i>Quercus pubescens</i> <i>Acer opalus</i> <i>Primula veris</i> subsp. <i>columnae</i> <i>Helleborus foetidus</i>
II. Matorral denso	<i>Cytisus scoparius</i> <i>Prunella hastifolia</i> <i>Deschampsia flexuosa</i> <i>Pteridium aquilinum</i>	<i>Buxus sempervirens</i> <i>Amelanchier ovalis</i> <i>Viburnum lantana</i> <i>Crataegus monogyna</i>
III. Matorral degradado	<i>Calluna vulgaris</i> <i>Genista pilosa</i> <i>Serratula tinctoria</i> <i>Potentilla erecta</i>	<i>Aphyllanthes monspeliensis</i> <i>Lavandula pyrenaica</i> <i>Thymus fontquerii</i> <i>Genista scorpius</i>
IV. Pastizales	<i>Festuca rubra</i> <i>Galium vernum</i> <i>Sieglingia decumbens</i>	<i>Avenula mirandana</i> <i>Dichanthium ischaemum</i> <i>Koeleria valesiana</i>

Dentro de las características biológicas, en este estudio solo nos limitaremos a la vegetación, ya que la fauna presenta una menor importancia a la hora de determinar las características del medio, casi limitándose únicamente a su importancia como indicadores biológicos de la calidad ambiental de los bosques, ríos y otras masas de agua, si nos detenemos en el grupo de los peces, que son los vertebrados más íntimamente ligados al Dominio Hidráulico, la cuenca del Duero es especialmente rica en especies de peces, tanto autóctonos como introducidos, entre los que destacan el Barbo, Trucha, Esturión, Perca, Lobo de Río ... etc.

6.2 Disponibilidades hidrológicas:

Como se ha dicho anteriormente, para definir la viabilidad de la central hidroeléctrica es necesario determinar las disponibilidades hidrológicas, relacionando diversos factores como son las precipitaciones con la escorrentía y el caudal final del río.

Nos encontramos en la cuenca del río Omañas, un río con una longitud aproximada de 52km, y una cuenca con una superficie de 740 km^2 , nace en el término municipal de Murias de Paredes con una aportación media de 348,4 $hm^3/año$.

El río Urdiales es uno de los principales afluentes de este, debido a que no se dispone de ninguna estación de aforo en este río que nos proporcione los datos necesarios de caudal, etc., será necesario realizar el cálculo teórico de su caudal a partir de diversos datos, como son las precipitaciones, la superficie de la cuenca... etc.

6.2.1 Subcuenca del Rio Urdiales

En primer lugar definiremos los límites de la subcuenca (división de la cuenca principal en cuencas más pequeñas, pertenecientes a sus afluentes principales) del río Urdiales, hasta el punto donde deseamos obtener el caudal. El resultado es una subcuenca con una superficie de $7,5 \text{ km}^2$, con unas pendientes muy pronunciadas y cuyas cotas más altas alcanzan los 2000 m de altitud.

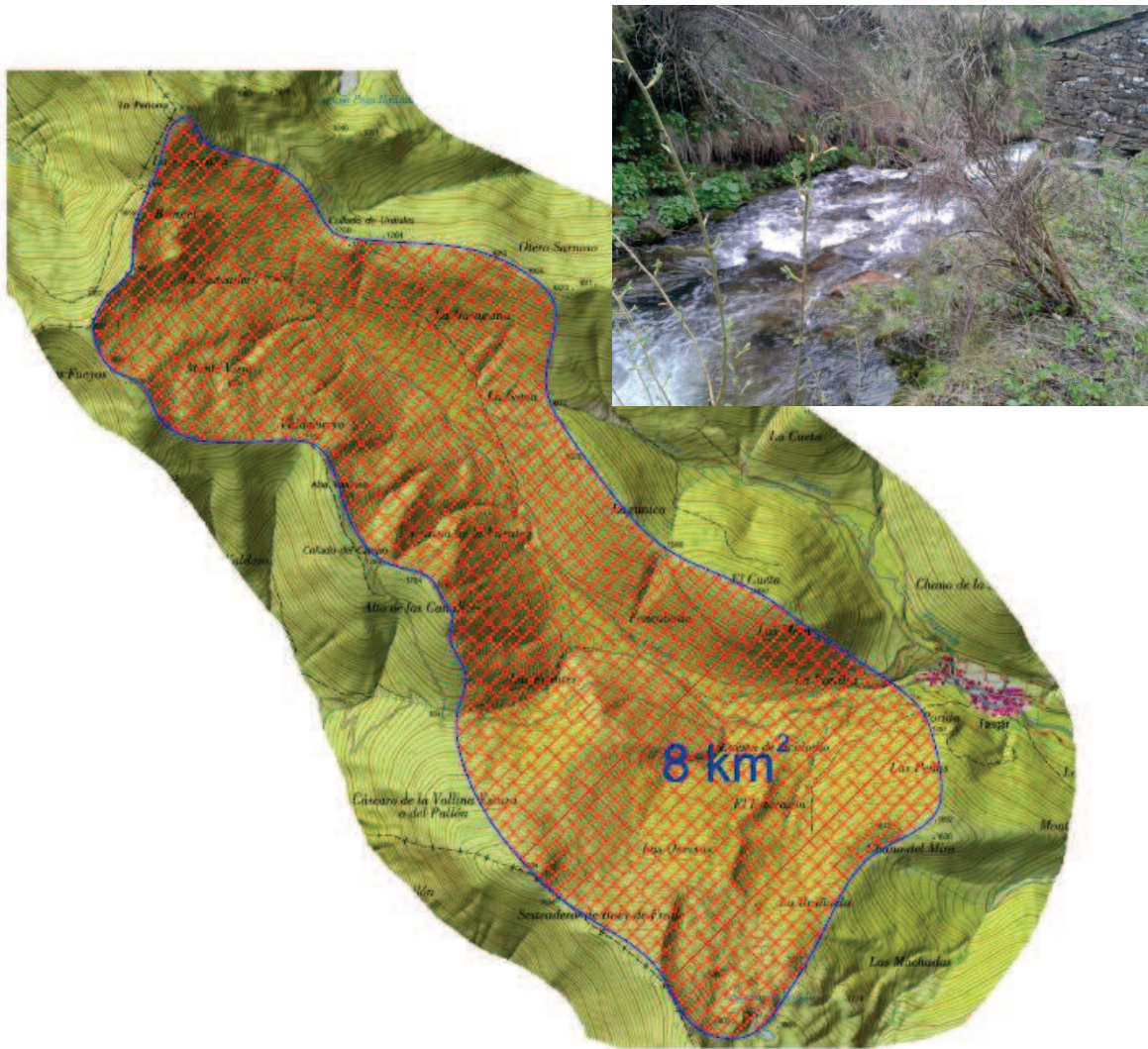


Figura 6-4 Cuenca del Rio Urdiales utilizada para el cálculo del caudal a su paso por la localidad de Fasgar.

6.2.2 Precipitaciones

Para calcular la hidrología del río realizaremos el cálculo a partir de la precipitación mensual media. Pese a disponer en el municipio de una estación pluviométrica que nos proporcionaría estos datos con la exactitud deseada, no se han podido considerar en este estudio debido a que la obtención de estos datos demoraba el mismo demasiado. Por lo tanto se ha optado por otra opción para realizar los cálculos necesarios ya que el error que se puede cometer respecto al método anterior no va a variar el resultado final de un modo significativo.

Para determinar las precipitaciones mensuales me he valido de los mapas de precipitaciones, disponibles en el atlas climático de la península Ibérica, que representan las precipitaciones medias mensuales para la Península Ibérica e Islas Baleares desde 1971 hasta el año 2000, esto nos permitirá realizar una estimación lo suficiente mente realista de las precipitaciones.

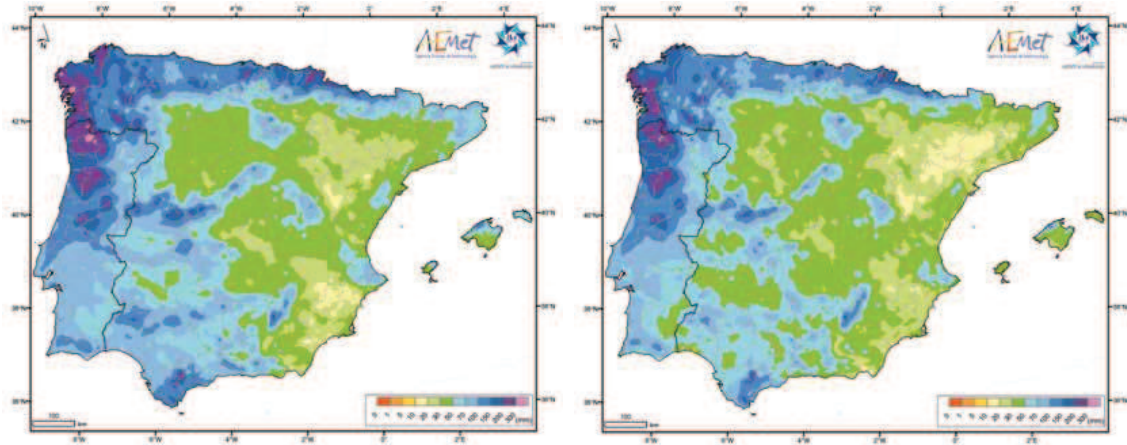


Figura 6-5 Precipitaciones meses de enero y febrero.

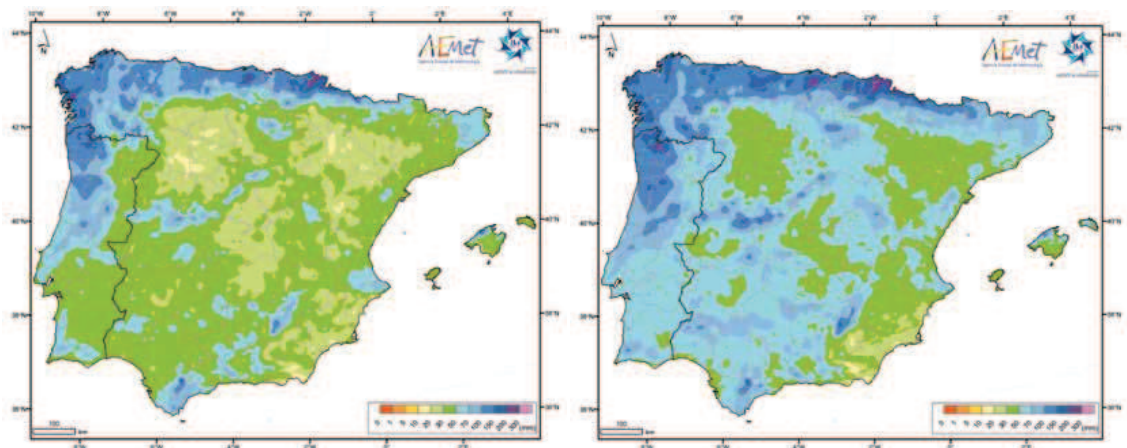


Figura 6-6 Precipitaciones meses de marzo y abril.

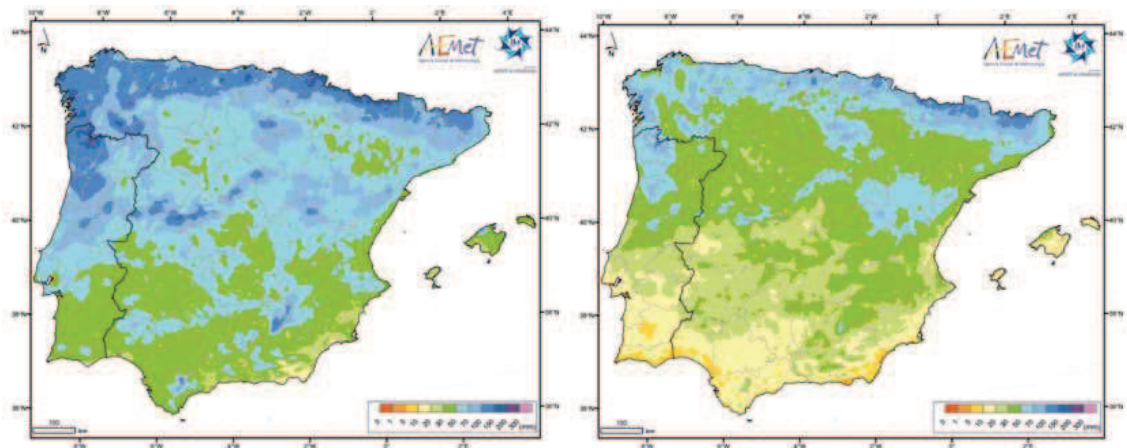


Figura 6-7 Precipitaciones meses de mayo y Junio.

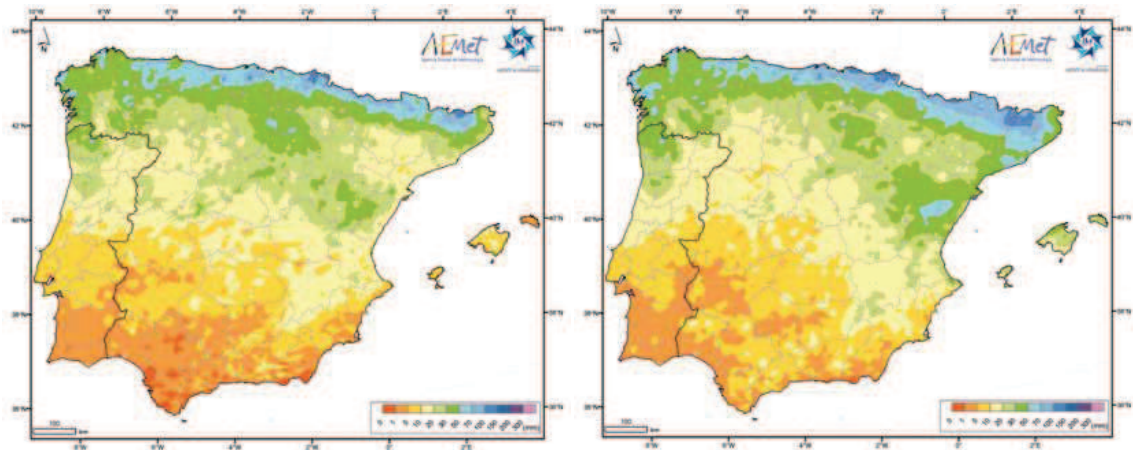


Figura 6-8 Precipitaciones meses de Julio y agosto.

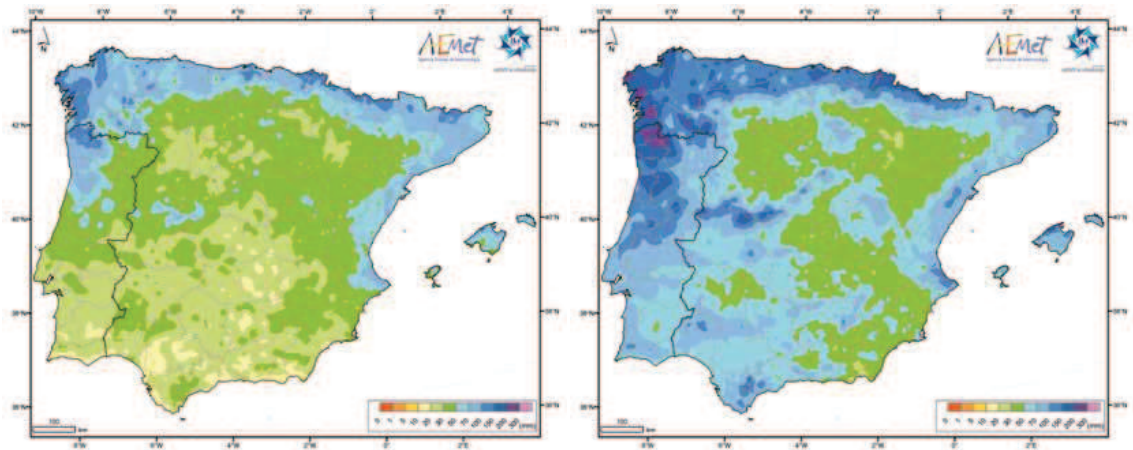


Figura 6-9 Precipitaciones meses de septiembre y octubre.

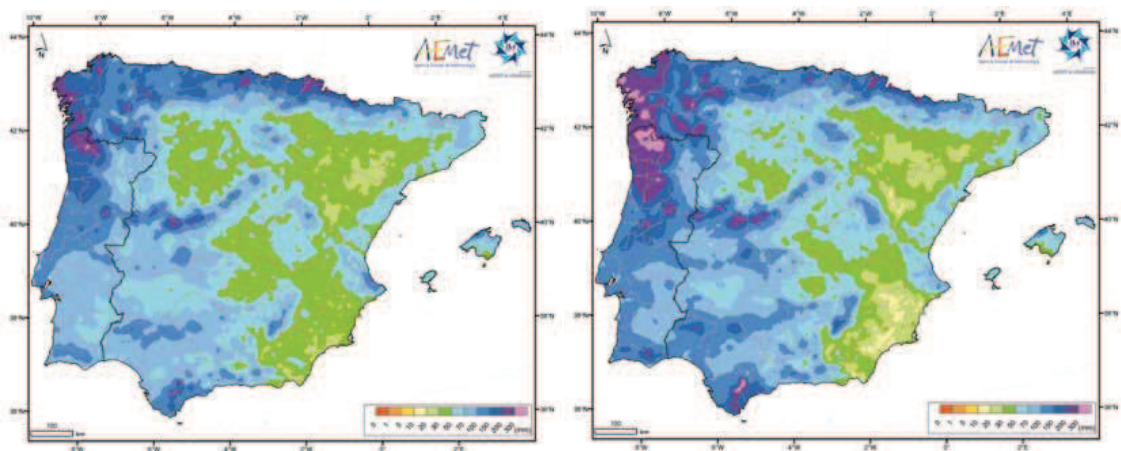


Figura 6-10 Precipitaciones meses de noviembre y diciembre.

Tabla 6-2 Precipitaciones medias de cada mes

Mes	Precipitaciones (mm)
Enero	1600
Febrero	1550
Marzo	1250
Abril	1400
Mayo	1500
Junio	950
Julio	800
Agosto	600
Septiembre	850
Octubre	1250
Noviembre	1400
Diciembre	1750

Si analizamos estos datos, obtenemos una Aportación media anual de 1242mm. Operando obtenemos el caudal medio anual a partir del cual fijaremos el Caudal Medio Ecológico.

$$1242 \frac{l}{m} = K \frac{sr \cdot I}{\text{Or} \cdot \text{GI}} \text{fizGI} \cdot L$$

Debido a las características de la propia subcuenca, se ha considerado un coeficiente de escorrentía bastante elevado, este queda definido fundamentalmente por tres parámetros, como son la pendiente, la vegetación y el tipo de material que compone el suelo. Como ya se ha dicho anteriormente se trata de una zona montañosa, con unas pendientes muy pronunciadas en la mayoría de la superficie que compone la cuenca, además de tratarse en la gran mayoría de una superficie rocosa, lo que aumenta significativamente este factor. A pesar de que la superficie está cubierta por cobertera vegetal, este factor no es tan significativo comparándolo con los dos anteriores. Por estas razones se ha considerado un factor de escorrentía del 95%, este coeficiente se aplicará directamente en la tabla de caudales del río Urdiales.

6.3 Caudal Ecológico.

Se define como caudal ecológico al caudal circulante por un cauce que es capaz de mantener el funcionamiento, composición y estructura del ecosistema fluvial que ese cauce contiene en condiciones naturales.

En la cuenca del Duero, a diferencia de otras, como puede ser la cuenca del Miño-Sil, no existen especificaciones al respecto, si bien se establecen normas para mantener unos caudales mínimos aguas abajo de determinados embalses de la cuenca. Para este

proyecto se determinó como caudal ecológico el 20% del caudal medio anual, lo que supone un caudal aproximado de 60 l/s.

6.4 Curva de caudales clasificados:

Para calcular esta curva analizamos las aportaciones medias mensuales de la tabla anterior, primero transformamos estos datos en caudales, comparamos con otros datos y finalmente calculamos la curva.

Tabla 6-3 Valores medios de las precipitaciones y su transformación a escorrentía de superficie.

Mes	Precipitaciones mensuales (mm)	Caudal río Urdiales (l/s)
Enero	1600	371,1
Febrero	1550	359,5
Marzo	1250	289,9
Abril	1400	324,7
Mayo	1500	347,9
Junio	950	220,4
Julio	800	185,6
Agosto	600	139,2
Septiembre	850	197,2
Octubre	1250	289,9
Noviembre	1400	324,7
Diciembre	1750	405,9

Para obtener un resultado más aproximado vamos a relacionar el caudal de este río con el del río principal (Río Omaña), ya que al realizar esta estimación por este método no se ha considerado el caudal que no procede de las precipitaciones, es decir, el procedente de surgencias de agua de los acuíferos. De no considerar este factor estaríamos trabajando con datos minimizados y no sería un modelo realista.

Para ello, lo primero que se ha hecho ha sido recoger los datos de las aportaciones medias mensuales obtenidas en el aforo nº 83 del río Omañas, La Granadilla, desde 1970 hasta 1990 y relacionarlo con los datos calculados mediante la fórmula de Zapata para cuencas vertientes diferentes, y que se expresa de la siguiente manera:

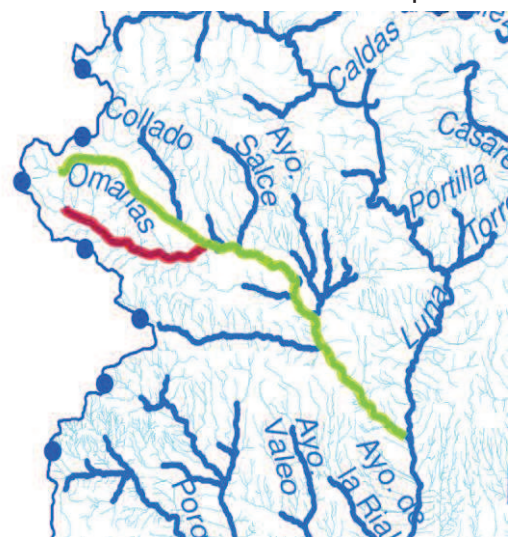


Figura 6-11 Río Omañas en verde y su afluente, el río Urdiales, en rojo

$$C = (S_0/S_e)^{0.6}$$

Siendo C, el coeficiente de relación.

S_0 , La superficie de la subcuenca.

S_e , La superficie de la cuenca.

Tabla 6-4 Aforos del Río Omañas desde 1970 hasta 1990

Mes Año	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Media Anual
1970-71	0.9	1.4	4.8	10.3	10.8	9.6	23.2	21.2	10.3	6.2	2.9	1.6	8.6
1971-72	1.5	3.0	6.9	7.4	19.3	14.0	16.6	11.9	7.9	2.3	1.3	1.2	7.8
1972-73	3.8	6.0	9.0	8.0	11.8	10.9	9.0	19.2	6.2	2.5	1.3	1.3	7.4
1973-74	3.4	2.5	2.7	17.6	17.3	16.7	11.9	7.1	4.9	4.5	1.6	1.2	7.6
1974-75	1.3	5.1	3.7	7.4	10.0	13.6	7.7	4.7	3.1	2.1	0.2	1.3	5.0
1975-76	4.4	7.0	6.6	3.5	7.6	9.5	9.1	4.6	1.9	1.7	0.5	1.5	4.8
1976-77	3.7	11.5	20.1	14.3	38.0	15.5	9.5	5.9	9.2	2.8	1.7	1.6	11.2
1977-78	3.0	2.5	24.9	15.8	41.7	23.9	10.0	13.3	6.0	3.2	1.1	0.9	12.2
1978-79	1.3	2.7	40.0	35.1	51.0	25.2	34.1	12.3	9.5	3.3	1.8	1.2	18.1
1979-80	2.8	7.7	8.1	20.9	18.2	14.1	16.2	13.0	4.9	2.6	1.3	0.9	9.2
1980-81	0.6	1.4	2.6	2.8	5.5	9.9	10.0	5.4	3.3	2.7	2.7	2.9	4.2
1981-82	4.9	3.3	18.4	28.9	12.7	11.9	7.4	5.3	5.4	5.3	4.7	4.8	9.4
1982-83	6.9	16.0	26.5	11.1	16.4	13.2	19.3	28.7	9.6	6.2	3.9	0.8	13.2
1983-84	1.6	7.6	11.4	10.9	10.0	13.6	18.9	7.1	6.2	2.3	0.7	0.6	7.6
1984-85	4.9	22.1	15.1	12.8	39.0	13.0	16.0	8.3	9.6	2.9	0.8	0.9	12.1
1985-86	1.1	1.9	4.0	8.4	14.4	19.2	8.4	8.0	3.3	0.9	0.0	1.3	5.9
1986-87	1.6	2.5	2.6	4.4	8.5	8.2	10.2	4.3	3.3	2.3	0.8	1.5	4.2
1987-88	13.7	10.7	23.6	21.6	24.2	8.6	13.2	16.2	12.5	8.5	4.7	4.7	13.5
1988-89	5.2	5.2	5.0	5.0	5.6	12.1	12.9	9.1	7.5	4.5	2.9	1.7	6.4
1989-90	2.4	7.7	41.0	11.4	10.3	5.8	5.4	4.6	3.8	2.6	1.7	2.2	8.2
Media	14.2	19.4	13.9	13.9	11.2	6.7	3.5	1.7	1.5	3.6	6.7	14.5	

Para aplicar la fórmula anterior es necesario conocer el valor de la cuenca del río Omañas, El valor de esta es de 516 km^2 , pero no utilizaremos este valor ya que este caudal no corresponde al de toda la cuenca. El valor que debemos utilizar es 402 km^2 , el valor para esta estación de aforo viene calculado en el anuario de estaciones de aforo.

$$C = (S_0/S_e)^{0.6}; \quad C = (8/402)^{0.6} \quad C = 0.095$$

Tabla 6-5 Caudal del Río Urdiales calculado y su corrección para obtener los valores reales.

Mes	Caudal río Urdiales l/s	Caudal río Omañas l/s	Caudal calculado l/s	Caudal final l/s
Enero	371,1	14200	1349,0	860.3
Febrero	359,5	19400	1843,0	1101.3
Marzo	289,9	13900	1320,5	805.2
Abril	324,7	13900	1320,5	822.6
Mayo	347,9	11200	1064	705.95
Junio	220,4	6700	636,5	428.5
Julio	185,6	3500	332,5	259.1
Agosto	139,2	1700	161,5	150.4
Septiembre	197,2	1500	142,5	169.9
Octubre	289,9	3600	342	316.0
Noviembre	324,7	6700	636,5	480.6
Diciembre	405,9	14500	1377,5	891.7

Con los valores finales corregidos del caudal del río Urdiales, representamos la curva de caudales clasificados que proporcionará los datos necesarios en el proyecto de instalación de la central hidroeléctrica para determinar la capacidad y la potencia a instalar.

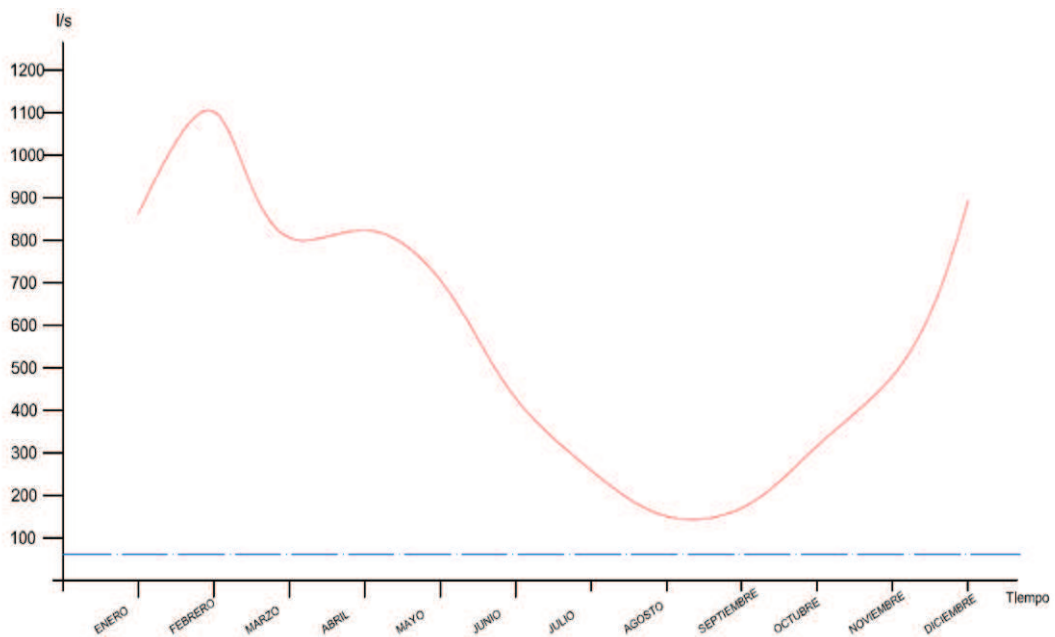


Figura 6-12 Curva de caudales del río Urdiales para cada mes.

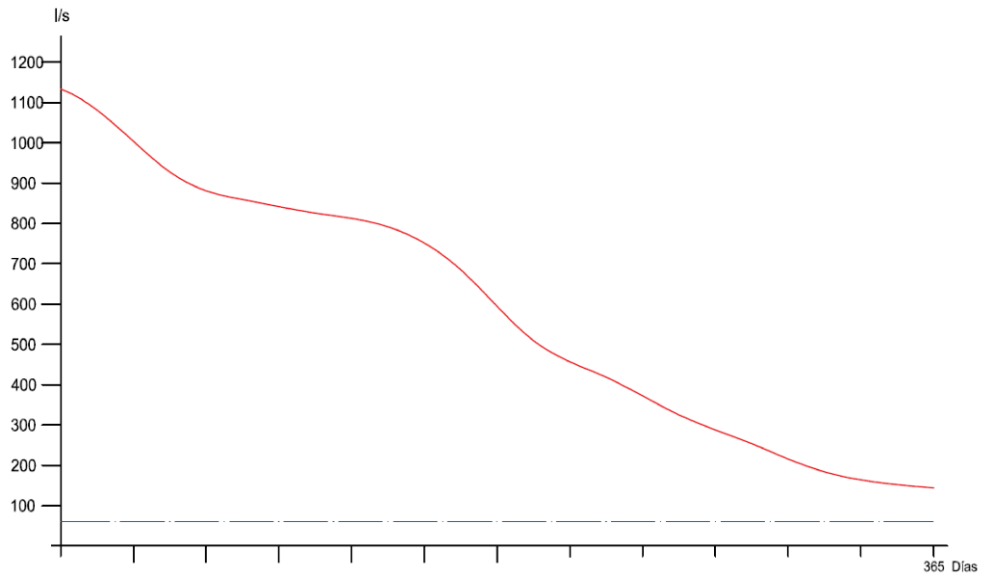


Figura 6-13 Curva de caudales del Río Urdiales a lo largo del año

6.5 Peculiaridades Hidrológicas.

Existe una diferencia fundamental y muy llamativa entre esta minicentral hidroeléctrica y otras similares, y que ha sido la que ha dado lugar a este estudio.

Habitualmente las centrales recogen el caudal necesario para su funcionamiento directamente del cauce del río sin la necesidad de grandes infraestructuras y aprovechando los desniveles propios del terreno. Como no podía ser de otro modo, la central de Fasgar aprovecha el desnivel de la superficie para obtener la energía necesaria, pero la diferencia radica en que el caudal del río se infiltra en el terreno aproximadamente a 800 metros de la central, y surge de manera natural en el monte al sur del pueblo, a pocos metros de la central.

A lo largo del estudio se determinará la relación entre esta surgencia, el río Urdiales, y la estructura geológica que da lugar a este fenómeno. A continuación se muestran diversas fotografías de interés hidrológico.



Figura 6-14 Toma de agua en el río de forma natural



Figura 6-15 Punto en el que se tomará el agua para alimentar la central (en este momento el caudal es mínimo porque está bloqueado el paso del agua)



Figura 6-16 Aspecto del rio Urdiales a la entrada de Fasgar los días que se realizaron las actividades de campo

7 Resumen de conclusiones:

Geológicamente se ha llegado a la conclusión de que el agua procedente del río Urdiales se infiltra por una fractura atravesando las rocas superficiales, hasta llegar a unas capas, ya descritas, de microconglomerados y areniscas de grano grueso.

Como se dijo anteriormente nos encontramos en contacto entre el precámbrico y el cámbrico inferior, en una zona de discordancia angular, a pesar de que en las proximidades no se ha situado ninguna falla visible, ya en la geología se vio la posibilidad de una falla tardihercínica no aflorante deducible morfológicamente por la linealidad del Vallegordo, siendo muy probable que existan fisuras y que el material esté dañado y debilitado debido a los procesos de tectónica.

Por lo tanto se supone que el agua circula a lo largo de estos estratos porosos y permeables desde el río, por debajo de los derrubios de laderas y de los depósitos aluviales hasta el monte en el que sale el agua, donde, debido a algún tipo de fractura o arrosamiento en los estratos se produzca una discontinuidad en los mismos provocando que el agua atraviese estos y comienza a fluir.

Una vez ha salido el agua de este estrato discurre subterráneamente a lo largo de la ladera entre los propios derrubios, creando así la surgencia de agua que alimentará la central hidroeléctrica.

Se ha descartado la posibilidad de que exista una estructura del tipo Karst (situación en la que el agua a disuelto parte de la roca creando así una "galería natural"), ya que no se aprecia nada en los radargramas y tampoco se han reconocido en la zona este tipo de fenómenos.

Hidrológicamente se ha deducido la curva de caudales a lo largo del año para este río, no siendo objeto de este estudio el dimensionamiento de la central, este dato se le proporcionará al técnico destinado a tal fin.

8 Bibliografía.

- Principios y fundamentos de la hidrología superficial, Agustín Felipe Breñal Puyol y Marco Antonio Jacobo Villa.
- Prospección Geofísica de alta resolución mediante Georradar, aplicación a obras civiles. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
- Prospección Geofísica aplicada a la Hidrogeología: Metodologías y técnicas emergentes, Albert Casas.
- Propagación de ondas electromagnéticas. Jordi Bonastre Muñoz Universidad Oberta de Catalunya.
- GEOFÍSICA APLICADA EN LOS PROYECTOS BÁSICOS DE INGENIERÍA CIVIL, Alfonso Alvarez Manilla Aceves. Publicación Técnica No. 229.

<http://www.wikiwater.fr/e9-los-metodos-tradicionales-y.html>

http://abe.ufl.edu/carpaena/files/pdf/zona_no_saturada/progresos_en_la_investigacion_v3/p265-276.pdf

<http://www.cfia.or.cr/descargas/infiltracion.pdf>

<http://ing.unne.edu.ar/pub/infi.pdf>

<http://www.igme.es/internet/actividadesIGME/lineas/HidroyCA/proyectos.htm>

<http://www.clubdelaguasubterranea.org/publ.htm>

http://www.magrama.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/descargas_agua.aspx

<http://www.chduero.es/>

<http://www.gc.usb.ve/geocoordweb/tesis/pre/Richard%20Perez.pdf>

<http://maxwell.ugr.es/ProyectoRaf/final2-babel-spanish.pdf>

<http://maxwell.ugr.es/ProyectoRaf/final2-babel-spanish.pdf>

http://www.trxconsulting.com/downloads/TRX_%20Metodo%20GPR%20Ground%20Penetrating%20Radar.pdf

<https://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/Rev18-5.pdf>

http://www.demecanica.com/contribuciones/Georadar_Tomologia.pdf

http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/19040/1/Lucentum_29_01.pdf

http://www.conred.gob.gt/www/documentos/secretaria-ejecutiva/hundimiento_ciudad_nueva/VOLANTE%20MEDICIONES%20DE%20GEORADAR.pdf

<http://revistas.ucm.es/index.php/FITE/article/viewFile/FITE9595110193A/12311>

<http://www.cartesia.org/geodoc/topcart2004/conferencias/23.pdf>

<http://www.ssplan.buenosaires.gov.ar/index.php/proyectos/mapeo-del-subsuelo>

<http://www.ingeodav.fcen.uba.ar/Curso/prospeccion%20geofisica/georadar/teoricas/teorica6%20%20%20-%20Georadar.pdf>

http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12248/Tesina_Master_Mtavera.pdf?sequence=1

<http://www.pnuma.org/agua-miaac/CODIA%20HIDROGEOLOGIA/MATERIAL%20ADICIONAL/PONENCIAS%20HIDROGEOLOGIA/PONENTES/TEMA%206%20Geofisica/GPR.pdf>

<http://jsvsl.wikispaces.com/file/view/TEMA+2+Geofisica+aplicada+a+la+Hidrogeolog%C3%ADa.pdf>

<http://www.wtech.es/es/actividades/agua/hidrogeologia>

<http://www.georadar-info.com/es/la-aplicacion-del-georadar-gpr-radar-de-penetracion-terrestre-durante-la-prospeccion-y-definicion>

<http://www.geonics.com/pdfs/casestudies/a31solidwaste.pdf>

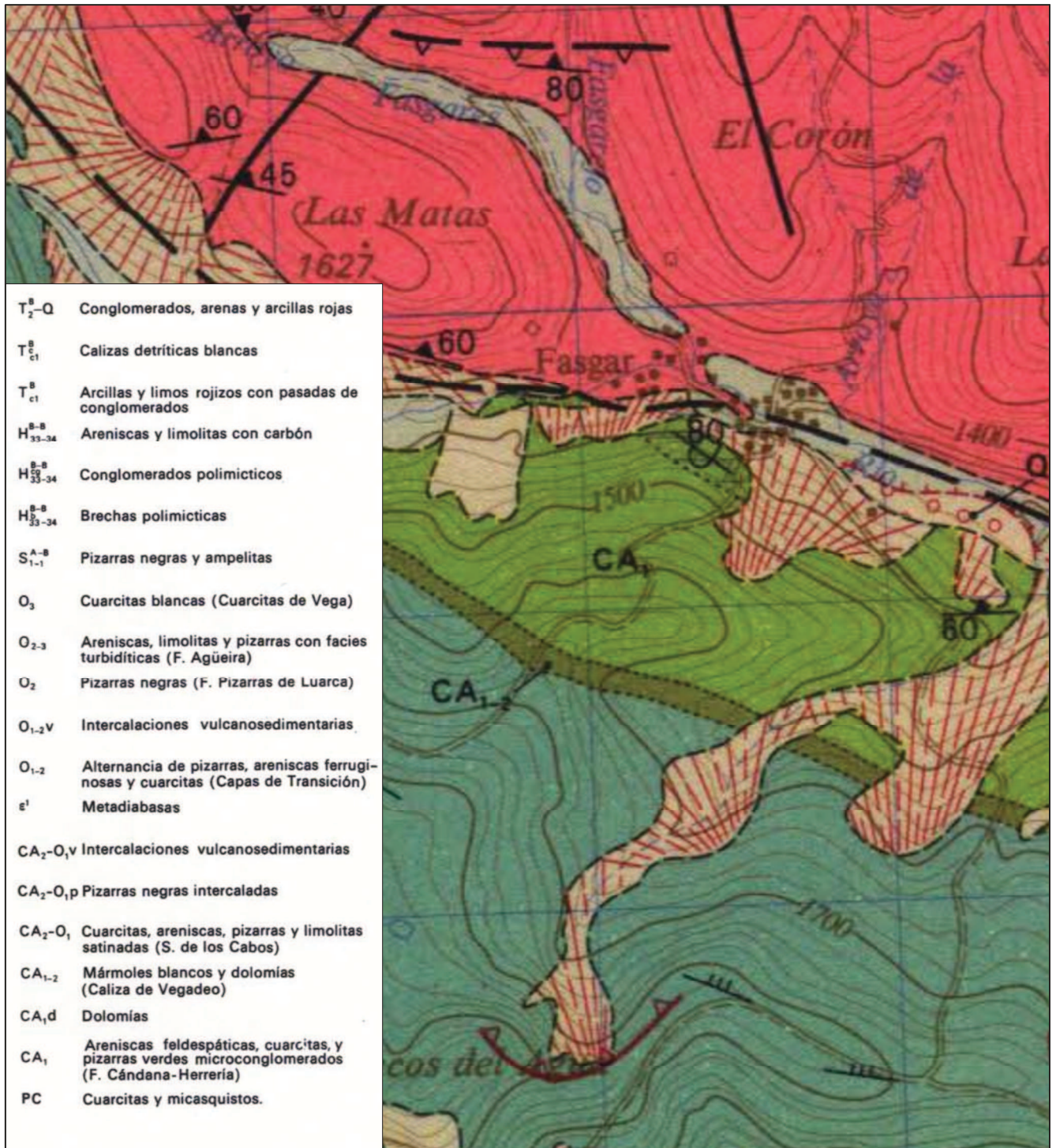
<http://www.geonics.com/pdfs/casestudies/a47usgseverglades.pdf>

http://www.ana.gob.pe/media/296656/estudio_hidrologico_mala.pdf

http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/2008%5CDOF_22-09-08.pdf

http://www.ana.gob.pe/media/296693/estudio_hidrologico_pisco.pdf

<http://hercules.cedex.es/AnuarioAforos/afo/estaf-datos.asp?indroea=2083>



- T₂^{a-Q} Conglomerados, arenas y arcillas rojas
- T_{c1}^e Calizas detríticas blancas
- T_{c1}^b Arcillas y limos rojizos con pasadas de conglomerados
- H₃₃₋₃₄^{a-b} Areniscas y limolitas con carbón
- H₃₃₋₃₄^{b-a} Conglomerados polimicticos
- H₃₃₋₃₄^{b-a} Brechas polimicticas
- S₁₋₁^{a-b} Pizarras negras y ampelitas
- O₃ Cuarcitas blancas (Cuarcitas de Vega)
- O₂₋₃ Areniscas, limolitas y pizarras con facies turbidíticas (F. Agüeira)
- O₂ Pizarras negras (F. Pizarras de Luarca)
- O_{1-2v} Intercalaciones vulcanosedimentarias
- O₁₋₂ Alternancia de pizarras, areniscas ferruginosas y cuarcitas (Capas de Transición)
- e¹ Metadiabasas
- CA_{2-O,v} Intercalaciones vulcanosedimentarias
- CA_{2-O,p} Pizarras negras intercaladas
- CA_{2-O} Cuarcitas, areniscas, pizarras y limolitas satinadas (S. de los Cabos)
- CA₁₋₂ Mármoles blancos y dolomías (Caliza de Vegadeo)
- CA_{1,d} Dolomías
- CA₁ Areniscas feldespáticas, cuarcitas, y pizarras verdes microconglomerados (F. Cándana-Herrería)
- PC Cuarcitas y micasquistos.



UNIVERSIDAD DE LEÓN
ESCUELA SUPERIOR Y TÉCNICA DE INGENIEROS DE MINAS



GRADO EN INGENIERÍA MINERA

PROYECTO DE: ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO PARA LA CENTRAL HIDROELECTRICA DE FASGAR

PLANO DE GEOLOGÍA

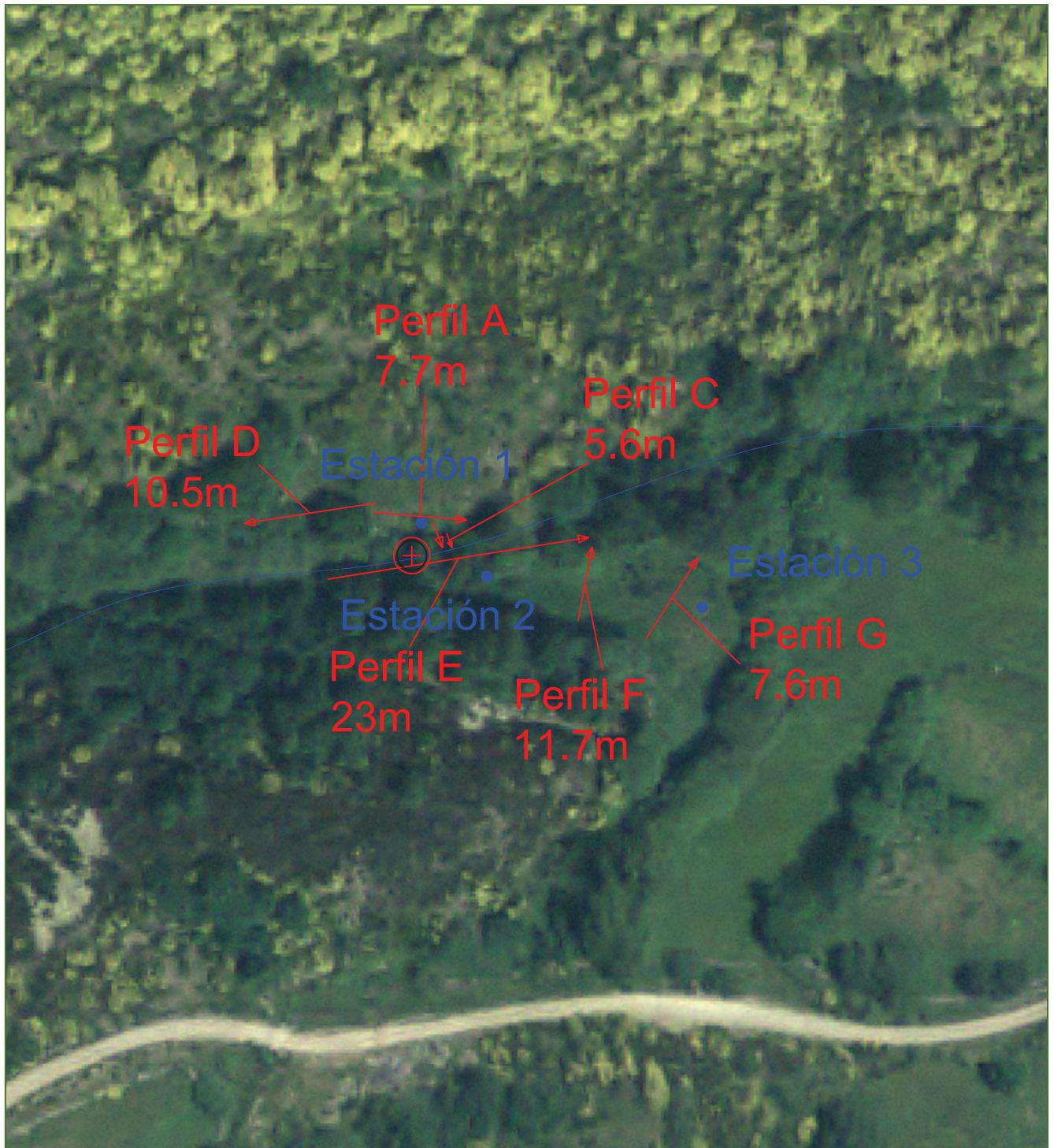
ESCALA 1 : 20000

PLANO Nº

FECHA JUNIO 2014

Fdo.:.....Carlos Pérez Santos.....

1



		UNIVERSIDAD DE LEÓN ESCUELA SUPERIOR Y TÉCNICA DE INGENIEROS DE MINAS			
GRADO EN INGENIERÍA MINERA					
PROYECTO DE: ESTUDIO HIDROGEOLOGICO PARA LA CENTRAL HIDROELECTRICA DE FASGAR					
PLANO DE	PERFILES REALIZADOS CON GEORRADAR I				
ESCALA	1 : 1000				PLANO Nº
FECHA	JUNIO 2014	Fdo.:.....Carlos Pérez Santos.....			2



		UNIVERSIDAD DE LEÓN ESCUELA SUPERIOR Y TÉCNICA DE INGENIEROS DE MINAS				
GRADO EN INGENIERÍA MINERA						
PROYECTO DE: ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO PARA LA CENTRAL HIDROELECTRICA DE FASGAR						
PLANO DE	PERFILES REALIZADOS CON GEORRADAR II					
ESCALA	1 : 1000	Fdo.:.....Carlos Pérez Santos.....			PLANO Nº	
FECHA	JUNIO 2014				3	