



## Memoria de prácticas 2021-2022



Estudiante: Ginés González Guirado

Entidad: Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales.  
(Cehegín)

Tutor de la empresa: Antonio Espín de Gea

Tutor académico: María Claudia Montiel Morte

Universidad de Murcia

Grado en Física

## Resumen

Durante mi estancia de prácticas en el Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales (CTM), he trabajado con todas las técnicas geofísicas que utilizan para la auscultación del subsuelo y otras estructuras como pueden ser paredes de edificios entre otras. En concreto, he participado en la aplicación de los métodos sísmicos: Sísmica de refracción y MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves). Otras técnicas que he utilizado han sido el GPR (Ground Penetrating Radar), técnica electromagnética muy utilizada, y la tomografía eléctrica de alta resolución en 2D y 3D.

Mediante los métodos sísmicos realizamos la toma de datos en la escombrera de una cantera de Roca Ornamental y analicé los mismos con el fin de determinar la estabilidad de dicha escombrera. El estudio concluyó con que la escombrera es estable y permite seguir con las tareas extractivas.

A través de GPR analicé los datos tomados en una cantera para determinar la localización de fracturas y la estratificación de los distintos materiales, así como de las pequeñas cavidades que pudieran haber en ese yacimiento. También analicé parte de los datos que se han tomado en el marco del proyecto ISGEOMIN y he participado en la redacción de un artículo que se está elaborando dentro del mismo, en la explicación de la base física de la técnica de GPR.

Mediante Tomografía eléctrica tomé los datos de campo y analicé dichos datos para determinar la composición del subsuelo en un yacimiento, en función de la resistividad, con el objetivo de determinar la zona en la que se debe excavar, la profundidad a la que se encuentra el yacimiento y como se distribuyen sus diferentes elementos. También analicé las medidas tomadas en una cantera con el objetivo de determinar la distribución de la resistividad para los distintos materiales. El resultado que se obtiene con esta técnica es una imagen donde se muestra la distribución de los materiales, lo que permite planificar las tareas de extracción del granito.

Por último, trabajé con un SEM, en concreto ayudé en el alineamiento del haz de electrones, ajusté los parámetros necesarios para obtener una buena resolución, en función de la muestra que se desee analizar, y analicé muestras con el SEM.

# Índice

1. Introducción-Objetivos.....	4
1.1. Búsqueda de las prácticas. ....	4
1.2. Información sobre la empresa. ....	4
1.3. Infraestructura del lugar de trabajo. ....	4
1.4. Contexto del trabajo de las prácticas realizadas. ....	5
1.5. Objetivos del estudiante al incorporarse a la práctica de empresa.....	6
2. Desarrollo de las prácticas.....	6
2.1. Descripción del plan de prácticas. ....	6
2.2. Formación recibida. ....	7
2.3. Métodos empleados para el acceso a la información.....	10
2.4. Aspectos relativos a las relaciones con el personal de la empresa. ....	10
3. Trabajo realizado y resultados.....	10
3.1. Métodos sísmicos.....	10
3.2. GPR (Ground Penetrating Radar). ....	17
3.3. Tomografía eléctrica. ....	20
3.4. SEM. ....	23
4. Conclusiones-Valoración. ....	26
4.1. Conclusión sobre el trabajo realizado y sus resultados.....	26
4.2. Valoración personal de las habilidades adquiridas. ....	27
4.3. Valoración de las tareas desarrolladas con los conocimientos y competencias adquiridos en relación con los estudios universitarios.....	27
4.4. Valoración de la adecuación de la empresa. ....	28
4.5. Valoración del grado de innovación u oportunidad de la estrategia de empresa y de las actividades en las que se ha trabajado. ....	28
4.6. Valoración global de las prácticas. ....	28
5. Bibliografía.....	29

# **1. Introducción-Objetivos.**

## **1.1. Búsqueda de las prácticas.**

La búsqueda de la empresa en la cual realizar mi proceso formativo de prácticas, se ha basado en la consulta del listado de empresas que aceptaron alumnos en años anteriores y, además, consulté en internet empresas relacionadas con la tecnología y la física que estuvieran próximas a mi residencia. Entonces, me puse en contacto las que resultaron de mayor interés.

Por último, tras hablar con las diferentes entidades, por conveniencia en cuanto al horario acordado, la cercanía y los conocimientos a adquirir, me decanté por realizar las prácticas en el Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales, a partir de ahora se denota por las siglas CTM.

## **1.2. Información sobre la empresa.**

A continuación, desglosaré la información sobre la empresa:

- Nombre: Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales.
- Ubicación: Cehegín
- Sector de actividad: Centro Tecnológico especializado en mármol y piedra natural.
- Organigrama: Director, Departamento de Gestión de Proyectos de I+D+i, Laboratorio de ensayos, Departamento de Geología minera, Responsable de Tecnologías de la Información, Departamento de Administración, Departamento de Salud Laboral y Departamento de Construcción sostenible y Patrimonio arquitectónico.
- Número de empleados: 23
- Posición que ocupa en el mercado: Centro de Investigación Nacional e Internacional.

## **1.3. Infraestructura del lugar de trabajo.**

En mi período de prácticas, he contado con un puesto de oficina, mesa amplia con enchufes cercanos y cable de ethernet, además se me ha proporcionado un ordenador portátil en el que poder trabajar con los programas necesarios. Luego, he contado con material de laboratorio como Microscopio Electrónico de Barrido, a continuación, lo

denotará por sus siglas en inglés SEM. También he contado con el correspondiente material para tomar las mediciones necesarias al realizar cada uno de los métodos anteriormente expuestos. Estos materiales se especifican en la explicación de cada método.

#### **1.4. Contexto del trabajo de las prácticas realizadas.**

Los trabajos que se realizan en el CTM son proyectos de I+D tanto regionales como nacionales, así como mediciones y pruebas solicitadas por empresas privadas del sector de la piedra natural principalmente. Durante las prácticas, he trabajado con todas las técnicas geofísicas llevadas a cabo por el CTM que permiten la auscultación del subsuelo. Mediante el estudio del mismo, entre otros, podemos conocer los materiales que forman el terreno para su extracción en canteras, saber la probabilidad de derrumbe de una cierta zona, ya sea por terremotos, construcción sobre ese terreno o trabajo con maquinaria pesada cerca. Por ejemplo, uno de los trabajos que realizamos fue el estudio del subsuelo en parte de una cantera próxima a un barranco para ver cómo son los materiales que la conforman y obtener, así, una probabilidad de derrumbe, mediante la aplicación de métodos sísmicos, en concreto dos técnicas, la sísmica de refracción y MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) con los que se obtienen mediciones de las ondas internas (Ondas-P y Ondas-S) y superficiales (Ondas de Rayleigh y Ondas Love). Otra técnica aplicada en el estudio del subsuelo ha sido el GPR (Ground Penetrating Radar) o georradar, con el que podemos localizar objetos como tuberías entre otros e incluso cavidades, bajo tierra de interés a la hora de realizar obras, etc. Otra técnica que puede ser de interés pues resulta complementaria a los resultados de las técnicas anteriores, es la tomografía eléctrica de alta resolución en 2D y 3D. Todas estas técnicas, se pueden combinar para obtener una imagen completa del subsuelo y caracterizar los materiales del terreno adecuadamente, así como su distribución. Estas técnicas también se han aplicado para la auscultación y determinación del estado de conservación de diferentes elementos del patrimonio arquitectónico (Hospital Real de Granada, Teatro Romano de Cartagena). Con todo lo expuesto, durante las prácticas en el CTM he colaborado en los diferentes proyectos tanto en la toma de las mediciones como en el análisis de los datos obtenidos con cada una de las técnicas mencionadas anteriormente, para obtener la composición del subsuelo.

Y por último mi participación en el laboratorio, se ha centrado en la alineación y ajuste de los parámetros para obtener una buena resolución de imagen en un SEM y el análisis de muestras con el mismo.

### **1.5. Objetivos del estudiante al incorporarse a la práctica de empresa.**

Mis objetivos durante la estancia de prácticas en la empresa son tanto aprender todas las técnicas geofísicas que se utilizan como realizar el análisis de los datos obtenidos para la caracterización del subsuelo y estructuras, así como aprender el funcionamiento de un SEM y el análisis de muestras.

## **2. Desarrollo de las prácticas.**

### **2.1. Descripción del plan de prácticas.**

En el período de prácticas, he realizado las siguientes tareas y en el siguiente orden:

- Primero, estudié los métodos sísmicos. La duración de esta tarea han sido 2 semanas, en las que he tomado datos de campo y analizado los mismos, así como los datos de mediciones que tenían hechas previamente. Esta tarea ha sido realizada dentro del departamento de geología minera.
- En segundo lugar, estudié el método de GPR o georradar. La duración de esta tarea han sido 2 semanas, en las que he revisado la bibliografía para entender el funcionamiento de la técnica GPR, además de realizar el análisis de 15 perfiles para recabar información acerca de la estratificación de la zona, las fracturas en el terreno y las diferentes cavidades que pudiera haber. Esta tarea ha sido realizada dentro del departamento de geología minera.
- En tercer lugar, estudié el método de tomografía eléctrica de alta resolución en 2D y 3D. La duración de esta tarea han sido 2 semanas y ha sido realizada dentro del departamento de geología minera.
- Por último, alineé el haz de electrones, ajusté los parámetros necesarios para obtener una buena resolución, en función de la muestra que se desee analizar, y analicé muestras con un SEM. La duración de esta tarea han sido 2 semanas, en las que he revisado la bibliografía para entender el funcionamiento del SEM, además de realizar el análisis de varias muestras. Esta tarea ha sido realizada dentro del departamento de geología minera.

## 2.2. Formación recibida.

**Métodos sísmicos.** Primero, leí y adquirí los fundamentos físicos necesarios para entender las técnicas sísmicas que se utilizan en el CTM para la auscultación del subsuelo, las cuáles son sísmica de refracción y MASW.

La refracción sísmica es un medio no destructivo de reconocimiento, permite interpretar las propiedades del terreno y la profundidad de la roca mediante el análisis de las variaciones en las velocidades de propagación de las ondas sísmicas, correspondientes a las velocidades de transmisión en un medio sólido. Se basa en el principio de que cuando una onda sísmica (onda P u onda S) incide sobre una interfase, a través de la cual hay un contraste en la velocidad, es decir, las propiedades del medio son diferentes, entonces la dirección de viaje de esa onda cambia al entrar en el nuevo medio [1]. Esto es lo que se conoce como Ley de Snell.

Los ensayos con MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) son una técnica geofísica desarrollada recientemente, que permite calcular la velocidad de propagación de las ondas sísmicas de cizalla ( $V_s$ ) a partir de la dispersión de las ondas superficiales Rayleigh.

Realizamos el trabajo de campo para obtener los datos que después analicé con el programa informático Rayfract para sísmica de refracción y con el programa SurfSeis 4 para el MASW. Con ellos se analizan las ondas sísmicas registradas en un sismógrafo para hallar las velocidades de las ondas internas P y S en cada capa y, así, caracterizar los materiales que se encuentran en el subsuelo. Permite determinar si la zona es de interés para la actividad minera, también si hay probabilidad de derrumbe entre otras caracterizaciones de interés.

**GPR (Ground Penetrating Radar).** Estudié este método, a través de una revisión bibliográfica, para comprender el fundamento físico y el análisis a aplicar a los datos obtenidos mediante esta técnica, y así detectar posibles objetos en el terreno como tuberías o cables. También podemos detectar mediante este método yacimientos arqueológicos, cuevas o estratificación de capas.

La técnica de GPR consiste en la emisión de pulsos de alta frecuencia por una antena emisora y su posterior recepción tras las reflexiones sufridas dentro del material en una antena receptora. Las reflexiones, se producen como consecuencia del contraste en las

propiedades electromagnéticas del material por el que se propagan las ondas, concretamente de la conductividad eléctrica, o su inverso, la resistividad eléctrica; la permeabilidad magnética; y la constante dieléctrica o permitividad. En esta técnica, los factores de mayor influencia son los coeficientes de reflexión de Fresnel, los cuáles dependen las impedancias de los materiales entre los que se encuentra la interfase [3]. En función de lo que se pretenda detectar, debemos utilizar una antena con una frecuencia u otra. Para detectar objetos pequeños tendremos que utilizar antenas con mayor frecuencia, es decir, con menor longitud de onda y para objetos de mayor tamaño, antenas con menor frecuencia, es decir, mayor longitud de onda. Otra cosa a tener en cuenta, es la profundidad que se pretende alcanzar, ya que las ondas con menor frecuencia tienen mayor capacidad para penetrar en el subsuelo.

Realicé el análisis de los datos obtenidos en campo para localizar las cavidades, fracturas o estratificación de capas, que podía haber en una cantera, desde la superficie y ver sus dimensiones, mediante el programa REFLEXW. El programa permite aplicar una serie de filtros para mejorar la calidad de imagen de las ondas reflejadas, eliminando el ruido, y ver con más claridad donde se reflejan con mayor energía las ondas, es decir, donde se encuentra la interfase entre materiales con propiedades electromagnéticas (conductividad, permeabilidad, entre otros) bastante distintas, que son los lugares en los cuáles, en este caso, podemos encontrar cavidades o materiales con distinta conductividad en diferentes capas.

**Tomografía eléctrica de alta resolución en 2D y 3D.** Primero, leí bibliografía para entender el fundamento físico y el proceso para llevar a cabo dicha técnica, así como para poder analizar los resultados obtenidos de forma crítica.

La tomografía eléctrica es un método de resistividad multielectródico, basado en la modelización 2D y 3D de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas (diferencias finitas). Es una técnica muy utilizada para la auscultación del subsuelo, ya que presenta bastante resolución con un porcentaje de error pequeño. Las bases teóricas del funcionamiento de la tomografía eléctrica y de los métodos de resistividad convencionales, son análogas.

Los métodos convencionales solo precisan 4 electrodos y se basan en introducir en el terreno, un campo eléctrico de corriente continua mediante dos electrodos de corriente (A,B) conectados a un miliamperímetro, mientras que con los otros dos electrodos (M,N)



que están conectados a un milivoltímetro, mediremos cual es la diferencia de potencial eléctrica  $\Delta V$  entre esos dos puntos, parámetro a partir del cual podremos calcular el valor de la resistividad en el punto medio del dispositivo y a una profundidad determinada [4]. A continuación, se muestra una figura sobre la disposición de los electrodos:

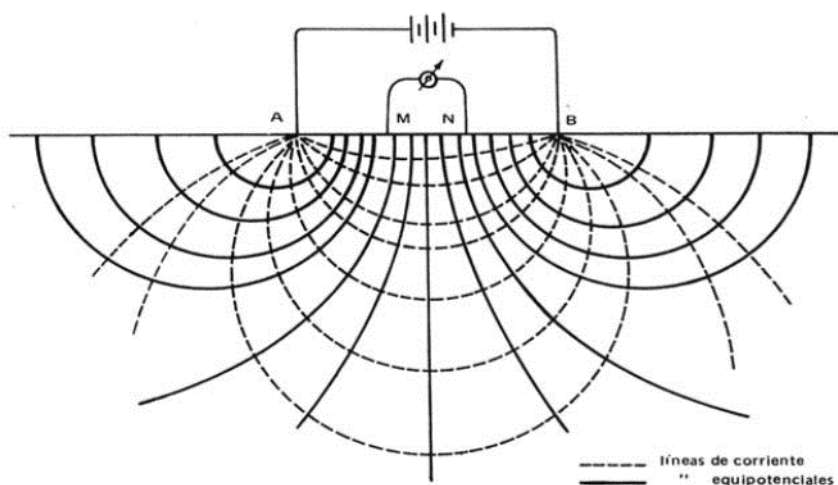


Figura 1. Esquema de los electrodos para hallar la resistividad en un medio.

La gran innovación, del método de Tomografía eléctrica con respecto a los métodos convencionales, reside en que ahora todas las medidas se realizarán de forma totalmente automatizada para todas las posibles combinaciones de electrodos que tengamos. Una vez calculadas las resistividades aparentes en campo mediante la unidad central, podemos hacer una inversión con un programa para obtener las resistividades reales a partir de las resistividades aparentes. Esto se hace mediante el programa RES2DINV/RES3DINV, dependiendo de si hacemos tomografía en 2D o 3D. Lo que se obtiene es una imagen del subsuelo con las resistividades correspondientes que se corresponderán con los distintos materiales que lo componen.

**SEM (Microscopio electrónico de barrido).** Por último, trabajé con el SEM, en concreto, alineé el haz de electrones, ajusté los parámetros necesarios para obtener una buena resolución, en función de la muestra que se desee analizar, y analicé muestras.

Para poder realizar la alineación y el ajuste de parámetros del SEM, previamente, tuve que estudiar el funcionamiento y los componentes del mismo para ser capaz de detectar errores durante la alineación y el ajuste, y conocer a que se deben éstos, así como leer el manual de instrucciones para alinear el haz y modificarlo de manera que se obtenga la mejor resolución posible al analizar la muestra.

Un microscopio electrónico de barrido está basado en una fuente de emisión de electrones y un sistema de lentes magnéticas capaz de enfocar el haz electrónico y generar con él un barrido sobre la muestra. La interacción entre electrones de la muestra y del haz genera un conjunto de señales (electrones secundarios, electrones retrodispersados, electrones *Auger*, cátodo-luminiscencia, rayos X) a partir del cual es posible construir una imagen topográfica. Las señales que se generan se recogen en diversos detectores, uno de ellos permite generar una imagen para ver la topografía de la muestra con una alta resolución y otro permite el análisis de los elementos que componen la muestra por dispersión de energías de rayos-X (XEDS).

### **2.3. Métodos empleados para el acceso a la información.**

Los métodos que he utilizado para acceder a la información necesaria han sido, principalmente, internet para la búsqueda de artículos, libros sobre cada una de las técnicas empleadas, así como sobre el funcionamiento del SEM, también se me han proporcionado los manuales para usar cada uno de los programas informáticos (Rayfract, SurfSeis 4, REFLEXW y RESD2DINV) y del SEM para su uso con alguna explicación previa tanto en los programas como en el SEM.

### **2.4. Aspectos relativos a las relaciones con el personal de la empresa.**

En cuanto a las relaciones con el personal de la empresa, todos han sido muy amables y me han ayudado en lo que han podido. Además, como se trata de un colectivo multidisciplinar he podido aprender también de materias distintas a la física y cuando alguno ha necesitado explicaciones o aclaraciones de las técnicas aplicadas que se relacionaban con la física, dentro de mis conocimientos, les he proporcionado dicha información.

## **3. Trabajo realizado y resultados.**

### **3.1. Métodos sísmicos.**

La primera tarea que realicé fue el estudio de los métodos sísmicos, sísmica de refracción y MASW, con el objetivo de determinar la estabilidad de la escombrera en Monte Coto.

La refracción sísmica permite interpretar las propiedades del terreno y la profundidad de la roca mediante el análisis de las variaciones en las velocidades de propagación de las ondas sísmicas correspondientes a las velocidades de transmisión en un medio sólido. Se

basa en el principio de que cuando una onda sísmica (onda P u onda S) incide sobre una interfase, a través de la cual hay un contraste en la velocidad, es decir, las propiedades del medio son diferentes, la dirección de viaje de esa onda cambia al entrar en el nuevo medio [1]. Esto es lo que se conoce como Ley de Snell.

El método de refracción depende de que haya un aumento en la velocidad con la profundidad. Si el medio inferior tiene una velocidad inferior a la de la que emerge la onda (es decir,  $V_2$  es menor que  $V_1$ , una inversión de velocidad), entonces la onda refractada se desviará hacia la normal. Esto da lugar a una situación conocida como capa oculta, capa que no se puede detectar mediante este método [1].

En mi caso, considero sólo las ondas P.

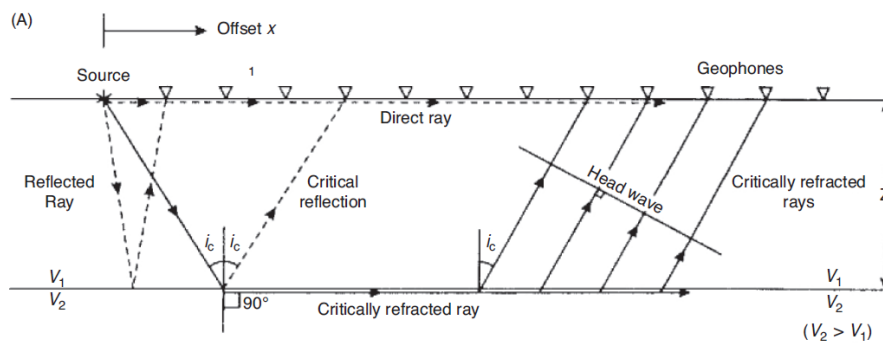


Figura 2. Representación esquemática de las ondas en un ensayo de refracción sísmica.

Los componentes básicos de un experimento de refracción sísmica se muestran esquemáticamente en la Figura 2. En el CTM se utiliza como fuente para generar las ondas P, una maza de 8 kg con la que se golpea sobre una placa de metal para no dañar el terreno. Las ondas producidas viajan de tres formas principales: directamente a lo largo de la parte superior de la superficie del suelo (onda directa); por reflexión desde la parte superior del refractor; y, lo que es más importante, por refracción crítica a lo largo de la parte superior del (de los) refractor(es) [1].

La llegada de cada onda se detecta a lo largo de un conjunto de geófonos y se registra en un sísmógrafo, y la salida de cada geófono se muestra como una única traza. Se identifica el inicio de cada llegada para cada geófono y el tiempo de viaje asociado se mide y traza en un gráfico de tiempo-distancia [1].

La metodología que aplicamos para la toma de datos se detalla a continuación. Colocamos 24 geófonos de componente vertical con una frecuencia nominal de 4,5 Hz capaces de

registrar vibraciones hasta 120 m, en línea a lo largo de la escombrera para obtener la propagación de las ondas P y S, aunque principalmente se detectan las P, debido a la componente vertical de los geófonos. Las vibraciones captadas llegan a un sismógrafo digital de 24 canales en el que se digitaliza y almacena dicha información en formato seg2 en un ordenador portátil, para su posterior análisis. Cuando ya tenemos todo el equipo a punto, entonces, necesitamos una fuente sísmica, para lo cual utilizamos una maza de 8 Kg con la que se golpea una placa metálica de acero para evitar daños al pavimento e incrementar la transmisión de energía. Esta maza está equipada con un sensor de disparo (*trigger*) conectado al equipo de registro para iniciar la grabación de los datos de campo.

Para obtener una buena imagen del terreno colocamos los geófonos a 5 m uno respecto del otro y realizamos 13 disparos, es decir, 13 golpes con la maza sobre la placa. El primero de los disparos a -2.5 m del geófono 1, esto es 2.5 metros a la izquierda del geófono 1. El siguiente entre los geófonos 2 y 3 a 2.5 m de cada uno, el próximo entre los geófonos 4 y 5 a 2.5 m de cada uno, y así sucesivamente hasta hacer el último disparo a 2.5 m del geófono 24. En la Figura 3, se muestra un detalle de la distribución de los geófonos.



Figura 3. Fotografía del ensayo de sísmica de refracción.

Una vez tomados estos datos, podemos analizarlos con el programa *Rayfract*. Requiere los tiempos de llegada de las ondas a cada geófono en cada uno de los disparos y los compara con modelos para obtener una imagen en 2D. Esta imagen muestra las velocidades de propagación de las ondas P en cada zona del subsuelo. Comparando las velocidades obtenidas con los valores estandarizados (tablas de las velocidades de

propagación de las ondas P para distintos materiales) y teniendo información sobre la zona geológica en la que nos encontramos, podemos determinar los materiales que conforman el subsuelo y como se encuentran distribuidos. Para analizar los datos mediante el programa Rayfract, tenemos que meter el número de geófonos, así como la distancia entre ellos, en nuestro caso 5 metros. También tenemos que darle la información sobre el lugar en el que se ha realizado cada uno de los disparos. Entonces, tenemos que picar la primera llegada de las ondas en cada geófono para que el programa, posteriormente, compare los resultados obtenidos con los modelos y, así, obtener la imagen 2D que nos proporciona las velocidades de propagación de las ondas P en cada zona del subsuelo.

En la Figura 4, se muestran las ondas captadas por cada geófono en el disparo entre los geófonos 12 y 13, y el picado que hice de los tiempos de la primera llegada de las ondas a cada geófono:

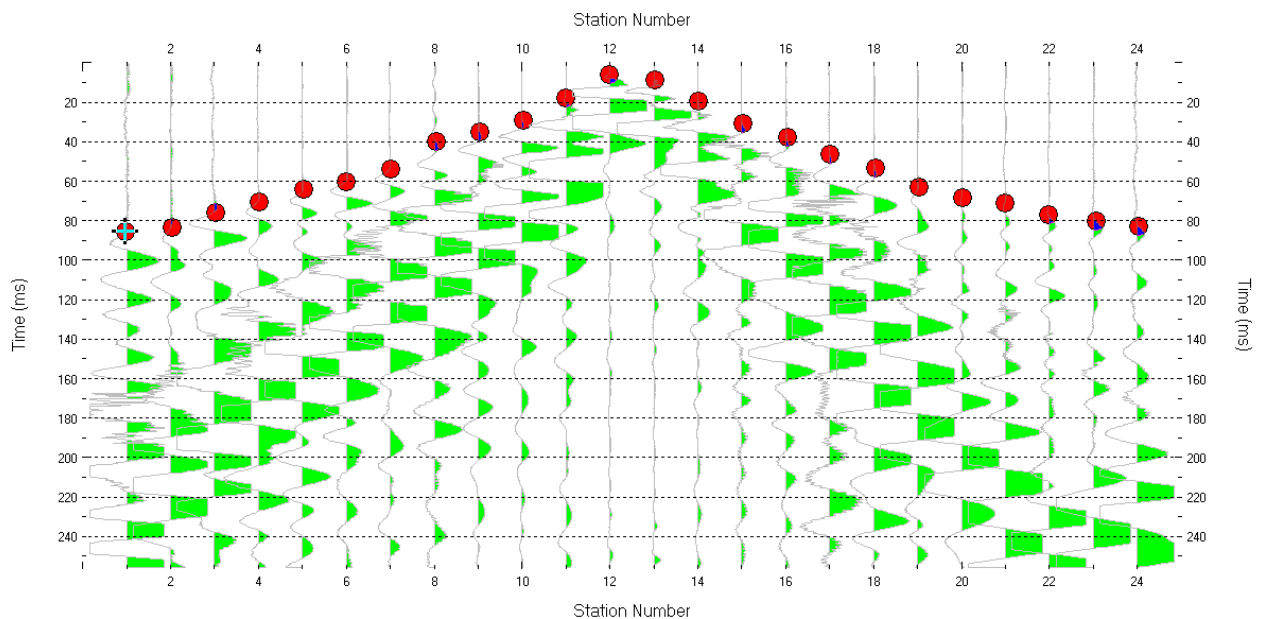


Figura 4. Picado de los tiempos de llegada de las ondas P a cada geófono en el 7º disparo.

Esto se realiza para cada uno de los 13 disparos. Una vez implementados los datos, el programa realiza una inversión suave (*Smooth inversion*), en concreto, realiza una inversión WET (*Wavepath Eikonal Traveltime*) con un modelo inicial de gradiente 1D, en el que usa la ecuación Eikonal de la propagación de ondas en un medio para obtener la imagen que se muestra en la Figura 5.

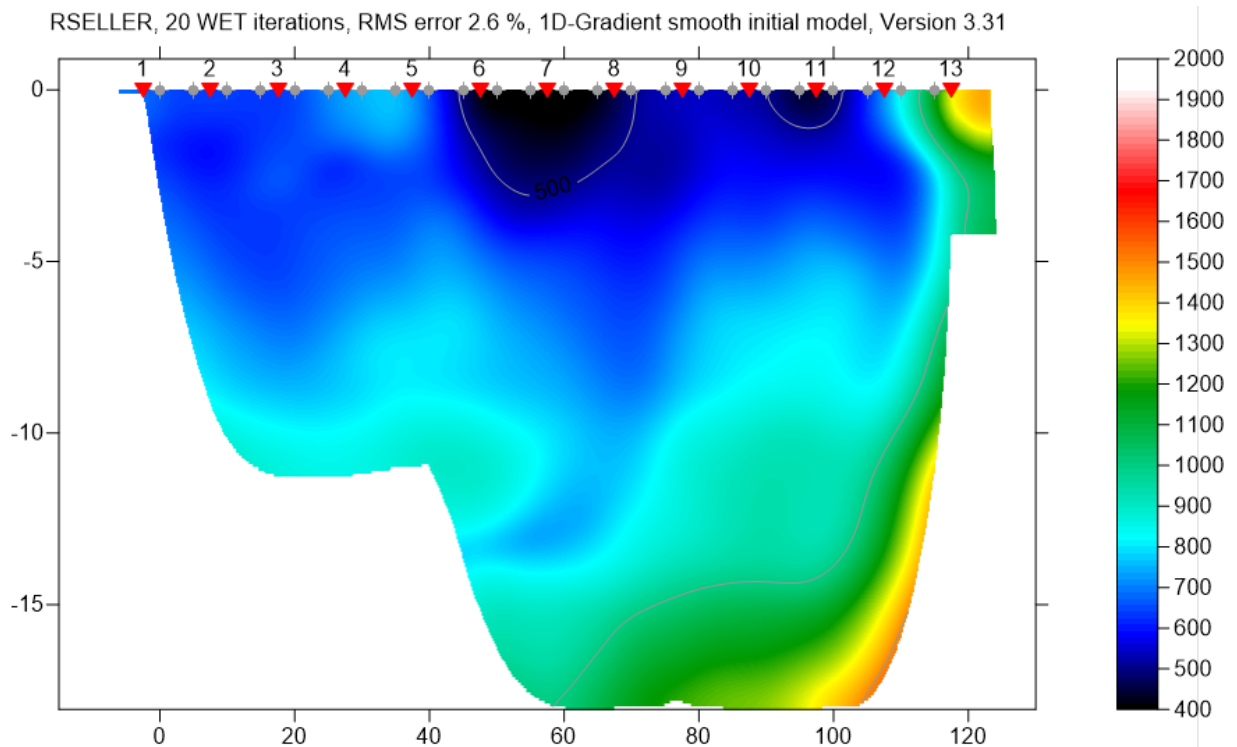


Figura 5. Representación del modelo de velocidades en el ensayo de refracción sísmica.

Se ha obtenido un RMS (error cuadrático medio), entre las rectas obtenidas al picar la primera llegada de las ondas en cada geófono para cada disparo y el modelo, de 2.6%. En el eje Y, tenemos la profundidad y en el eje X, la distancia horizontal donde se hizo el ensayo, ambas en metros. La escala de colores representa la velocidad en metros por segundo de las ondas P, en cada zona del subsuelo.

En la misma cantera, también realizamos ensayos con MASW, ya que combinando ambos resultados podemos obtener con mayor claridad los materiales que conforman el subsuelo en dicho lugar y, una vez halladas las velocidades de las ondas P y S, determinar con mayor claridad la posibilidad de derrumbe de la escombrera de Monte Coto.

El montaje para la toma de datos que se puede ver en la Figura 6, se realiza de forma similar al anterior. Colocamos 24 geófonos, a lo largo de una línea de adquisición, conectados a un sismógrafo donde se recoge y almacena la información. En un extremo de la línea generamos una perturbación del terreno, golpeando con una fuente de impacto PEG-40 (montada sobre la bola de remolque de un vehículo todoterreno), la misma placa metálica que en sísmica de refracción. El percutor de impacto está equipado con un sensor de disparo (*trigger*) conectado al equipo de registro para iniciar la grabación de los datos de campo. Los 24 geófonos de componente vertical con las mismas características que



los utilizados en sismica de refracción forman parte del *Land-streamer*, receptor compuesto por una manguera de alta resistencia a la abrasión con los sensores y que permite un desplazamiento de manera rápida y eficiente. Los geófonos se encuentran colocados sobre bases metálicas en el *Land-streamer* a 2 m de distancia entre sí. El equipo de registro es el mismo que el utilizado en sismica de refracción.



Figura 6. Fotografía del ensayo de MASW.

Se pueden alcanzar decenas de metros de profundidad dependiendo de las características del terreno. Los sensores los arrastramos detrás del todoterreno, golpeando cada 8 m.

Una vez tomados los datos realicé el procesado de estos en el programa *SurfSeis 4*. El procedimiento aplicado consiste en encontrar el modelo de terreno que mejor explica la curva de dispersión observada en los datos con la que genera el modelo.

Las ondas superficiales Rayleigh se descomponen en sus distintas componentes y se determina la velocidad de propagación de cada frecuencia. A esta velocidad se la conoce como velocidad de fase y la curva que define las velocidades de fase de las frecuencias individuales en las que se ha descompuesto la onda Rayleigh se denomina curva de dispersión, la cual se muestra en la Figura 7.

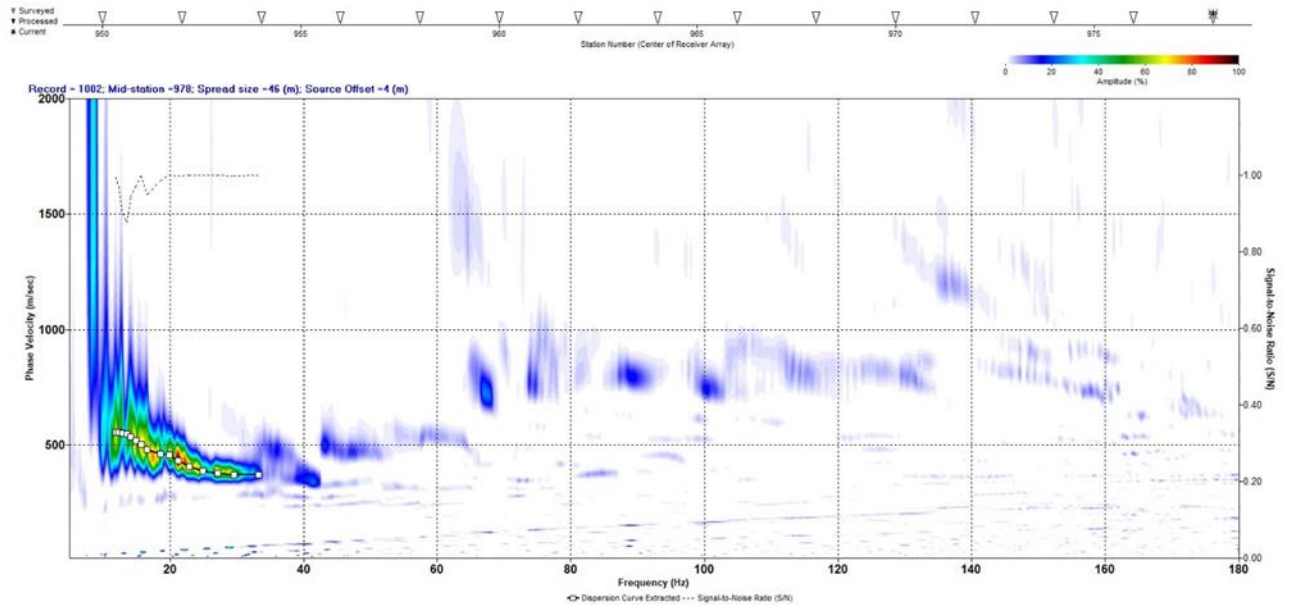


Figura 7. Curva de dispersión del ensayo de MASW.

La técnica MASW proporciona modelos de velocidad de propagación de las ondas S ( $V_s$ ) que es un parámetro que se encuentra directamente relacionado con el módulo de rigidez ( $G$ ).

$$G = \rho V_s^2$$

Donde  $\rho$  es la densidad del material.

En este perfil, se ha podido establecer una diferenciación de velocidades de la onda P y S que nos permite identificar las diferentes capas de material presente en esta zona y su alteración. Como se puede ver, la velocidad nos diferencia materiales que en este caso y debido a la compactación, tienen diferentes velocidades. También permite determinar zonas donde hay más material tipo caliza y más material tipo arcilla ya que en esta escombrera se han vertido los dos conjuntamente. El objetivo de este trabajo era obtener esta estratificación de materiales y su valor de velocidad que junto con valores de velocidad de las ondas S y de la densidad 2,65 gr/cm<sup>3</sup> permite el cálculo de los módulos dinámicos como Cizalladura ( $G$ ), Modulo Elástico ( $E$ ) y Poisson ( $\nu$ ), necesarios para realizar los cálculos de estabilidad de los distintos taludes.

Finalmente, se concluye con que la escombrera es estable.



### **3.2. GPR (Ground Penetrating Radar).**

La segunda tarea que realicé fue el estudio de la técnica electromagnética de GPR (Ground Penetrating Radar) o georradar, con el objetivo de determinar la localización de fracturas y la estratificación de los distintos materiales en una cantera, así como de las pequeñas cavidades que pueda haber en ese terreno. Además, he participado en un artículo en el proyecto ISGEOMIN, describiendo el fundamento físico de la técnica GPR.

La técnica de GPR consiste en la emisión de pulsos de alta frecuencia por una antena emisora y su posterior recepción tras las reflexiones sufridas dentro del material en una antena receptora. Las reflexiones se producen como consecuencia del contraste en las propiedades electromagnéticas del material por el que se propagan las ondas, concretamente de la conductividad eléctrica, o su inverso, la resistividad eléctrica; la permeabilidad magnética; y la constante dieléctrica o permitividad.

La base física de GPR es la propagación de las ondas electromagnéticas en medios, tanto conductores como no conductores, se suelen tratar las ecuaciones como si trabajásemos con medios no dispersivos, y las reflexiones que se producen en la interfase entre medios con distintas velocidades de propagación para la luz. En esta técnica, los factores de mayor influencia son los coeficientes de reflexión de Fresnel, los cuáles dependen las impedancias de los materiales entre los que se encuentra la interfase [3].

Mi tarea fue el análisis de los perfiles obtenidos al recorrer la superficie en una cantera para deducir los lugares donde hay cavidades, fracturas o cambios de material, y de esta forma saber las zonas en las cuáles se debe excavar para conseguir el material deseado y las zonas en las que no se debe realizar la extracción por existir cavidades cercanas donde los trabajadores se pueden caer.

La imagen que se obtiene al tomar los datos hay que procesarla, es decir, introducir varios filtros para interpretar mejor las reflexiones que se ven en la imagen y, así, deducir con la mejor calidad posible las posibles cavidades, fracturas o distintas capas de material que haya. Dicho procesado de la imagen se realiza con el programa REFLEXW, el cual tiene una cantidad muy grande de filtros que permiten mejorar la imagen. En el mismo, también se pueden procesar datos de otras técnicas como sísmica de refracción entre otras.

Antes de importar los datos al programa, primero tenemos que transformar las coordenadas tomadas con el GPS durante la toma de datos de UTM a coordenadas

geográficas. Esto se realiza mediante el programa PAG (Programa de aplicaciones geodésicas) del IGN (Instituto Geográfico Nacional) con el uso de la calculadora geodésica. A continuación, podemos pasar a importar los datos al programa REFLEXW. Los datos obtenidos durante el trabajo de campo se recogen en un archivo en formato rd3, que podemos importar al programa. Podemos introducir a la vez en el programa varios perfiles, para no tener que cargar un nuevo perfil cada vez que le pongamos los filtros al anterior. Esta opción, se encuentra al importar los datos en la opción *conversion sequence, several lines*.

A continuación, comenzamos con la secuencia de procesamiento, para mejorar los perfiles obtenidos. Lo primero que tenemos que hacer es eliminar la llegada de la onda directa a la antena receptora, es decir, la onda que va por el aire de forma directa, sin reflejarse en ningún sitio desde la antena emisora a la receptora. Esto se hace mediante el filtro *DC shift*. Después, hacemos la corrección a tiempo cero para lo que tenemos que comprobar cuando se produce la primera llegada de una reflexión a la antena receptora. La primera llegada y el tiempo en que llega a la antena receptora se puede ver en la ventana *WiggleWindow*. Entonces, aplicamos el filtro *move start time* con el tiempo tomado de la primera llegada. Ahora, le aplicamos el filtro *Background removal*, el cuál elimina gran parte del ruido de fondo, mediante la sustracción de una traza promediada que se construye a partir del rango de tiempo elegido de la sección. El siguiente filtro que aplicamos es un filtro pasa-banda, concretamente, el filtro *Bandpassbutterworth*. Este filtro elimina las frecuencias que no entran dentro del intervalo de frecuencias que nos interesa. En nuestro caso, utilizamos como frecuencia baja de corte  $1/4$  de la frecuencia de la antena y como frecuencia alta de corte el doble de la frecuencia de la antena. A continuación, le aplicamos una ganancia a la amplitud para ver mejor las zonas más profundas, es decir, las zonas a las que la onda llega con menos energía porque al reflejarse en la interfase llega menos energía a la antena receptora, lo cual dificulta la interpretación del perfil en dichas zonas. Hay que tener cuidado al aplicar la ganancia para no perturbar demasiado la onda. También podemos recortar el tiempo/distancia que se muestra en el perfil, ya que llega un momento en el que la onda ha perdido toda su energía y no se recibe señal o no se puede detectar. Para mejorar algo más la calidad de la imagen podemos aplicar el filtro *Running Average*, el cual promedia las trazas seleccionadas y les da la misma amplitud. Por ejemplo, si escogemos que lo haga cada 4 trazas, entonces, cada 4 trazas se hará una línea con la amplitud promedio de las 4. Por

último, le aplicamos el filtro *Topography 3D*, el cual le añade la topografía al perfil, es decir, tiene en cuenta la altitud del terreno en cada punto.

En la Figura 8, se muestra uno de los perfiles obtenidos sin procesar y el resultado final una vez que se ha procesado en la Figura 9.

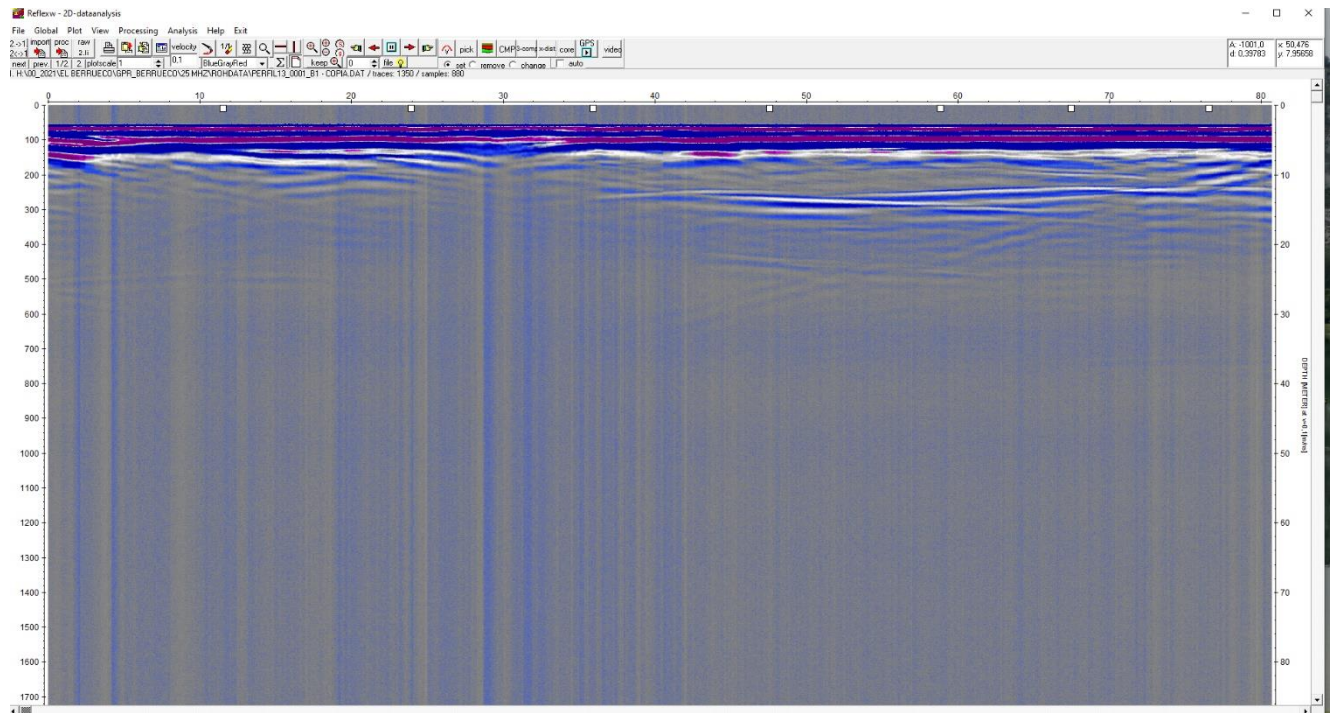


Figura 8. Imagen de GPR sin procesar.

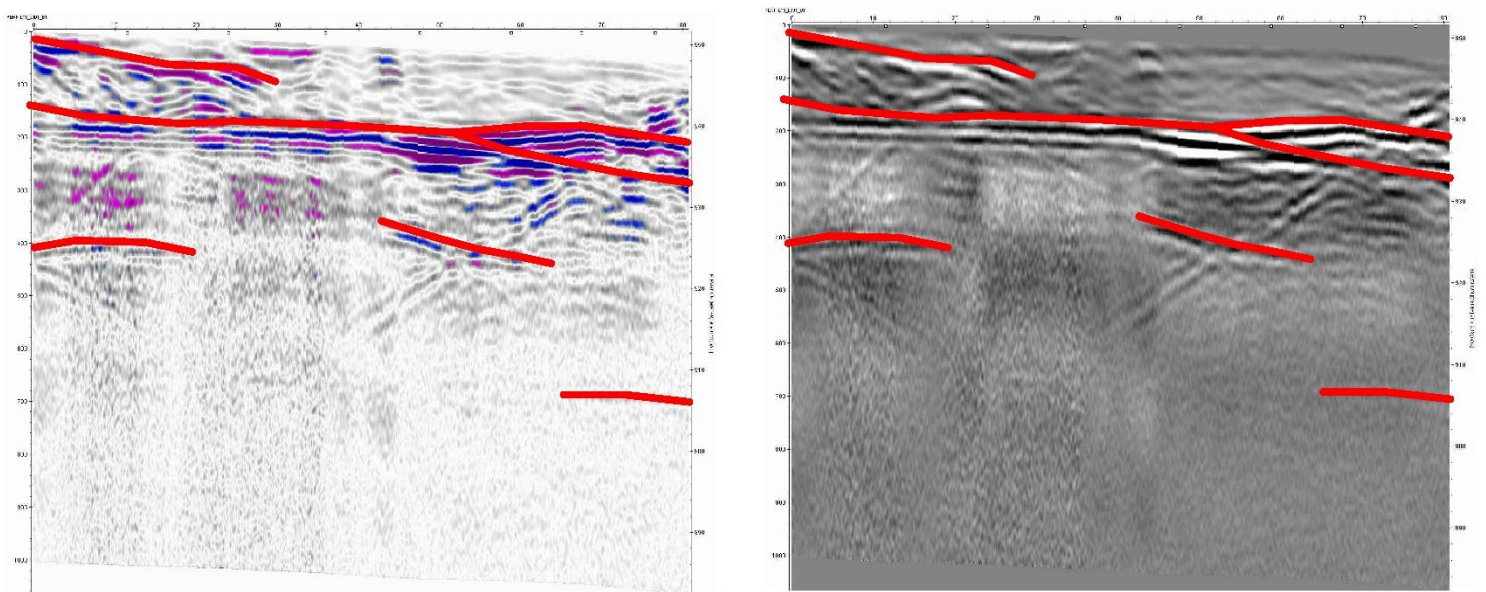


Figura 9. Imágenes de GPR procesadas, con escalas de colores distintas para apreciar mejor los detalles.

Se pueden apreciar varias fracturas (líneas diagonales) y una clara estratificación (reflexión horizontal bastante pronunciada) a lo largo de todo el perfil. También aparecen pequeñas reflexiones por poros en las rocas e impurezas.

### 3.3. Tomografía eléctrica.

La tercera tarea que realicé fue el estudio de tomografía eléctrica en 2D y 3D, para determinar la composición del subsuelo en un yacimiento en función de la resistividad. Los objetivos del estudio eran determinar la zona en la que se debe excavar, la profundidad a la que se encuentra el yacimiento y como se distribuyen sus diferentes elementos. Previo a esto, se realizó una medida con GPR en la zona, ya que sus resultados se pueden analizar más rápidamente, aunque tiene menos resolución.

En la tomografía eléctrica 3D utilizamos 144 electrodos, clavados en el suelo, colocados en forma de malla separados un metro respectivamente unos de otros, formando un rectángulo con 16 filas y 9 columnas. También necesitamos la unidad central (resistivímetro automático), el cual se encarga de ejecutar de forma automática toda la secuencia de medidas predeterminada, verificar el buen estado de las conexiones, así como almacenar digitalmente todos los resultados de campo. Unos cables de gran longitud, con conexiones cada cierto intervalo a fin de poder conectar los electrodos, unen todo el mallado con la unidad central. Los conectores, unos pequeños cables de cobre con pinzas en los extremos, son los que se encargan de conectar los electrodos al cable. Una batería es la fuente de alimentación de todo el sistema.

Antes de comenzar con la toma de medidas, a través del portátil configuraremos todas las variables del dispositivo: número de electrodos utilizados, distancia entre ellos, dispositivo electrónico de medida, así como el número de medidas que queremos realizar. La configuración que introducimos fue la de Wenner-Schlumberger [4], la cual se muestra en la Figura 10.

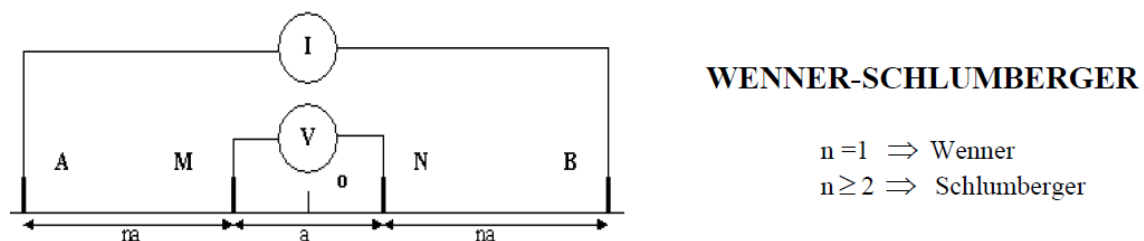


Figura 10. Representación esquemática de la configuración de Wenner-Schlumberger.



Concluida la configuración, se transfieren estas especificaciones a la unidad central para que ésta pueda realizar automáticamente toda la secuencia de mediciones prefijada.

Sin embargo, antes de iniciar las mediciones y también mediante la unidad central, se procede previamente a la verificación de que todas las conexiones funcionan correctamente (Figura 11), y que la resistividad entre electrodo-suelo es suficientemente baja como garantizar unos buenos resultados. Con tal de mejorar la resistividad entre electrodo-suelo echamos agua con sal diluida sobre los electrodos clavados y las conexiones, así como entre los mismos y el cable. En algunos casos la resistividad salía con un valor muy alto, esto se debía a que el electrodo no estaba bien clavado en el suelo y había que clavarlo mejor. Otra razón por la que aparecían valores muy altos de la resistividad entre electrodo-suelo, es que la sal en estado sólido es aislante y debido a las altas temperaturas el agua en la que echábamos disuelta la sal se evaporaba, y se producía dicho aumento de la resistividad.



Figura 11. Imagen de la toma de medidas con la unidad central (resistivímetro).

Una vez está todo dispuesto, se inicia la secuencia de medidas que hayamos predeterminado, proceso que tardará más o menos tiempo en función del número de medidas a realizar. En nuestro caso, tardamos una hora y media, en realizar aproximadamente unas 500 medidas. Una vez terminado todo el proceso de captura de datos, toda la información almacenada digitalmente se vuelca en el portátil, a fin de proceder a su procesado e interpretación con el programa RES2DINV/RES3DINV.

Para obtener un modelo 3D de resistividades reales, a partir de la pseudosección de resistividades aparentes obtenida del terreno, utilizamos el programa RES3DINV, el

cual usa una técnica de inversión para obtener el modelo 3D de resistividades reales. Estas técnicas de inversión se basan en realizar todo un proceso iterativo con el que obtener un modelo de resistividades reales, tal que el modelo de resistividades aparentes que generaría, sea lo más similar posible a la pseudosección de resistividades aparentes medida en el campo. En nuestro caso, usamos el *Smoothness-constrained inversion method*, que es más eficiente que el *Block inversion method*. El método empleado está basado en el *Gauss-Newton least-squares method*, que presenta la gran ventaja, con respecto al otro, pues no requiere de un modelo inicial, a partir del cual empezar el proceso iterativo [4].

El funcionamiento del programa RESD3DINV es el siguiente [4]:

- Primero, se verifican los datos de campo. El programa permite visualizar las medidas obtenidas a fin de poder eliminar posibles valores erróneos, los cuáles se distinguen por presentar valores muy distintos al de los puntos adyacentes.
- Segundo, tenemos que definir el valor de los parámetros de cálculo necesarios en el proceso de inversión. Utilizamos los valores con los que trabaja por defecto el programa, ya que son satisfactorios en la mayoría de los estudios realizados.
- Tercero, discretización del terreno en bloques. Utilizamos la discretización por defecto del programa que trabaja con diferencias finitas, con un número de bloques inferior al de lecturas y cuyo tamaño aumenta un 10% (o 25%) con la profundidad.
- Por último, se inician los cálculos. El programa genera un modelo homogéneo de resistividades. Posteriormente calcula el modelo de resistividades aparentes que se deriva del modelo de resistividades reales. Compara el modelo aparente calculado con el medido en el campo. Comienza un proceso iterativo con el fin de encontrar un modelo de resistividades reales, tal que la diferencia entre el modelo de resistividades aparentes calculado y el medido sea mínimo. El proceso finaliza cuando se alcance un RMS (error cuadrático medio) inferior al predefinido.

Por temas de confidencialidad, no puedo mostrar el resultado del yacimiento. Sin embargo, también realicé el proceso de inversión para los datos tomados en una cantera con el objetivo de determinar la distribución de los distintos materiales, de forma exacta para saber el lugar donde extraer granito. En la Figura 12, se muestra el resultado obtenido.

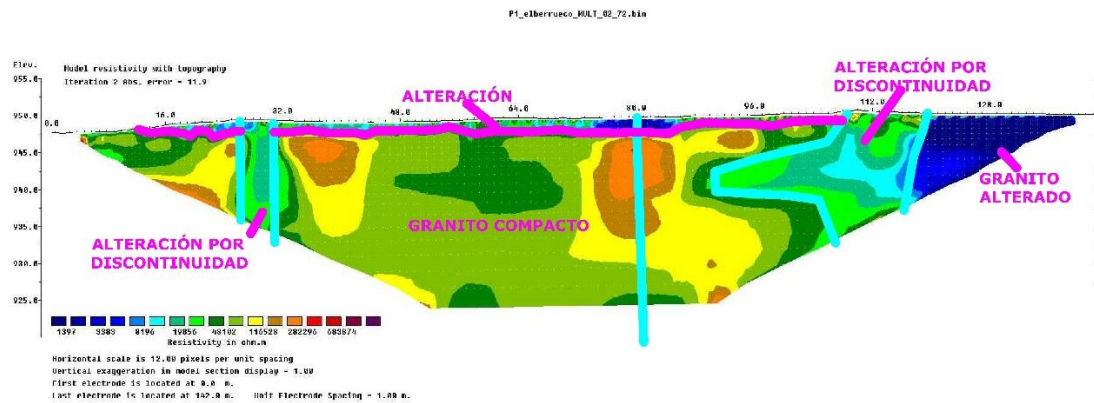


Figura 12. Resultados del modelo de resistividades reales, a partir de los datos tomados en una cantera y su correspondiente interpretación.

Con ayuda de una tabla con medidas de resistividad de materiales, se pueden determinar los distintos materiales que componen el subsuelo.

### 3.4. SEM.

La última tarea que realicé fue colaborar en el alineamiento del haz de electrones, de las aperturas móviles del SEM y ajustar los parámetros necesarios para obtener una buena resolución, en función de la muestra que se desee analizar. Una vez terminado este proceso analizamos varias muestras con el SEM.

Para poder realizar la alineación y el ajuste de parámetros del SEM, previamente, tuve que estudiar el funcionamiento y los componentes del mismo para ser capaz de detectar errores durante la alineación y el ajuste, y conocer a que se deben éstos, así como leer el manual de instrucciones para alinear el haz y modificarlo de manera que se obtenga la mejor resolución posible al analizar la muestra.

Para realizar la alineación del SEM, disponíamos de un vídeo en el que aparecía la alineación del mismo por un profesional. Primero colocamos una muestra estándar que sabemos cómo se debe de ver para realizar la alineación y enfoque sin error, ya que, si no se conoce la muestra, no se puede saber con certeza si la alineación está bien realizada. Una vez colocada la muestra, hacemos vacío, presionando el botón EVAC. Al introducir la muestra tenemos que fijarnos de que no supere los 55 mm porque dañaríamos el SEM. A continuación, aplicamos el voltaje de aceleración y ajustamos la corriente del filamento. Cuanto mayor sea la corriente del filamento más brillo tendrá la muestra, ya que saldrán del mismo más electrones y cuánto mayor sea el voltaje de aceleración, mayor

será la resolución porque a mayor voltaje de aceleración, mayor será la velocidad de los electrones y por la ecuación de De Broglie menor será la longitud de onda y, por lo tanto, mayor será la energía y la resolución, que es mayor cuanto menor sea la longitud de onda. El voltaje que se suele utilizar en el CTM debido a los materiales con los que se trabaja es de 15 kV.

Para conseguir un buen enfoque, tenemos que poner la distancia de trabajo de forma correcta. La distancia de trabajo define la distancia de la base del lente objetivo a la superficie de la muestra. Para alinear el SEM tenemos que ir ajustando las lentes objetivo hasta que el haz de electrones pase perfectamente por cada una de dichas lentes y la muestra se vea con la mejor resolución posible. Una vez hecho esto, también tenemos que corregir el astigmatismo, aunque es bastante complicado que quede perfecto.

Cuando ya tenemos alineado el SEM podemos seleccionar el tipo de detector que queremos utilizar, en función de lo que queramos estudiar. Con el detector de electrones secundarios podemos ver con alta resolución la tomografía de la muestra. Un electrón secundario se genera cuando un electrón en el haz primario interacciona con un electrón de los átomos en la muestra y lo saca de su órbita con cierta cantidad de energía cinética. Debido a que son electrones de baja energía (menor a 50 eV), sólo los que se emiten cerca de la superficie alcanzarán a llegar al detector y se considerarán como electrones secundarios. Los electrones *Auger* también se pueden detectar mediante el mismo detector. Los electrones *Auger* son producidos por desexcitación del átomo. Es decir, se originan cuando la radiación característica de los rayos X no salen de la muestra, sino que es reabsorbida dentro del mismo átomo y está se utiliza para eyectar un electrón de menor energía, conocido como electrón *Auger*. Llevan información química específica del átomo que los originó, son de muy baja energía, por lo cual solo pueden atravesar distancias cortas dentro de la muestra y, por lo tanto, la información que llevan es específica de la superficie de la muestra (pocas capas atómicas) [5].

También podemos utilizar el detector de electrones retrodispersados. A diferencia de los electrones secundarios, los retrodispersados tienen mucha más energía (mayor a 50 eV) y pueden escapar desde una profundidad mucho mayor, hasta la superficie de la muestra y llegar hasta el detector. Esta señal se produce cuando un electrón en el haz primario interactúa con el núcleo de un átomo, y "rebota" al electrón primario hacia fuera de la muestra sin pérdida de energía (dispersión elástica). Esta señal no tiene tanta resolución ni lleva tanta información de la topografía de la muestra como en el caso de los electrones



secundarios, sin embargo, proporciona información acerca de la composición química por medio del contraste en la imagen. Es decir, en zonas compuestas por elementos con número atómico grande, el haz primario de electrones tendrá mayor posibilidad de interaccionar con los núcleos, por lo que producirá una mayor cantidad de electrones retrodispersados y estas zonas se observarán más claras en la imagen del monitor con respecto a aquellas con un número atómico pequeño, las cuales se percibirán más oscuras [5].

Además, se dispone de un detector para el microanálisis por dispersión de energías de rayos X. Con este detector podemos realizar un análisis cualitativo el cual se basa en la discriminación de las energías de los rayos X captados por el detector, sabiendo que cada energía es característica del tránsito orbital de determinados electrones en cada elemento. El software del equipo de microanálisis suele hacer un buen trabajo en la detección de distintos elementos. A veces puede presentar problemas el solapamiento de picos en el espectro debido a la similitud de energías de orbitales de distintos elementos. Realizar un análisis cuantitativo es mucho más complejo, ya que, en función de la muestra a analizar, tendríamos que tener muy en cuenta los elementos que la componen, y diseñar una calibración a medida para llegar a los resultados deseados con una estimación objetiva de la fiabilidad de los datos obtenidos.

En el SEM del CTM he analizado los materiales con el objetivo de determinar los minerales presentes en las muestras estudiadas, a partir de la composición de los elementos químicos detectados, tras pasar la composición obtenida por un programa de referencia, que muestra los posibles minerales que tienen dicha composición. A continuación, en la Figura 13, se muestra una imagen tomada con el SEM.

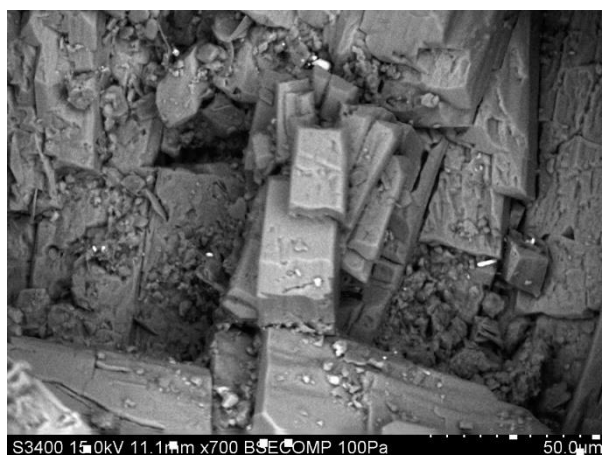


Figura 13. Imagen adquirida con SEM.

## **4. Conclusiones-Valoración.**

### **4.1. Conclusión sobre el trabajo realizado y sus resultados.**

El trabajo realizado ha sido satisfactorio y me ha permitido la aplicación de parte de mis conocimientos a problemas y estudios reales.

En primer lugar, con la tarea realizada sobre sísmica pudimos determinar la posibilidad de derrumbe de una escombrera. Según los resultados obtenidos el terreno en dicha escombrera tiene estabilidad suficiente para no ceder y que se pueda operar con normalidad. De esta forma se garantiza la seguridad del personal que trabaje en la cantera. Esta técnica tiene aplicaciones como comprobar el terreno para hacer construcciones, entre otras.

En segundo lugar, con la tarea realizada sobre GPR pudimos determinar donde se encuentran las fracturas y los cambios de material en el terreno, así como pequeñas cavidades en las que se pueden caer los operarios al intentar extraer el material en el sitio equivocado. Es una técnica de fácil y rápida implementación en campo, que ofrece la posibilidad de hacer una primera interpretación *in situ*, ya que a medida que se toman los datos se van visualizando en una pantalla conectada al equipo.

En tercer lugar, con la tarea realizada sobre Tomografía eléctrica pudimos determinar la composición del subsuelo en un yacimiento con el objetivo de determinar la zona en la que se debe excavar, la profundidad a la que se encuentra el yacimiento y como se distribuyen sus diferentes elementos. También realicé el proceso de inversión para los datos tomados en una cantera con el objetivo de determinar la distribución de los distintos materiales, de forma exacta para saber el lugar donde extraer granito. Es una técnica que tiene muchas aplicaciones y con la que, además, se obtienen resultados muy buenos con mucha resolución y poco error. Se puede usar para encontrar acuíferos, metales, tuberías y otras muchas cosas.

Por último, con la tarea realizada con el SEM he podido estudiar los materiales a escala microscópica y nanoscópica, y de esta forma ver la composición de distintos materiales, así como estudiar su estructura e identificar los elementos y compuestos químicos presentes en una muestra y sus proporciones, elaborar perfiles y mapeos de elementos, a partir de los espectros de emisión de rayos X de la muestra. El SEM tiene aplicaciones muy diversas como puede ser la determinación de los compuestos en las muestras gracias

a los detectores que lleva acoplados, así como la obtención de imágenes de alto detalle de los minerales y su estructura.

#### **4.2. Valoración personal de las habilidades adquiridas.**

Durante el período de prácticas, he adquirido formación profesional que me puede ser de utilidad para el futuro, como es el manejo de programas nuevos con diferentes aplicaciones de forma autónoma. También he aprendido a colaborar con un equipo multidisciplinar y compartir conocimientos de diferentes ramas científicas para resolver la tarea requerida. Otras habilidades adquiridas han sido la capacidad de adaptación a trabajar en un entorno nuevo y el desarrollo en la elaboración de documentos científicos, con la colaboración en el artículo dentro del proyecto ISGEOMIN.

#### **4.3. Valoración de las tareas desarrolladas con los conocimientos y competencias adquiridos en relación con los estudios universitarios.**

Para realizar las tareas que se me han requerido, principalmente, he trabajado con ondas. En los métodos sísmicos he trabajado con ondas que se propagan en medios materiales, dichas ondas han sido ondas internas (Ondas-P y Ondas-S) y superficiales (Ondas de Rayleigh y Ondas Love). Las ondas P son ondas longitudinales que comprimen el material, las ondas S son ondas transversales, es decir, perpendiculares a la dirección de propagación. En GPR, también se trabaja con ondas, la diferencia es que son ondas electromagnéticas, las cuáles se estudian con cierta profundidad en las asignaturas de electromagnetismo y óptica.

El estudio de ondas es una parte fundamental dentro del grado en física y el trabajo realizado me ha dado la oportunidad de desarrollar mis conocimientos, así como de aplicar los conocimientos adquiridos durante el grado.

En Tomografía eléctrica he trabajado con electromagnetismo, ya que se aplican diferencias de potencial e intensidades para hallar la resistividad de los materiales. También se obtienen las resistividades reales, a partir de las resistividades aparentes mediante métodos de diferencias finitas y ajustes cuadráticos, métodos estudiados durante el grado.

Para entender el funcionamiento del SEM y trabajar con él, he tenido que aplicar y profundizar en conceptos estudiados en física cuántica, electromagnetismo, óptica y física molecular.

#### **4.4. Valoración de la adecuación de la empresa.**

El CTM se ha organizado de forma que pudiera estudiar cada uno de los métodos descritos anteriormente, de forma que antes de pasar al siguiente hubiera acabado con el anterior. Esto se ha hecho con la intención de no mezclar conceptos y aprender cada uno de los métodos de forma correcta y sin dudas. De la misma forma ha ocurrido con el trabajo realizado con el SEM.

#### **4.5. Valoración del grado de innovación u oportunidad de la estrategia de empresa y de las actividades en las que se ha trabajado.**

Todos los procedimientos con los que he trabajado son modernos e innovadores, con aplicaciones actuales en procesos de investigación.

#### **4.6. Valoración global de las prácticas.**

La realización de las prácticas proporciona un contacto del estudiante con el mundo laboral muy beneficioso, ya que lo prepara para entrar en el mercado laboral con experiencia, así como le permite conocer nuevas aplicaciones de los estudios universitarios en situaciones reales.

Ginés González Guirado.

Cehegín a 19 de Julio del 2022.



## **5. Bibliografía.**

- [1] John M. Reynolds, An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, 2a. Edition, JohnWiley & Sons, Ltd., 2011, Capítulos 4 y 5.
- [2] M<sup>a</sup> Julia Tellez y Pablo, Análisis e interpretación de ondas P y S de perfiles sísmicos: aplicación al NO de la Península Ibérica, Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 1992.
- [3] A. P. Annan, Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications, Sensors and software Inc., 2003.
- [4] J Serrano Ontiveros, Tema 3: TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA – UPCommons, 2003
- [5] José Jesús MENA DELGADILLO, Microscopía electrónica de barrido, UNAM, 2018
- [6] Jaime Renau-Piqueras & Magdalena Faura, Principios básicos del Microscopio Electrónico de Barrido, II Reunión Científica en Biología Celular y Molecular: técnicas de microscopía, micromanipulación y análisis de imagen, 1994