

## **Definición de la red de fallas y fracturas en macizos graníticos mediante Sísmica de Reflexión de Alta Resolución con fines Hidrogeológicos e Hidrotermales**

Francisco MERCHÁN<sup>1</sup>, Mariano HIGUERAS<sup>1</sup>, José Antonio ABEGER<sup>1</sup>

<sup>1</sup>OCSA Estudios Geofísicos, ocsa@ocsa-geofisica.com.

### **RESUMEN**

En esta comunicación se muestra un estudio realizado en un macizo granítico para definir la red de fallas y fracturas existentes mediante Sísmica de Reflexión de Alta Resolución.

En él se aborda uno de los problemas fundamentales de la Prospección Geofísica no petrolera: la definición de estructuras complejas y aparentemente uniformes hasta profundidades del orden de los 1000 m de profundidad.

Desde el punto de vista Hidrogeológico resulta complejo localizar captaciones en formaciones geológicas prácticamente impermeables como son los granitos a profundidades superiores a los 200 m: solo si se localiza alguna zona de fracturación que pueda funcionar como acuífero permite resolver el problema.

### **1. Introducción.**

En los párrafos que siguen se describe el reconocimiento geofísico realizado para tratar de definir la red de fallas y/o fracturas existentes en un macizo granítico competente y uniforme hasta profundidades del orden de los 800-1000 m.

Para cubrir este objetivo se proyectó la realización de una serie de perfiles de Sísmica de Reflexión de Alta Resolución. En la presente comunicación se muestra uno de los perfiles realizados.

Básicamente, el método sísmico de reflexión consiste en generar un tren de ondas sísmicas, mediante una fuente de energía apropiada (martillo, “pistola”, caída de peso, dinamita, etc.) y medir el tiempo de trayecto de dichas ondas, una vez reflejadas en las distintas capas o interfaces con suficiente contraste de impedancia

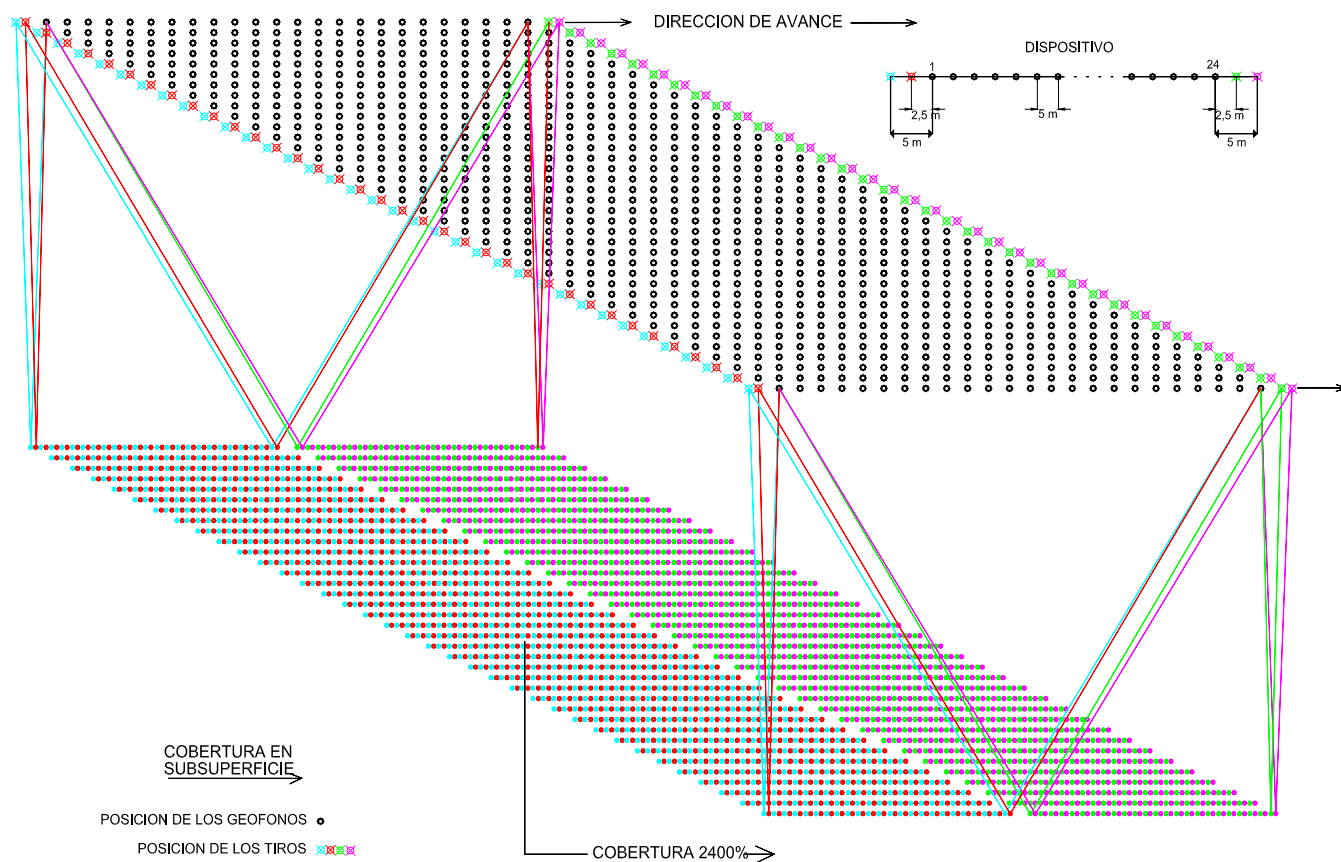
acústica (velocidad\*densidad), entre la fuente de energía y una serie de sensores (geófonos), dispuestos en línea recta a partir de ella (perfil).

Del conocimiento preciso del tiempo empleado y de la velocidad, se pueden reconstruir las trayectorias de éstas ondas primarias, y delinear la disposición estructural de los distintos horizontes sísmicos a lo largo del perfil.

La generación/transmisión de ondas sísmicas lleva asociada otros tipos de ondas no deseadas, originadas por las condiciones de superficie, ruido aleatorio ambiental, reflexiones múltiples, etc., que se registran al mismo tiempo que las ondas primarias, pero que las técnicas de hoy en día permiten atenuar considerablemente mediante un registro multicanal.

Esta técnica utiliza diversas posiciones de la fuente de energía, varios detectores por traza y sistema de registro multicanal que permite la adición de trazas sísmicas diferentes con una subsuperficie de reflexión común. Con ésta técnica de registro de campo, denominada Punto Común de Subsuperficie o C.D.P. (Common Depth Point), se consigue un cierto grado de cobertura (suma de señales primarias), con la ventaja de que en cada punto de subsuperficie común intervienen una gran variedad de distancias fuente de energía-geófono. Con ello se logra, al realizar el “stack” o suma de trazas, mediante un procesado adecuado, una atenuación efectiva del ruido aleatorio y de las reflexiones no primarias, una notable mejoría de la relación señal/ruido y, por consiguiente, una interpretación más fiable.

El dispositivo empleado ha permitido registrar el perfil realizado en cobertura 2400%, el diagrama de explotación empleado puede observarse en la Figura 1. La cobertura múltiple nos permite atenuar ruidos aleatorios y reflexiones múltiples, esto permite obtener unos resultados finales cuya mejora es proporcional a  $n^{1/2}$ , siendo n el número de muestras/datos captadas a través del sistema de registro, y por tanto la mejora en nuestro caso será de  $20 \cdot \log_2(24^{1/2}) = 24.49$  db. Las teorías de suma vertical u horizontal son aplicaciones de este mismo principio.



**Figura 1 – Diagrama de Explotación.**

## 2. Parámetros y técnicas de registro. Procesado.

### 2.1. Parámetros y técnicas de registro.

Se efectuaron diversos ensayos de campo: test de ruido, filtros, ganancias, dos ensayos de tiro de velocidad, etc., con el fin de definir los parámetros y la técnica de registro más idónea en función de los objetivos trazados para el trabajo.

A la vista de las frecuencias aparentes, medidas sobre los registros obtenidos, las bandas de energía reflejadas que se detectaban, los tiempos a los que se obtenían y las velocidades de propagación medias estimadas, se optó por la utilización de los siguientes parámetros de registro:

- una intertraza en superficie de 5 m.
- un filtro de baja abierto.

- un filtro de alta de 250 Hz.
- un valor de AGC de 400.
- 6-7 golpes de martillo, como fuente de energía, por registro.

Partiendo de una intertraza en superficie de 5 m y utilizando un sistema de tiros alternativos (dos tiros en cada extremo del extendimiento a una cierta distancia) con un offset (distancia de la primera traza al punto de tiro) de 2,5 y 5 metros sobre el mismo dispositivo de registro de 115 metros de longitud, realizándose por tanto 4 registros por posición (extendimiento) hemos conseguido una intertraza en subsuperficie de 1,25 m.

Con estos parámetros de registro, ya se observaban, en los registros obtenidos en campo, claros reflectores que se consideraban como horizontes de reflexión, ya que otras alineaciones que aparecían en los registros no eran tan claras y su naturaleza real habría que dejarla pendiente al procesado de la señal. Así pues, los parámetros utilizados fueron los siguientes:

#### Registro:

Muestreo.....0,250 ms  
 Delay.....0  
 Filtro de baja.....abierto  
 Filtro de alta.....250 Hz  
 I.F.P.....Activo  
 Tiempo de registro.....1 segundo

#### Dispositivo:

Número de trazas.....24  
 Distancia entre trazas.....5 m  
 Offset.....2,5 y 5 m  
 Cobertura.....2400 % (24)

Geófonos/traza.....4 de varias frecuencias

Esquemáticamente el dispositivo utilizado queda así:

Tiros |.....Extendimiento de 115 m y 24 trazas.....| Tiros

\*.....\*.....\*.....\*

3 4 2 1

- + Situación de las trazas cada 5 m.
- \* Situación de los puntos de tiros. Los Tiros 4 y 2 a 2,5 m de los extremos del extendimiento y los Tiros 3 y 1 a 5 m de dichos extremos.

Desplazándose este dispositivo (trazas y punto de tiro) cada 5 m sobre el terreno. Al realizar dos tiros en cada extremo la intertraza resultante en subsuperficie es de 2,5 m y la combinación de subsuperficies parciales da una subsuperficie total con intertraza de 1,25 m, con lo que el grado de detalle aumenta al doble. Hay que tener en cuenta que la doble cobertura 24 se alcanza a los 115 m del principio del perfil y comienza a decrecer 115 m antes del final del mismo, manteniéndose constante en el tramo de perfil restante.

Este dispositivo de registro se encuentra desarrollado en el diagrama de explotación representado en la Figura 1, y se completó en las primeras 24 trazas, así como en las últimas 24, con un dispositivo de registro/tiro en roll-allong, disparando en la traza y entre dos trazas consecutivas, con el fin de aumentar el tramo con cobertura 24 de los 60 primeros metros hasta los 60 últimos metros del perfil.

## 2.2. Procesado e Interpretación.

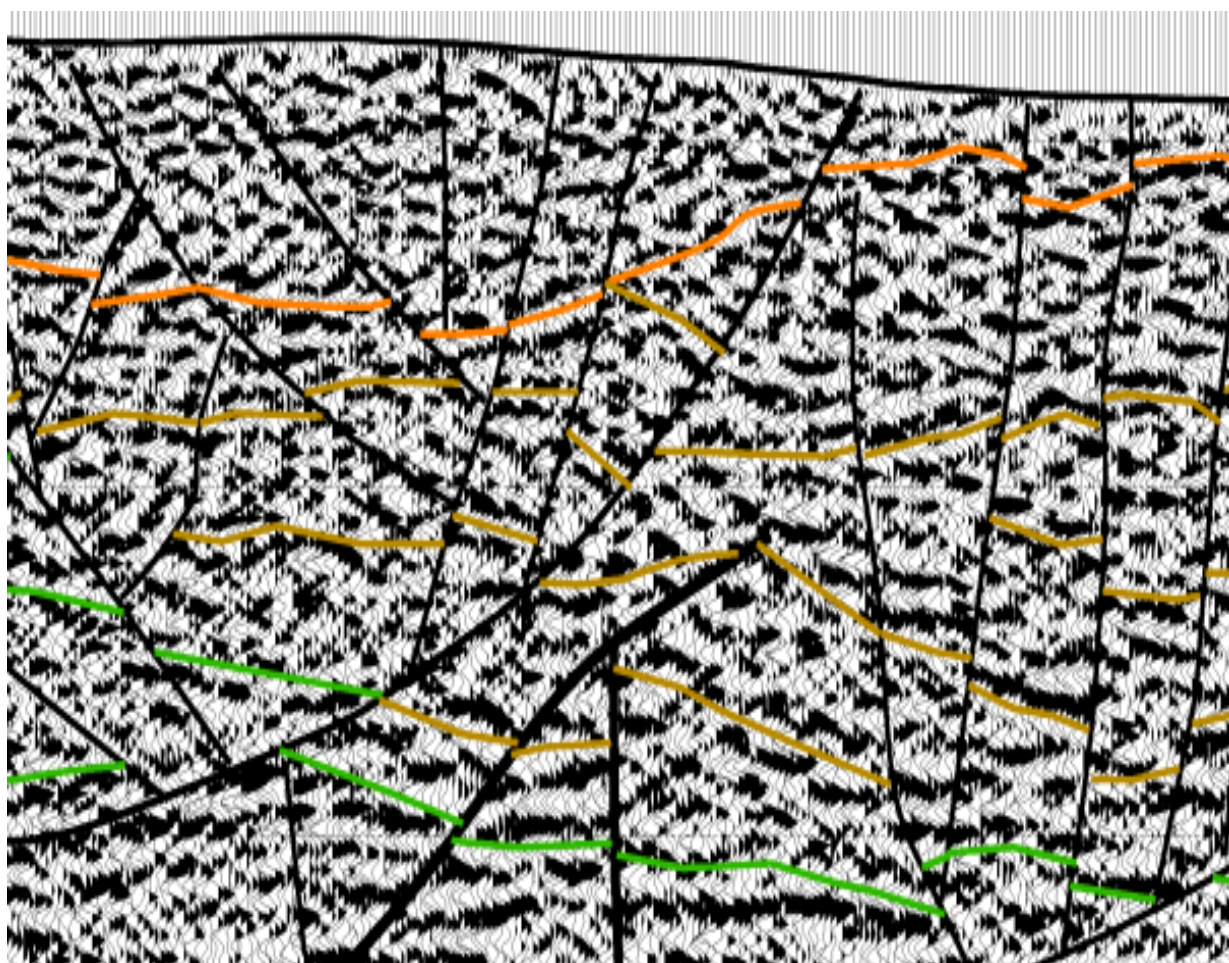
Una vez registrado el perfil se procesó con el paquete de software FOCUS de Paradigm Geophysical, utilizando las mismas técnicas de procesamiento que se emplean en la exploración de hidrocarburos. El procesamiento ha consistido en los siguientes pasos:

- Edición (control de calidad de cada registro de campo).
- Preprocesado: En este paso se realiza la explotación de la refracción superficial empleando extendimientos de distintas posiciones de registro, solapadas entre ellas para definir con mayor precisión las capas superficiales y poder realizar unas correcciones estáticas de alta resolución.
- Recuperación de amplitudes (recuperación de los verdaderos valores de la amplitud).
- Colección de trazas (clasificación de las trazas por punto espejo).
- Análisis de frecuencias (análisis de los datos en F y K).
- Deconvolución, para eliminar la reverberación mediante un operador de blanqueo.
- Análisis de velocidad, se han realizado 13 análisis de velocidad sobre cada perfil (1 cada 60 m mínimo).
- Correcciones dinámicas (NMO) y mute: Aplicación de las correcciones dinámicas calculadas con los análisis de velocidad, aplicación de los “mute” para la eliminación de las llegadas refractadas y de superficie.
- Correcciones estáticas, se aplican las correcciones estáticas obtenidas de la explotación de la refracción.
- Suma de las trazas agrupadas en posición espejo.
- Empleo de un filtro F-K para mejorar la coherencia.
- Aplicación de un filtro variable en el tiempo para mejorar la relación señal/ruido.
- Balanceo para determinar el máximo de la amplitud y evitar las saturaciones en cada una de las trazas.
- Obtención de la sección stack correspondiente.
- Migración en Diferencias Finitas de la sección stack.



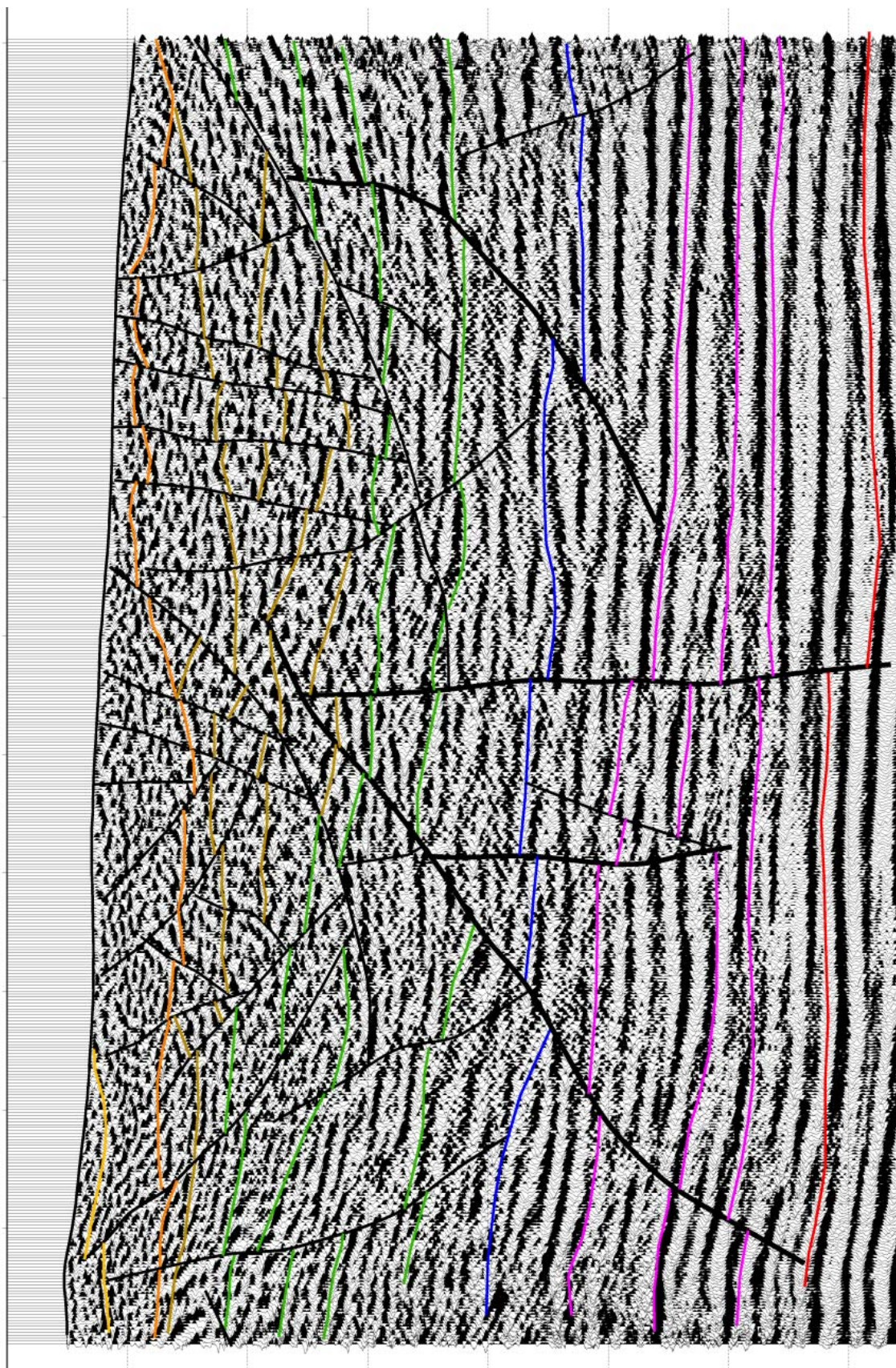
- Utilización de un filtro variable en el tiempo para mejorar la relación señal/ruido.
- Un segundo balanceo se aplica para igualizar la energía de las trazas a lo largo del tiempo.

Como resultado de lo anterior se ha obtenido la Sección Migrada representada en la Figura 2 sobre la que se han plasmado la interpretación realizada.



**Figura 2A** – Detalle de la interpretación de la Sección Migrada.





**Figura 2** – Sección Migrada con su interpretación.



### **3. Interpretación de la Sección Migrada**

Como se ha indicado la interpretación obtenida de la Sección Migrada se incluye en la Figura 2.

Sobre ella, como es habitual, se han coloreado de forma similar “las bases de reflexión” de características semejantes y, siguiendo los saltos entre estas alineaciones, se ha ido construyendo la estructura de fallas y/o fracturas detectadas. Este proceso es iterativo y recíproco: unas veces se definen mejor los horizontes y otras la distribución de las fallas y/o fracturas.

Para realizar ese proceso se han tenido en cuenta los siguientes criterios generales:

- Los rasgos fundamentales sobre los que descansa la interpretación de una sección sísmica de reflexión a la hora de definir los horizontes (elementos de las mismas características sísmicas que comportan una cierta continuidad que componen una sección son: la intensidad de las reflexiones, la frecuencia, el “carácter sísmico” (forma de la onda), continuidad espacial y, por último, la velocidad.
- Los saltos de continuidad de las reflexiones nos permiten dibujar las fallas/fracturas que afectan al conjunto.
- En función de estas hipótesis, se trata de definir las diferentes facies sísmicas (conjunto de características que definen un dominio de la sección: amplitud, frecuencia, continuidad, “ruido”, geometría de la onda, etc.) que se localizan en el conjunto de la sección. Ello nos permite dibujar un esquema de fracturas que separan áreas de facies diferenciadas.
- Al interpretar los datos de las secciones tratamos de aprovechar la continuidad de ciertas reflexiones, que, con el carácter sísmico, la forma y continuidad de onda, su amplitud, frecuencia, etc. son los elementos utilizados para definirlos, y de las discontinuidades de estas poder situar las fallas/fracturas existentes. Resulta difícil decir a qué tipo de fenómeno geológico pueden corresponder las reflexiones que aparecen: cambio de nivel geológico,

fracturas o cabalgamientos subhorizontales, cambios de impedancia por metamorfismo y/o esquistosidad, etc.

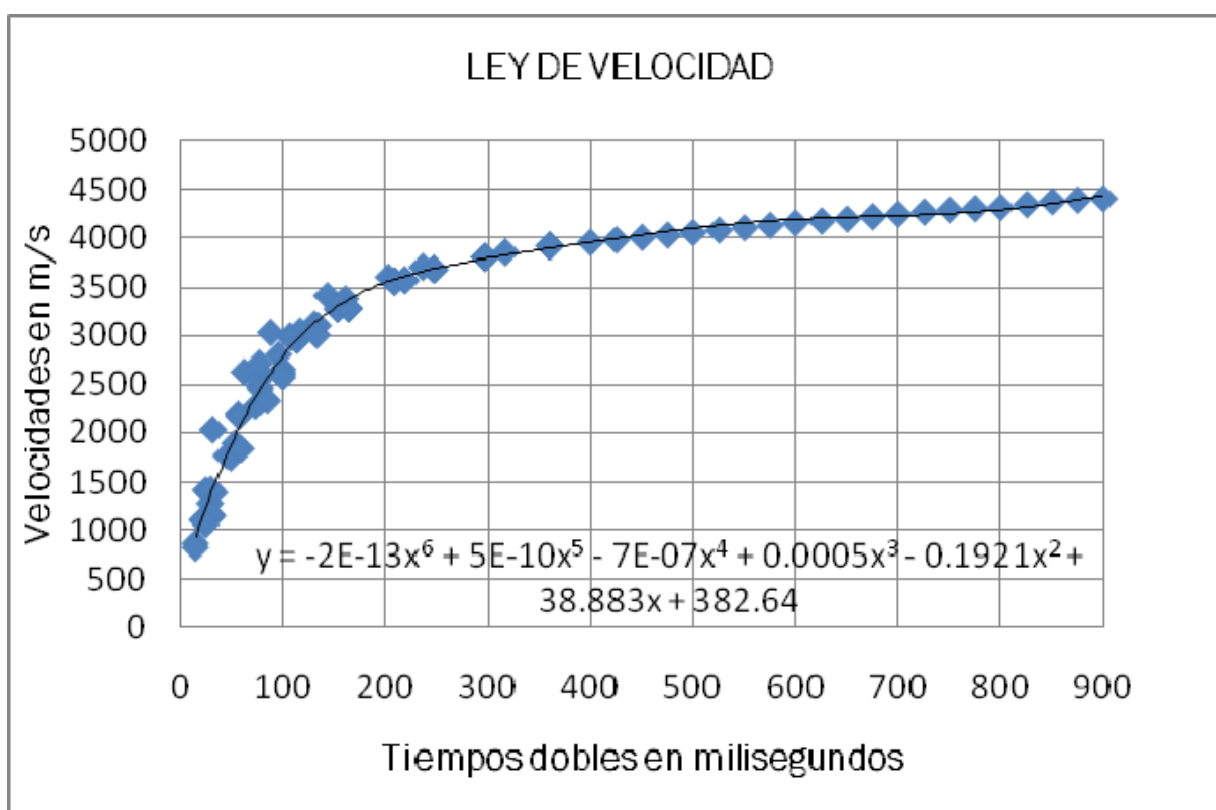
En función de ello se debe considerar esta interpretación como un esqueleto geométrico: Las diferentes superficies de reflexión coloreadas nos dan una idea clara de la posible disposición de los granitos y resultan fundamentales a la hora de definir la red de fallas y/o fracturas dibujadas, así como su importancia y desarrollo.

Como rasgos más destacados de la interpretación realizada caben señalarse los siguientes:

- Se han definido y dibujado 7 horizontes de reflexión.
- Todos ellos se prolongan de forma continua, en unos casos, y discontinua, en otros, a lo largo de todo el perfil. Los criterios generales seguidos para esta diferenciación han sido:
  - Horizontes amarillo y naranja: Reflexiones relacionadas con la zona meteorizada superficial.
  - Horizontes marrones: Corresponden a una zona donde las reflexiones tienen un aspecto de más alta frecuencia que el resto, al mismo tiempo que más discontinuas, lo que podría corresponderse con fracturación.
  - Horizontes verdes: Se trata de una unidad organizada, con un contenido en frecuencias más bajas que la unidad anterior y caracterizada principalmente por reflexiones más continuas que, frecuentemente, aparecen discordantes con la unidad anterior.
  - Horizonte azul: Define un cambio a una facie sísmica de más baja frecuencia con una continuidad importante. Este horizonte parece estar relacionado con algún tipo de cambio significativo, ya que su energía aparente es superior a las reflexiones de su medio. Por esta razón este horizonte sirve de base para diseñar las fracturas a zonas inmediatas, dada su mayor fiabilidad.
  - Los reflectores en magenta, localizados a tiempos superiores, sirven, fundamentalmente, para completar el diseño del conjunto de fallas y/o fracturas detectadas.

- El horizonte rojo podría considerarse como el fondo acústico alcanzado.
- El trazado de este conjunto de reflexiones nos ha permitido diseñar el sistema de fallas y/o fracturas representadas en la Figura 2.

A partir de los análisis de velocidad obtenidos en el Procesado, se ha obtenido la ley de velocidad representada en la Figura, empleada para convertir en profundidad las interpretaciones sísmicas en tiempos (Sección Migrada interpretada).



**Figura 3** – Ley de velocidad.

#### 4. Resultados.

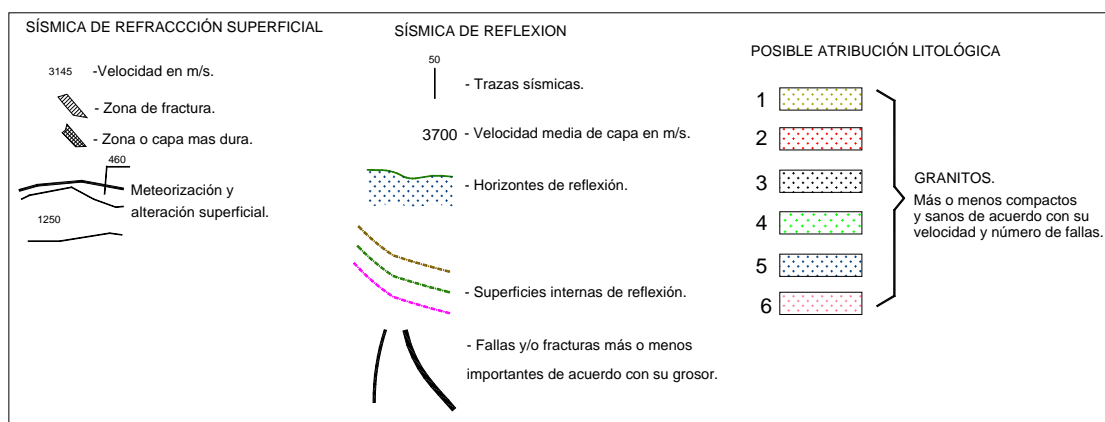
Aplicando la Ley de Velocidad descrita, se ha realizado la correspondiente transformación de la interpretación de la Sección Migrada de tiempos a profundidades, obteniéndose el Corte Sísmico representado en la Figura 5.

En el gráfico correspondiente se han tratado de señalar con la mayor claridad posible los resultados obtenidos, representando la red de fallas y fracturas detectadas y las diferentes unidades geosísmicas con sus correspondientes velocidades.

Con objeto de facilitar la descripción de los resultados obtenidos, se han numerado las diferentes “unidades sísmica” detectadas, tal como puede verse en la leyenda del plano de resultados (Figura 4).

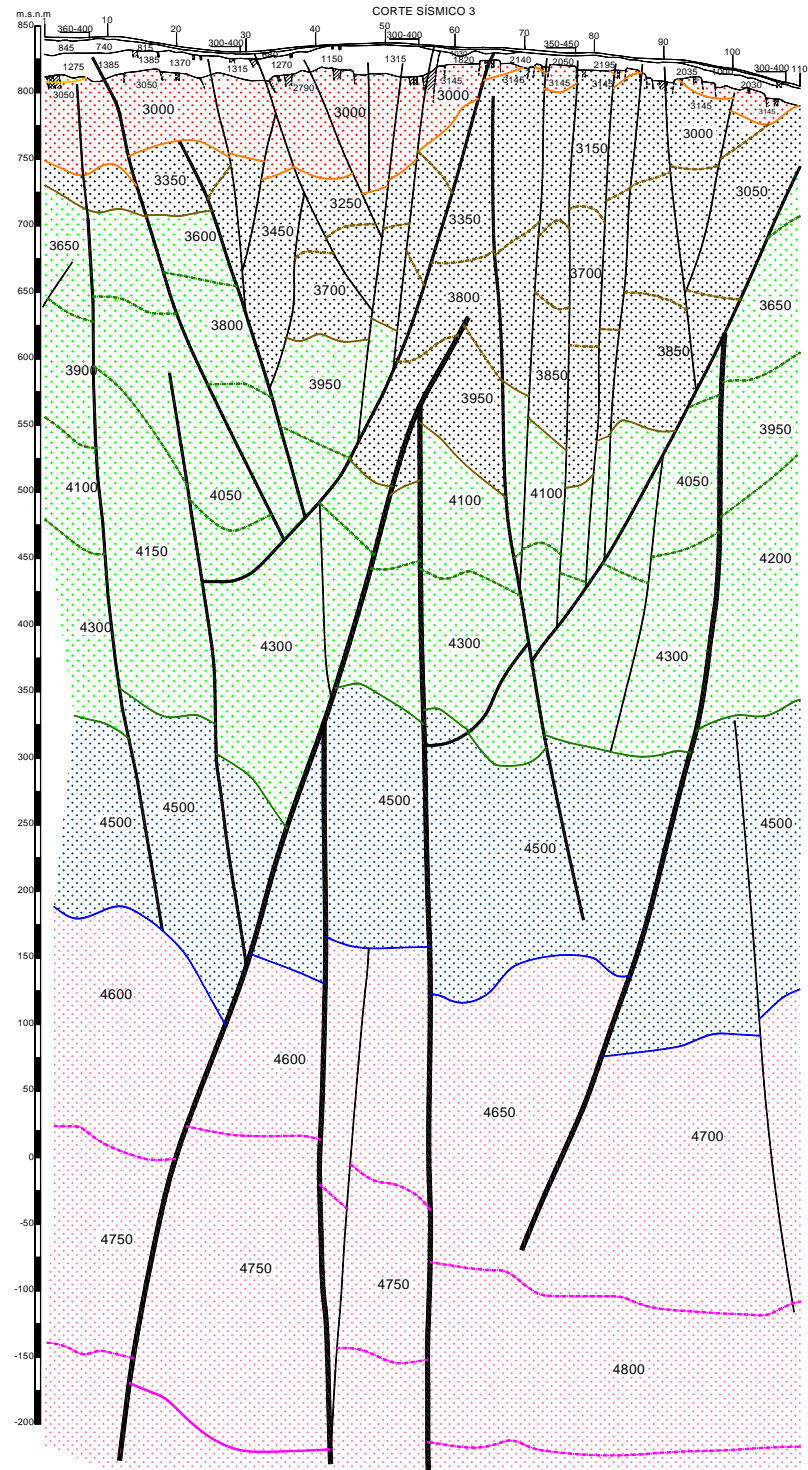
Como puede observarse esta diferenciación va asociada más a variaciones en el “carácter sísmico” detectado en la Sección Migrada que a cambios en las velocidades sísmicas.

Se han clasificado las fallas y fracturas atendiendo a su posible importancia y desarrollo dibujándolas con diferente grosor. Su mayor o menor importancia viene asociada, en general, a varios factores: tamaño de los “saltos” en las diferentes facies sísmicas, número de unidades que atraviesan, disposición geométrica, etc.



**Figura 4 – Leyenda Corte Geosísmico.**





**Figura 5 – Corte Geosísmico.**

Como rasgos más destacados caben señalarse los siguientes:

- Asociados a los horizontes sísmicos descritos en la interpretación de la Sección Migrada se han diferenciado 6 unidades geosísmicas (el horizonte rojo, fondo acústico no se incluye).
- Dentro de estas unidades aparecen, de forma más o menos continua, reflexiones internas que definimos como superficies internas de reflexión.
- La naturaleza litológica de estas unidades no está clara: todas corresponden a granitos y su diferenciación sísmica puede ir asociada a su génesis.
- La disposición de la unidad designada como 5, permite apreciar con claridad la red de fallas y fracturas, diferenciándose fácilmente las que consideramos más importantes de las menos desarrolladas.
- Por otra parte, la unidad 3 aparece surcada por numerosas fallas y fracturas lo que nos indica que está muy fracturada.
- La unidad 1 casi no aparece, está englobada casi en su totalidad en la refracción superficial más detallada, por lo que resulta innecesaria su representación.
- La unidad 2 viene definida en gran parte por la refracción superficial y en ella puede observarse la correlación entre las fallas y fracturas detectadas con refracción y las provenientes de la reflexión.
- La unidad 6 aparece como substrato y con sus superficies internas de reflexión se puede completar la red de fallas y fracturas detectadas.
- Lo mismo cabe decir de la unidad 4: las superficies internas de reflexión incluidas en ella sirven para definir la continuidad de las fallas y fracturas detectadas.
- Las velocidades obtenidas nos indican que se pasa de granitos bastante sanos en el horizonte 2 a granitos muy sanos y compactos en el horizonte 6, pero surcados por bastantes fallas y fracturas.

Desde un punto de vista hidrogeológico como rasgos generales tenemos:

- Las capas superficiales de granito muy meteorizado se han obtenido con la refracción y son permeables por porosidad.
- Bajo este nivel alterado aparecen las primeras reflexiones interpretables. Configuran la unidad 2 que de acuerdo con su velocidad debe ser prácticamente impermeable.
- Sin embargo la unidad 3 con velocidades que indican la presencia de granito sano, está surcado por numerosas fallas y/o fracturas (especialmente en la segunda parte del perfil), por lo que seguramente será permeable por fisuración.
- La disposición de los diferentes horizontes de reflexión en unos casos y su detección directa en otros, ha permitido definir una importante red de fallas. Toda la masa granítica aparece afectada por grandes fracturas que presentan zonas de trituración y que actúan como colectores de aguas subterráneas de los granitos alterados y fisurados.

En términos generales puede considerarse que las fracturas representadas con mayor grosor deben tener entre 3 y 5 m de desarrollo, las intermedias 1-3 m y las más finas menos de 1 m. La precisión en los accidentes señalados puede estar afectada por un error máximo del 5%.

#### **Referencias Bibliográficas.**

- a) G. Henry. 1997. La Sismique réflexion, Principes et développements. Editions Technip.
- b) Les Vitesses en Sismique Reflexión, J.P. Cordier, Ed. Lavoisier, París, 1982.
- c) Reflection Seismology a tool for energy resource exploration. Kenneth H. Waters. A Wiley-Interscience Publication. 1981.
- d) Hidrología Subterránea de Emilio Custodio. Ediciones Omega..
- e) F. Merchán – M. Higuera. 2001. Sísmica de Reflexión de Alta Resolución aplicada a la ingeniería de túneles. Ingeo Túneles, Serie: Ingeniería de túneles, Libro 4, Capítulo I:

- f) F. Merchán, M. Higuera, J.A. Canas y L.G. Pujades 2001: "Aplicación de la sismica de reflexión a la prospección de acuíferos de baja permeabilidad",. Congreso: Las caras del agua subterránea. Barcelona 2001.
- g) Indices de calidad de macizos rocosos. Diego Fernández de Castro Pérez. Departamento de Morfología del Terreno de la E.T.S.I.C.C.P de la U.P. de Madrid. Año 2000.
- h) Francisco Merchán, Mariano Higuera, José Antonio Abeger, Manuel Espejo: "Definición mediante Prospección Geofísica con Sísmica de Reflexión de estructuras geológicas que pueden funcionar como acuíferos explotables". Oporto 2006