

SISMICA DE REFLEXIÓN DE ALTA RESOLUCIÓN: UNA HERRAMIENTA IMPRESINDIBLE PARA EL DISEÑO DE TÚNELES.

Autores: F. Merchán Alvarez⁽¹⁾, M. Higuera Gil⁽¹⁾, J. Abeger⁽¹⁾.

Procedencia: (1) ORELLANA CONSULTORES S.A. Titulación: Lcdos. en C. Físicas.

PRESENTACION.-

La Prospección Geofísica con **Sísmica de Reflexión de alta resolución**, gracias a su gran poder de resolución, permite obtener una visión, en el dominio distancia-tiempo (sección sísmica), muy exacta y completa del edificio estructural desde casi la superficie del terreno hasta unos setecientos metros de profundidad. Este aspecto, unido a un buen estudio del campo de velocidades permite la transformación en profundidad de las secciones sísmicas, obteniéndose un corte geológico - geofísico muy detallado hasta la profundidad mencionada. Esto hace de ésta técnica geofísica una herramienta muy útil para el estudio de las monteras que han de atravesar los túneles, y su posterior diseño en función de las características geomecánicas de las formaciones obtenidas.

Uno de los problemas fundamentales en el diseño de los túneles es, en muchos casos, las grandes monteras que los recubren asociadas con estructuras geológicas muy complejas.

La aportación de la Prospección Geofísica tradicional para estas obras suele ser escasa y generalmente insatisfactoria: se suelen estudiar las boquillas con sísmica de refracción, se hacen estudios electromagnéticos para tratar de diferencias litológicas, se realizan algunos estudios, generalmente superficiales, de zonas de fracturación, etc.

Sin embargo, la Sísmica de Refracción proporciona un corte geológico – geofísico muy completo, con la distribución de las diferentes litologías, definición de la red de fallas y fracturas, caracterización del macizo rocoso mediante su velocidad sísmica (ondas P reflejadas), grado de fracturación, etc.

En los ejemplos que se adjuntan se pueden apreciar con claridad estas cualidades.

Este tipo de estudios permite además optimizar los datos obtenidos con los sondeos mecánicos que normalmente se realizan en estas obras, al poder realizar una mejor correlación entre ellos e incluso permite aclarar sus discrepancias. Incluso es posible, en algunos casos, reducir su número eligiendo su emplazamiento en las zonas más significativas y necesitadas de un estudio más detallado.

BREVE DESARROLLO HISTÓRICO.-

Hasta hace relativamente poco tiempo, la utilización de la sísmica de reflexión de tipo petrolero a estudios geotécnicos de hasta 600-1000 m de profundidad presentaba serios problemas que la hacía prácticamente inviable. Dado el gran desarrollo alcanzado por esta técnica en estudios petroleros, era deseable su utilización para estudios geotécnicos hasta la profundidad mencionada.

En los últimos años ha habido grandes avances tanto en instrumentación, con en el procesado, informática, etc, que ha hecho posible su aplicación a la Geotecnia.

Así se han desarrollado sismógrafos digitales capaces de registrar muestras, en coma flotante (IFP), cada 250 microsegundos, con gran número de canales y dotados de un gran rango dinámico (hasta 100 dB de ganancia).

Ha sido espectacular el desarrollo informático con la aparición de ordenadores con gran rapidez de cálculo que han permitido un tratamiento de la señal sísmica cada vez más completo de forma relativamente económica. Así, la utilización de coberturas de elevado rango (2400% en adelante) se han hecho comunes, al tiempo que procesados tales como deconvoluciones antes de stack, cálculo automático de estáticas o migraciones no suponen incrementos de costo importantes en el total del procesado.

Otro de los inconvenientes de la utilización de ésta técnica era la fuente de energía empleada, generalmente explosivos, y la necesidad, por tanto, de perforar pozos para la introducción de los mismo, lo que en una topografía abrupta, como la que se suele encontrar en la mayoría de las monteras de los túneles, hacía imposible la utilización del método sin ocasionar daños de importancia en el medio ambiente. Las posibilidades en el manejo de la señal, indicadas algunas en párrafos anteriores, han hecho posible la multiplicidad y repetitividad de la fuente de energía, con lo que sistemas de energía aparentemente más débiles pueden ser usados por su ligereza ya que permite su transporte y manejo en topografías accidentadas y sin originar daños a la ecología del entorno.

Todo ello permite utilizar dispositivos de registro con distancias entre trazas relativamente pequeñas (3 m por ejemplo), lo que unido a la alta resolución que permite el muestreo de los sismógrafos actuales nos da la posibilidad de estudiar las capas más superficiales del edificio estructural, comenzando en los 10-20 primeros metros.

METODOLOGIA.-

Creemos que este artículo no es el espacio oportuno para una explicación detallada del método de **Sísmica de Reflexión de Alta Resolución** (véase IngeoTúneles, Libro 4, capítulo 1), por lo que nos limitaremos a exponer de forma muy resumida la metodología que se sigue generalmente.

El documento fundamental que se produce con esta técnica es la denominada sección sísmica que, de alguna forma, representa las irregularidades del terreno como variaciones en la amplitud de un conjunto de ondas. Estas variaciones de amplitud son debidas a los cambios de la impedancia acústica entre cada uno de los medios en los que se producen las reflexiones.

Esta representación en una escala distancia/tiempo (donde esta última variable sustituye a la profundidad) equivale a un corte geológico con las deformaciones debidas a la velocidad de los medios atravesados. Esto que es totalmente cierto cuando las interfaces entre los distintos medios son superficies subhorizontales, no lo es tanto cuando estas superficies tienen buzamientos importantes (como ejemplo límite recordar que un accidente vertical vendría representado en una sección stack con un buzamiento de 45°), por ello, para resolver este problema, a las secciones stack se les aplica un proceso, denominado migración, que coloca cada uno de los “reflectores” en su posición real, debajo de la vertical.

Tanto para la aplicación de este tratamiento como, sobre todo, para luego poder establecer un corte en profundidad que represente de la forma más aproximada la estructura geológica, es necesario obtener un campo de velocidades lo más preciso posible. Este campo de velocidades que se obtiene normalmente durante el procesamiento de la señal, ya que es necesario para corregir la oblicuidad de los rayos, tiene un nivel de precisión limitado (inferior a la exactitud de la velocidad medida con refracción). Es por ello conveniente complementar estos estudios con la medida de velocidad en sondeos mecánicos.

Llegados a este punto es el momento de realizar uno de los procesos más importantes de la explotación de los datos, esto es, la interpretación de la sección sísmica, ya sea solo “stack” o “migrada”.

Quizás aquí es el momento de exponer el concepto de “carácter sísmico” que consiste en el conjunto de características que diferencian cada una de las reflexiones tales como: amplitud, periodo, continuidad y/o evolución en el espacio, etc. de forma que permiten identificarla y diferenciarla.

Utilizando este carácter sísmico, y aquí entra de forma importante la experiencia del interpretador, se definen cada una de las reflexiones principales que corresponden a las diferentes interfaces, y en función de las discontinuidades de las mismas se establece el conjunto de fallas que forman el edificio estructural. Es importante destacar la importancia que tiene en esta interpretación la discriminación de “ruidos organizados” tales como: difracciones, refracciones reflejadas, etc. que señalan de forma indirecta discontinuidades, cavidades, etc.; una vez definido todo este conjunto de elementos en la sección tiempo, es el momento de aplicarle la transformación en profundidad a través del campo de velocidades. Es también importante destacar que cuanto mejor sea el conocimiento que de la geología de superficie tenga el interpretador, tendrá mejores criterios en la discriminación de las distintas posibilidades que casi siempre ofrece la interpretación de una sección sísmica.

Vista esta exposición podemos concluir que una aplicación racional de la **sísmica de reflexión de alta resolución** incluye la realización de algunos sondeos mecánicos de reconocimiento, que no tienen por que ser previos a la obtención de la sección sísmica, sino que podrían ser posteriores a ella para optimizar sus resultados, limitándolos a los puntos donde dicha sección señalara los problemas más importantes con lo que se puede limitar el número de sondeos a los mínimamente necesarios. Los datos de los sondeos obtenidos a posteriori deben ayudar a redefinir los pequeños fallos que las imprecisiones en el cálculo de las velocidades sísmicas hayan inducido sobre el corte sísmico final.

APLICACIONES PRACTICAS: EJEMPLOS DE ESTUDIOS REALIZADOS.-

En este artículo pretendemos mostrar una serie de ejemplos de lo que la **sísmica de reflexión de alta resolución** puede aportar en la resolución de algunos problemas bastante frecuentes en la geotecnia de obras profundas. Los ejemplos que se presentan se han registrado con las siguientes características:

- 1.- Cobertura 1200% en el ejemplo 1 y cobertura 2400% en los ejemplos 2 y 3.
- 2.- Intertraza en superficie de 2,5 m
- 3.- Longitud del dispositivo: 60 m en el ejemplo 1 y 125 m en los ejemplos 2 y 3.
- 4.- Nº de tiros por posición: dos en avance y dos en retroceso.
- 5.- Intertraza total en subsuperficie de 1,25 m.
- 6.- Longitud de registro: 0,5 segundos, con un muestreo de la señal cada 0,250 milisegundos.

7.- IFP activo.

8.- 2 geófonos por traza en el ejemplo 1, 3 por traza en el ejemplo 2 y 2 por traza en el ejemplo 3.

9.- Procesado estándar, formado fundamentalmente por los siguientes pasos:

- Edición, 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. Hay que tener presente que a la vez que se registra la reflexión se registra la refracción.*
- Recuperación de amplitudes.
- Colección de trazas.
- Análisis de frecuencias.
- Deconvolución.
- Análisis de velocidad.
- Correcciones dinámicas (NMO) y mute.
- Correcciones estáticas.
- Suma de las trazas agrupadas en posición espejo.
- Empleo de filtros F-K, F-X, etc.
- Aplicación de un filtro variable.
- Balanceo.
- Obtención de la sección stack.
- Aplicación de una migración en FX, en Diferencias Finitas, etc. a la sección stack.
- Filtro variable.
- Ploteado de las secciones migradas.

EJEMPLO 1.- TÚNEL DE CARCHUNA.

En el primer ejemplo, túnel de Carchuna, Autovía del Mediterráneo Cadiz-Barcelona, figura 1 sección migrada y figura 2 corte geológico-geofísico, mostramos como se puede definir la situación relativa de una serie de Mantos de las Formaciones Béticas (Manto de Sacratif, Murtas y Alcazar). En este ejemplo observamos como la sísmica de reflexión de alta resolución ayuda a diferenciar entre distintos mantos de corrimiento, que además presentan litologías muy similares en algunos casos; asimismo muestra las zonas de debilidad y de fracturación que se originan a lo largo de las superficies de cabalgamiento cuando estos mantos se van desplazando unos sobre otros. Mediante esta técnica geofísica obtenemos una visión de la tectónica que ha afectado a las distintas formaciones, su

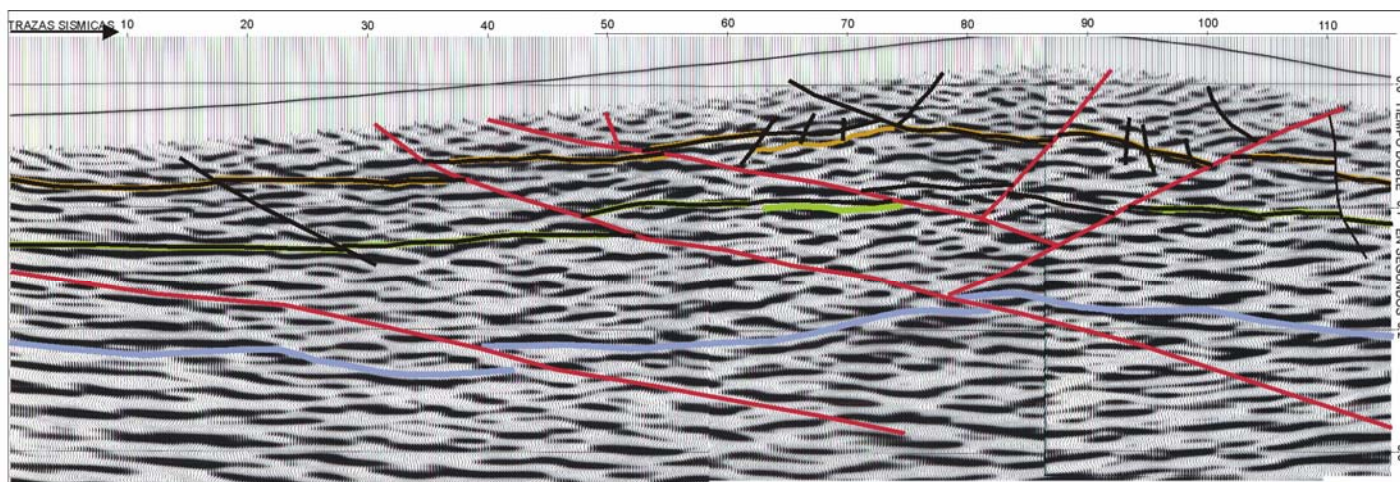


Fig.1.- Sección sísmica Migrada del túnel de Carchuna. Tramo: trazas 1-115.

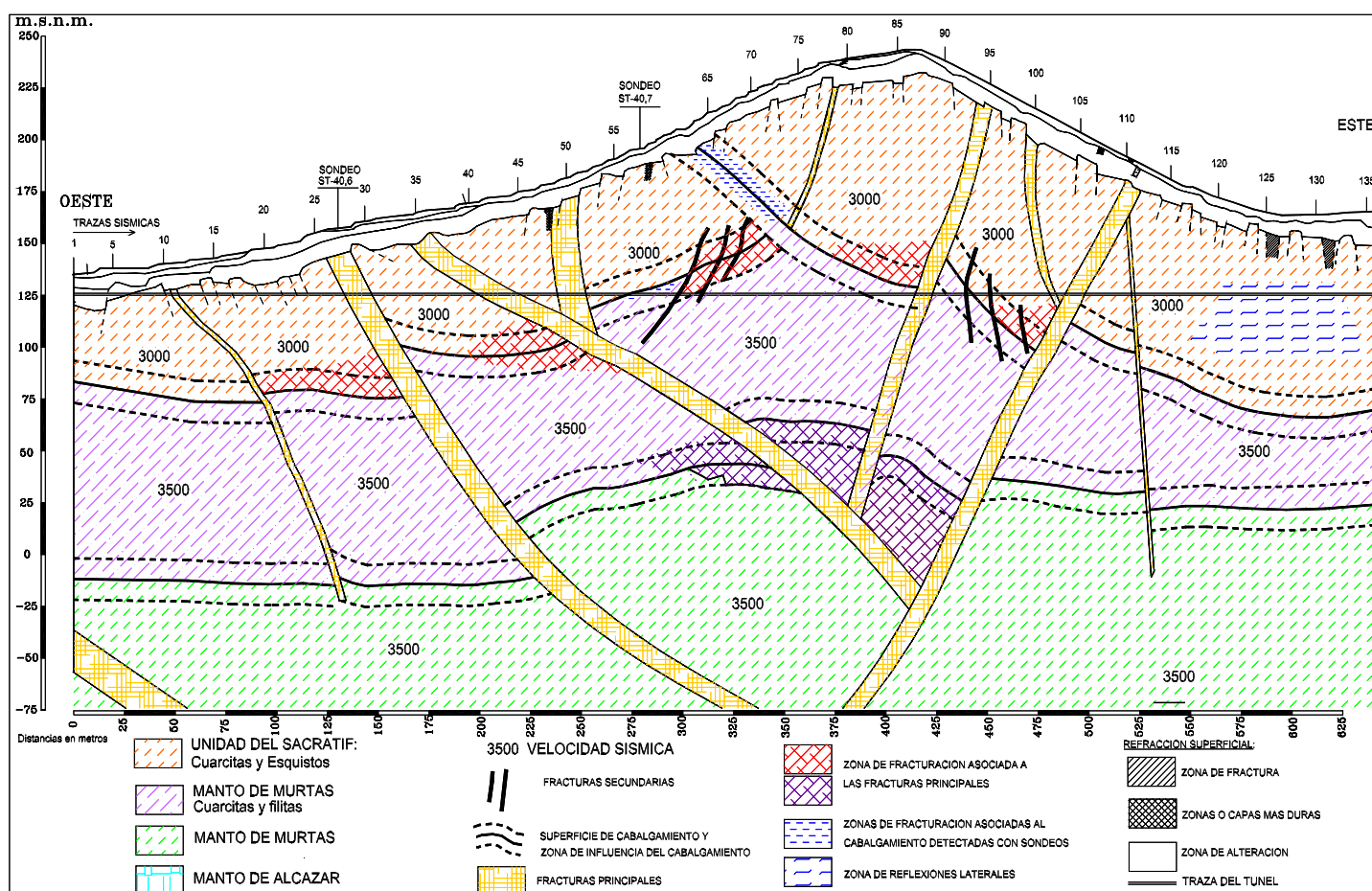


Fig.2.- Corte Geológico-Geofísico del túnel de Carchuna. Tramo superficial y desde la traza 1 a la 135.

disposición estructural, las fallas y fracturas que afectan al conjunto y la velocidad sísmica de los materiales que componen las distintas formaciones, en definitiva hemos podido definir la estructura del macizo estudiado hasta una profundidad de 500 m.

Los diferentes horizontes detectados mediante la sísmica de reflexión (figura 1) corresponden a los mantos de corrimiento antes mencionados (aparte de las fallas y zonas de fracturación asociadas a ellos) datados a partir de los afloramientos geológicos de la zona. Si se observa con detenimiento la figura 1 se diferencian tres niveles energéticos que, de arriba hacia abajo, corresponden a la base del manto de Sacratif (cuarcitas y esquistos) y a dos niveles del Manto de Murtas, que según la geología de la zona estaría diferenciado entre un primer nivel de cuarcitas y filitas y un segundo nivel de calizas recristalizadas y mármoles micáceos. Las superficies de separación entre mantos y niveles de los mismos, a la escala de trabajo, y a pesar de la tectonización y esquistosidad de los materiales, aparecen como superficies continuas y representadas por bandas de energía de frecuencia más baja de lo habitual que deben ser originadas por cambios de impedancia y asociadas, por su carácter sísmico, a zonas de debilidad y/o fracturas asociadas a los cabalgamientos. Este fenómeno se incrementa cuando los horizontes se aproximan a las fallas, lo que hace suponer que el intervalo de zona alterada es más importante. Las salidas de estos cabalgamientos en la superficie están controladas y comprobadas por la cartografía geológica.

La transformación tiempos/profundidad, utilizando el campo de velocidades calculado, origina el corte de la figura 2, donde se puede observar la situación de los distintos mantos y la zona de influencia de los cabalgamientos. Como puede verse la Unidad del Sacratif cabalga sobre sí misma, aflorando dicho autocabalgamiento en el entorno de la traza 65. Dicha unidad se detecta con velocidades medias de capa de 3000 m/s. Las unidades del manto de Murtas se detectan con velocidades más altas, 3500 m/s, con una importante zona de debilidad, debida a una mayor fracturación, entre las trazas 55 y 95. Todas las unidades aparecen afectadas por un conjunto de fallas posteriores a la “puesta en sitio de las unidades”. Como se puede observar, mediante la sísmica de reflexión de alta resolución, la disposición tectónica de las diferentes unidades se ha resuelto satisfactoriamente, sin embargo al no disponerse de medidas de velocidad calibrada en sondeo hace que la precisión en la profundidad de los horizontes sea de un +/- 10%.

EJEMPLO Nº 2. ESTUDIO DE UN CABALGAMIENTO EN LAS PROXIMIDADES DE ORJIVA.

En el ejemplo 2 queremos mostrar como se puede estudiar la continuidad en profundidad de accidentes geológicos cartografiados en superficie con un buzamiento determinado, y

como estos buzamientos van modificándose en profundidad. Este es un problema geológico-estructural que puede estar relacionado con riesgos geológicos (deslizamientos, estabilidad de laderas, etc.) o afectar a construcciones civiles más o menos profundas. El caso representado en las figuras 3 (sección sísmica migrada) y 4 (corte geológico-geofísico) corresponde a un cabalgamiento, cartografiado en superficie con un ángulo de 40° , entre unas filitas y cuarcitas del Manto del Alpujárride sobre unos esquistos masivos del Manto del Nevado-Filábride (Provincia de Granada en las proximidades de Orjiva), existiendo entre ambos mantos una banda de unos 70 m de anchura formada por rocas de contacto (brechas tectónicas, areniscas calcáreas, harinas de falla, etc.).

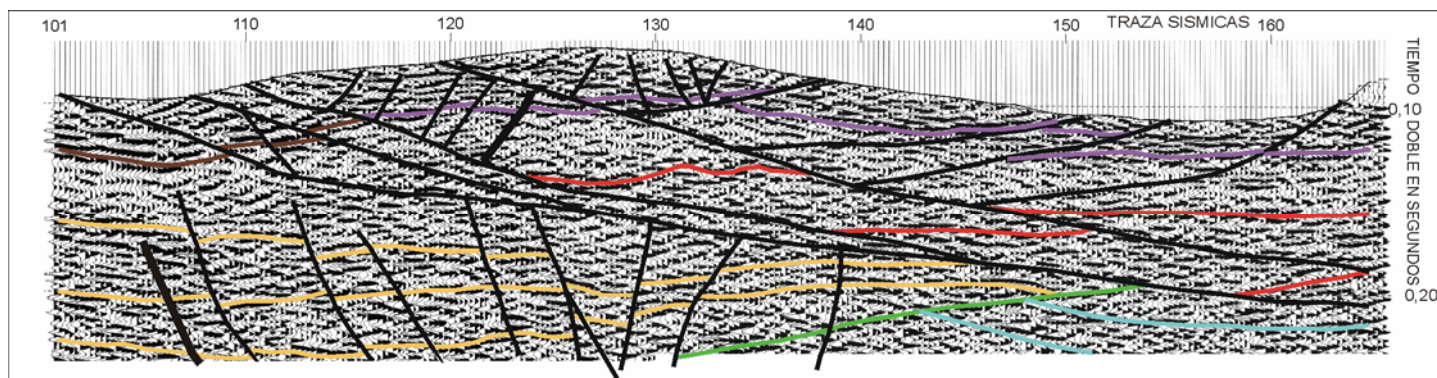


Fig. 3.- Sección Migrada de un cabalgamiento en las proximidades de Orjiva. Tramo superficial

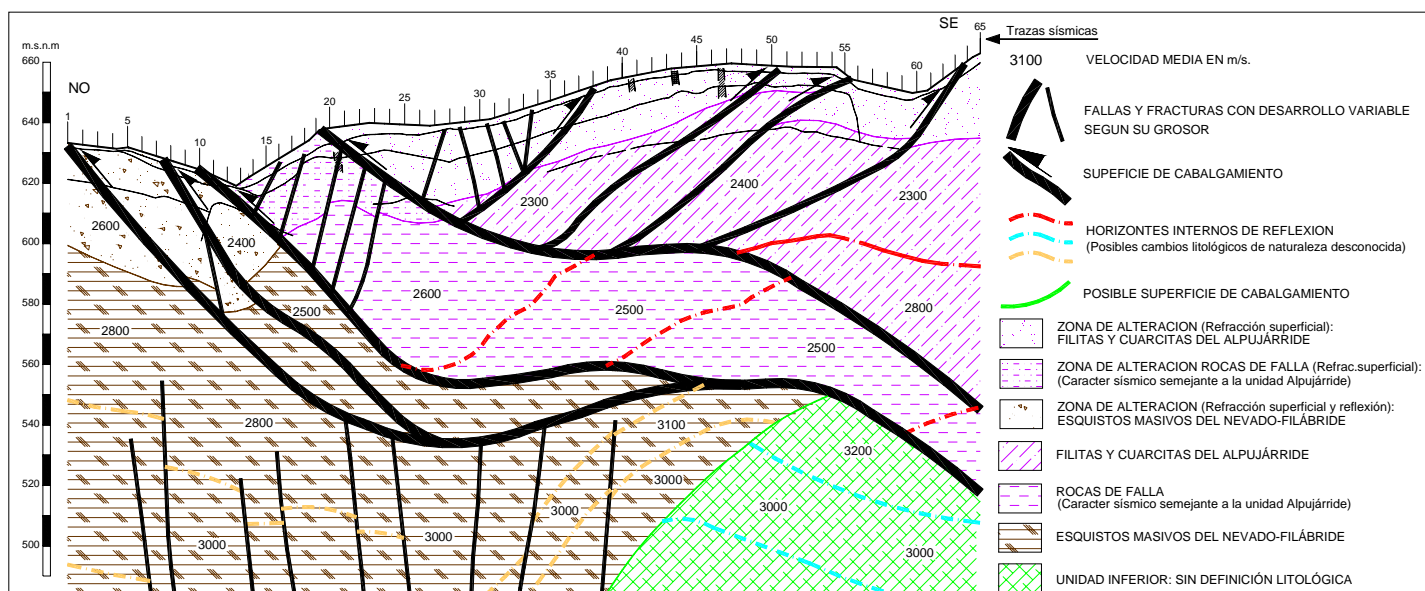


Fig. 4.- Corte Geológico-geofísico de la sección sísmica representada en la figura 3.

La interpretación realizada y representada en la figura 3 se ha basado en criterios de: definición de los horizontes sísmicos de reflexión principales en base a la similitud de su carácter sísmico, definición de las distintas "facies sísmicas", trazado de las fallas a partir de

los saltos de continuidad en las reflexiones (cuando las fallas son subhorizontales estas pueden aparecer como reflexiones), y al ser un cabalgamiento entre mantos hay que tener presente que los contactos mecánicos pueden venir representados por reflexiones. Obsérvese en la figura 3 como a través de las reflexiones que caracterizan la zona superficial (frecuencias más altas) se ven cruzar las reflexiones que hemos asociado a las fallas inversas y que conectan, en superficie, con la cartografía geológica del cabalgamiento. De acuerdo con esta interpretación la base del mismo no está constituida por una única falla sino por tres fallas que afectarían a la Unidad Nevado-Filábride. Por otro lado la base de la Unidad Alpujarride estaría afectada por dos importantes cabalgamientos. Es precisamente entre estos dos accidentes donde está definida la franja de rocas de contacto cartografiada por geología. Es importante resaltar la existencia de un número importante de fallas retrocabalgantes afectando únicamente a la Unidad Alpujarride.

El corte obtenido al transformar la sección tiempos de la figura 3, empleando el campo de velocidades deducido en el procesado, viene representado en la figura 4. Después de la descripción realizada sobre la sección tiempos pocos comentarios caben salvo el indicar como el efecto de la velocidad verticaliza los accidentes, que parecen presentar un buzamiento bajo en la sección tiempos pero al representarse en profundidad ya no son tan suaves (recuérdese lo comentado en párrafos anteriores, un accidente vertical en la realidad, en una sección tiempos “no migrada” aparece como una reflexión a 45°).

EJEMPLO Nº 3. TUNEL DE VANDELLOS.

Finalmente en el tercer ejemplo queremos mostrar como funciona la sísmica de reflexión de alta resolución en el estudio de un macizo homogéneo, en este caso el estudio de un macizo calcáreo (Túnel de Vandellós).

Al tratarse de un túnel de más de 1,5 Km de longitud solo hemos representado unos 300 m para poder mostrar en mayor detalle los resultados obtenidos. En la figura 5 (sección migrada) observamos como se diferencian una serie de reflexiones principales, amarilla, naranja, azul, etc. que separan niveles de carácter sísmico marcadamente diferente, tanto por su frecuencia como por la continuidad y evolución en el espacio de la señal, estos diferentes niveles presentan distintos valores de velocidad sísmica, variando desde los 2000 m/s a velocidades superiores a 3500 m/s. Como puede observarse entre los horizontes azul, que parece el más energético, y verde y los horizontes amarillo y naranja aparecen en la

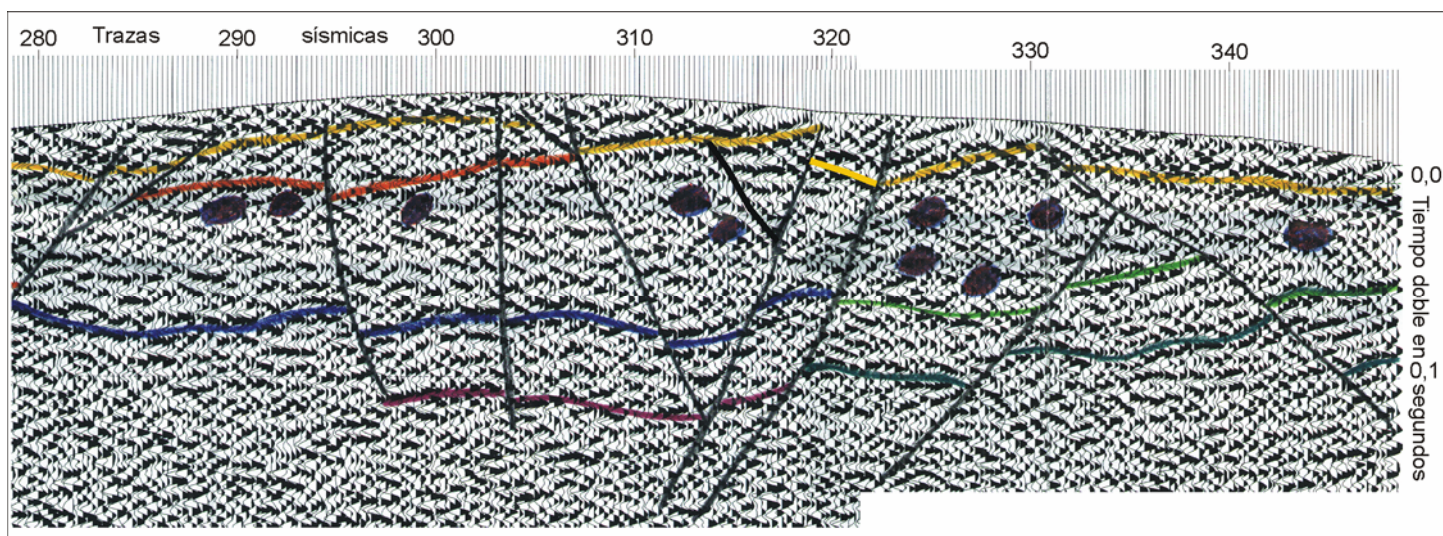


Fig. 5.- Sección sísmica del túnel de Valdellós (vista parcial).

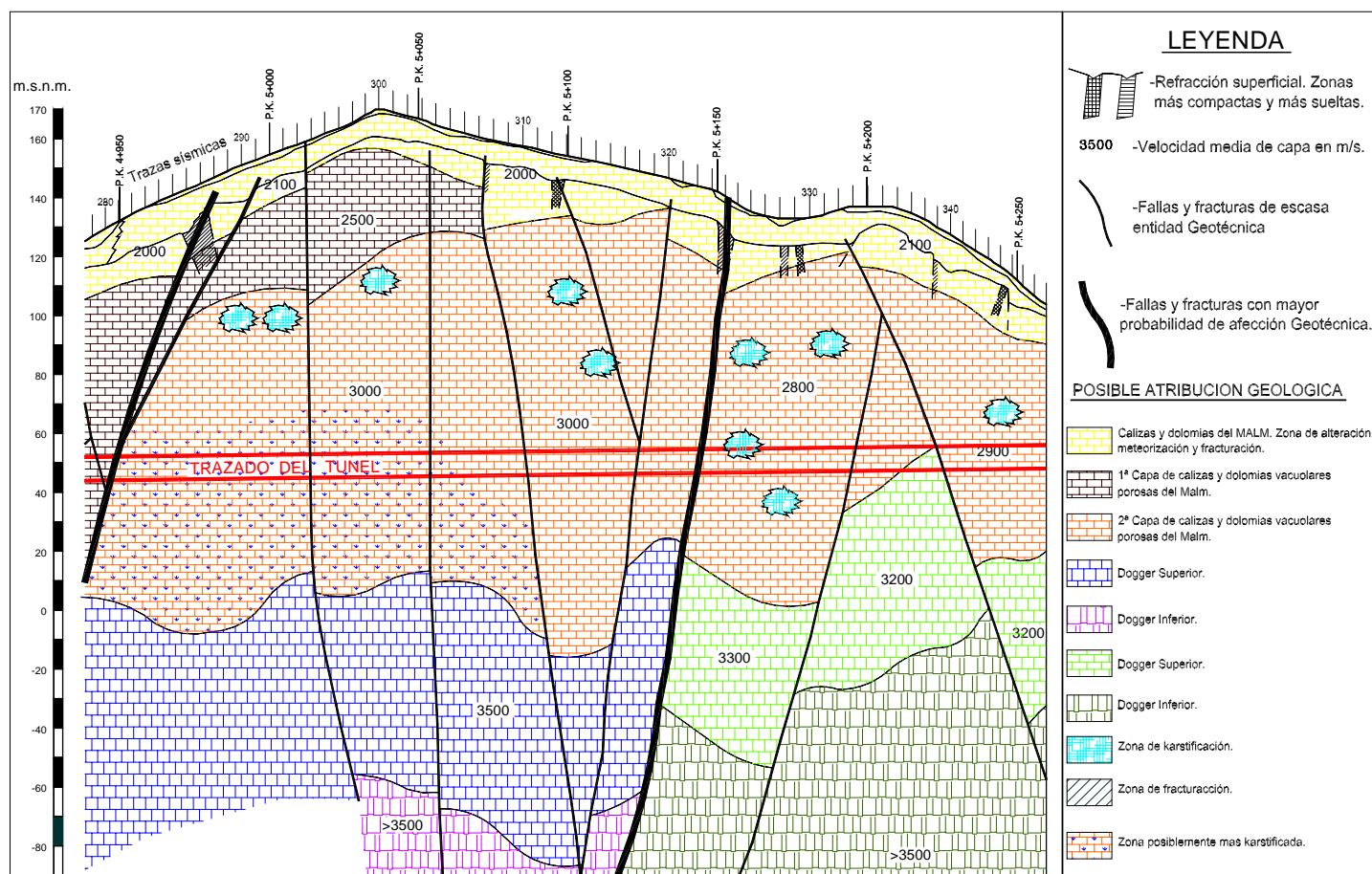


Fig. 6.- Corte Geológico-geofísico de un tramo del túnel de Valdellós.

sección residuos de hipérbolas y refracciones reflejadas que pueden estar relacionadas con zonas altamente karstificadas y que han sido señaladas en la sección como círculos azules.

De esta forma, en macizos supuestamente uniformes, la sísmica de reflexión permite diferenciar distintos niveles según sea su velocidad sísmica, y esta variación suele estar asociada, como en este caso, a una mayor porosidad, mayor presencia de karstificación, fracturación, aumento o disminución de efectos vacuolares, etc.

CONCLUSIONES.-

Los tres ejemplos mostrados son solo eso, un ejemplo de lo que la sísmica de reflexión de alta resolución, apoyada con sondeos mecánicos y medidas de velocidad en sondeos, puede aportar en la investigación del subsuelo y la ayuda que puede representar a la hora de diseñar un túnel es sus distintos aspectos.

Esta técnica geofísica exige de los técnicos que la apliquen un conocimiento exhaustivo de sus fundamentos, una intensa formación en la aplicación de los modernos programas de procesamiento que permiten un amplísimo tratamiento de la señal y, finalmente, una experiencia más que contrastada en su interpretación. Si no se actúa de esta forma convertiremos una técnica poderosa y resolutive, como ya lo ha demostrado la investigación petrolera, en una fantasía de los geofísicos.