

## Tomografía sísmica vertical inversa 2.5D alrededor del sondeo científico Almera-1, ICTJA-CSIC, Barcelona

### *2.5D downhole tomography around the Almera-1 borehole, ICTJA-Barcelona.*

T. Teixidó <sup>(1)</sup> y M. J. Jurado <sup>(2)</sup>

1 Instituto Andaluz de Geofísica (IAG), Universidad de Granada, (Spain), ([tteixido@ugr.es](mailto:tteixido@ugr.es)).

2 Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera CSIC, Barcelona (Spain), ([mjjurado@ictja.csic.es](mailto:mjjurado@ictja.csic.es)).

**Resumen:** En 2011 junto al Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera-CSIC, en Barcelona, se perforó un sondeo científico con el objeto de disponer de una infraestructura destinada a la investigación con sondas de testificación geofísica, monitorización de sondeos, la formación especializada y también para la exploración del subsuelo urbano. La extracción de testigo continuo y un completo estudio mediante sondas de testificación geofísica del ICTJA-CSIC, permitieron caracterizar la sección geológica, estructuras atravesadas y características hidrogeológicas en el sondeo Almera-1. Se presentan aquí los resultados obtenidos en una exploración sísmica de la estructura en el entorno del sondeo y el reconocimiento de la estructura en la que está emplazado el mismo. En este contexto se planteó una tomografía sísmica vertical inversa pseudo-3D (o 2.5D), cuyo dispositivo experimental, metodología y resultados son objeto de este trabajo. Se define la estructura en el entorno del sondeo y se establece una correlación entre las respuestas geofísicas y los distintos tramos de materiales reconocidos en el subsuelo.

**Palabras clave:** perforación científica, testificación geofísica, perfiles sísmicos verticales (VSP), métodos sísmicos en sondeos, métodos sísmicos pseudo-3D.

**Abstract:** A scientific borehole was drilled in 2011 adjacent to the Institute of Earth Sciences Jaume Almera-CSIC in Barcelona. The main interest and objective was the need of a dedicated infrastructure for borehole geophysics research, geophysical logging, downhole monitoring and specialized training. Also the exploration of the subsurface geology in a urban area. Continuous wireline coring and a complete borehole geophysical logging program carried out by the ICTJA-CSIC borehole research group provided us with a the geological, structural and hydrological properties characterization at Almera-1 borehole. In this contribution we present the results of a seismic survey carried out to outline the structure and surrounding geometry beyond Almera-1 borehole. A vertical reverse pseudo-3D (2.5D) seismic tomography acquisition was undertaken. The results that allowed us to define the geological structure and a correlation between the different geological units characterized in the borehole and their geophysical and seismic image.

**Key words:** scientific drilling, geophysical logging, vertical seismic profiles (VSP), borehole seismics, pseudo3D seismic methods.

### INTRODUCCIÓN

Se perforaron 2 sondeos Almera-1 y Almera-2 para la creación de una infraestructura de investigación del subsuelo, de ensayos, calibración y experimentación con sondas geofísicas y docencia especializada, es decir un laboratorio del subsuelo. El sondeo Almera-1, perforado en 2011, forma parte de esa infraestructura y laboratorio. Actualmente se desarrollan estudios sobre la geología y petrofísica de los materiales atravesados y también se elaboran los datos de monitorización registrados en el sondeo en diferentes experimentos (Jurado, 2014, Crespo y Jurado este volumen). La Figura 1 muestra la ubicación del sondeo Almera-1 junto al edificio del ICTJA-CSIC y el dispositivo experimental de la exploración sísmica del subsuelo realizada en el entorno del sondeo.

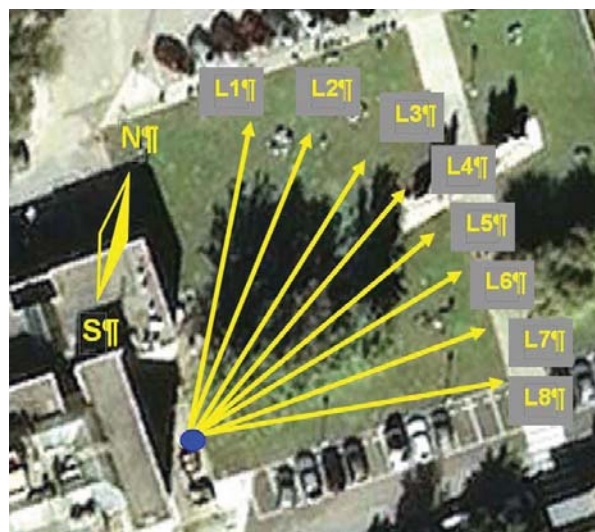


FIGURA 1. El sondeo Almera-1 (punto azul) junto al edificio del ICTJA-CSIC. Las líneas amarillas representan las 8 líneas sísmicas que pudieron adquirirse al entorno del sondeo.

Se planteó una exploración sísmica del entorno del sondeo mediante tomografía sísmica vertical inversa (tomografía *down-hole* o *reverse seismic vertical profiles RSVP*) trazando 8 líneas en distintas orientaciones (Fig.1) que permitían analizar un volumen significativo de subsuelo.

## ADQUISICIÓN DE DATOS

En la Fig.1 se muestra que la parte accesible para la toma de datos estaba limitada al sector NE que cubre unos 70° angulares. La primera línea (L1) se orientó al Norte y las demás rotadas 10°E respecto de la anterior y una longitud de 27 m. El sondeo se instrumentó con un *array* de 8 geófonos (Fig. 2a). En la Fig. 2.2b se presenta la densidad con que se realizó la adquisición.

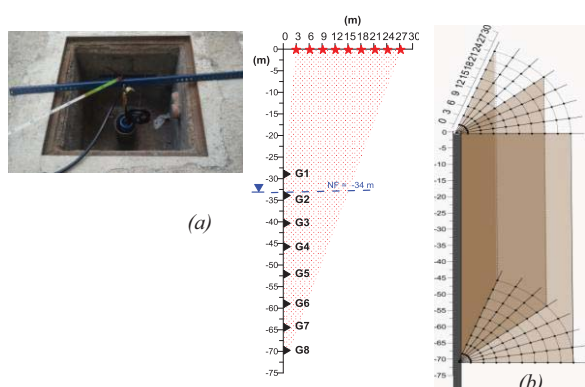


FIGURA 2. (a) Esquema de toma de datos para una determinada línea sísmica. Cada punto sensor es un hidrófono de tres componentes y espaciado entre sensores 6 m. El primero se situó a 28.77 m de profundidad y el último a 70.77 m. Los disparos se realizaron cada 3 m; empezando el primero a 3 m del eje del sondeo y el último a 27 m del mismo. En (b) se muestra la cobertura que proporciona la adquisición y procesado realizadas y el espaciado de muestreo teórico

El equipo utilizado fue un sismógrafo de 24 canales (*Geode*, de *Geometrics Inc.*) conectado al array de sensores sísmicos con 8 hidrófonos de 15 Hz y 3 componentes. Los disparos se realizaron en puntos definidos del suelo con un martillo sísmico de 4 kg de masa; la Tabla 1 muestra los parámetros más relevantes de la adquisición.

TABLA I. Parámetros de adquisición de los datos.

Número de muestras / traza	16,384
Número de canales/ registro	24
Intervalo de muestreo	21 $\mu$ s
Tiempo de escucha / registro	300 ms
Filtros en campo	No
Tamaño del registro	1.422 KB
Número de tiros	72 (9 tiros por línea)

## METODOLOGÍA Y PROCESADO DE DATOS

Si bien los RSVP 3D o 2.5D vienen aplicándose desde hace una década (Li *et al.*, 2003), su aplicación a objetivos superficiales es muy limitada y por ello este estudio es novedoso. En este experimento la

tomografía sísmica pseudo-3D se ha realizado en dos fases. En una primera se han calculado los tres modelos de velocidad  $V_p(x,z)$ ,  $V_{s_v}(x,z)$  y  $V_{s_H}(x,z)$  para cada uno de los 8 perfiles. En una segunda fase, se han interpolado espacialmente los resultados; por ejemplo  $V_p(x,y,z)$ . Para la obtención de los modelos 2D se ha utilizado el programa Rayfract® (*Intelligent Resources Inc.*) que aplica un método de inversión basado en el cálculo de las trayectorias de los rayos según la ecuación eikonal (Schuster and Quintus-Boz, 1993). Mientras que el tratamiento pseudo-3D se llevó a cabo con programas propios y estándares de ofimática.

El tratamiento de datos se inicia con las lecturas de los tiempos de primeras llegadas de cada tiro en los correspondientes geófonos (Fig. 3) y clasificación por componente al que se asocian. En segunda instancia se establece la geometría del dispositivo experimental para cada uno de los 8 perfiles.

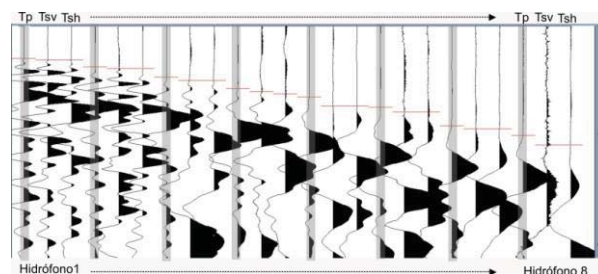


FIGURA 3. Lectura de los tiempos de primeras llegadas para un disparo situado a 3 m del sondeo. En el eje horizontal las trazas (24) que corresponden a las 3 componentes que se registran para cada uno de los 8 geófonos. En el eje vertical los tiempos de propagación (en ms). Se han marcado en gris los 8 canales correspondientes a la componente asociada a la llegada de ondas P y cuyos respectivos tiempos de llegada ( $T_p$ ) son los primeros que se registran en los sensores.  $T_{sv}$  y  $T_{sh}$  corresponden a las lecturas de los tiempos de llegada de las ondas S.

A grandes rasgos, el método inverso consiste en calcular modelos de velocidades con los que se trazan los rayos correspondientes a la geometría experimental disparo-sensor. Dado que las trayectorias de estos rayos llevan incorporados los tiempos de tránsito por el modelo, al ir comparando estos tiempos con los tiempos experimentales, se va obteniendo información matemática para modificar el modelo de velocidades  $V(x,z)$  y generar nuevos rayos. El proceso iterativo termina cuando la diferencia temporal entre los tiempos experimentales y teóricos es menor que un valor de corte; entonces se da por válido el modelo final. En la Fig. 4 se muestra el proceso seguido para obtener del modelo final de velocidades de las ondas P del perfil L8.

Para el procesado de los datos correspondientes a los trenes de onda  $S_v$  y  $S_H$  se ha aplicado la misma metodología, pero se han modificado ligeramente los parámetros ya que se trata de ondas de menor frecuencia que se propagan a menor velocidad. En la Fig. 5 se presentan los modelos finales de las ondas  $S_H$  para los 8 perfiles sísmicos.

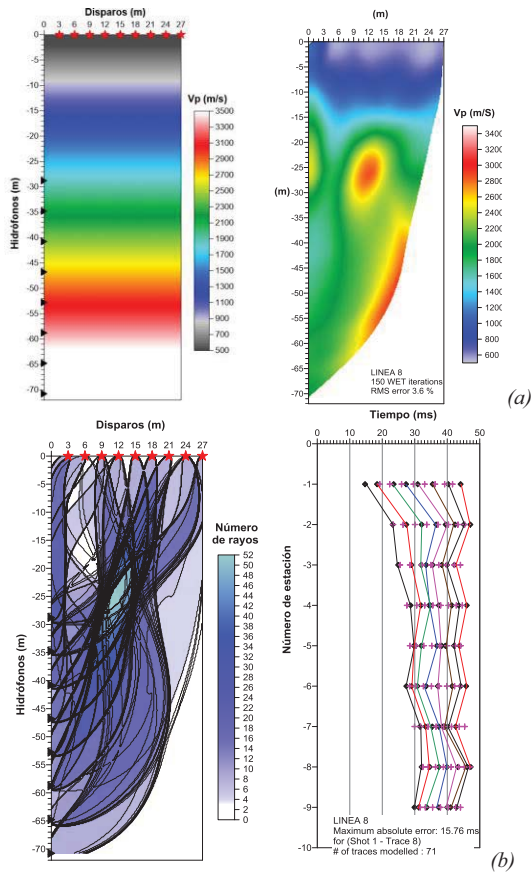


FIGURA 4. (a) Modelo inicial de velocidades (gradiente) de las ondas P, construido a partir de las velocidades aparentes mínimas y máximas; y modelo final  $V_p(x,z)$  después de 150 iteraciones. (b) Trazado de rayos resultante de la geometría del experimento y de las velocidades obtenidas del modelo final. A la derecha, diferencias entre tiempos experimentales y calculados. - línea L8-

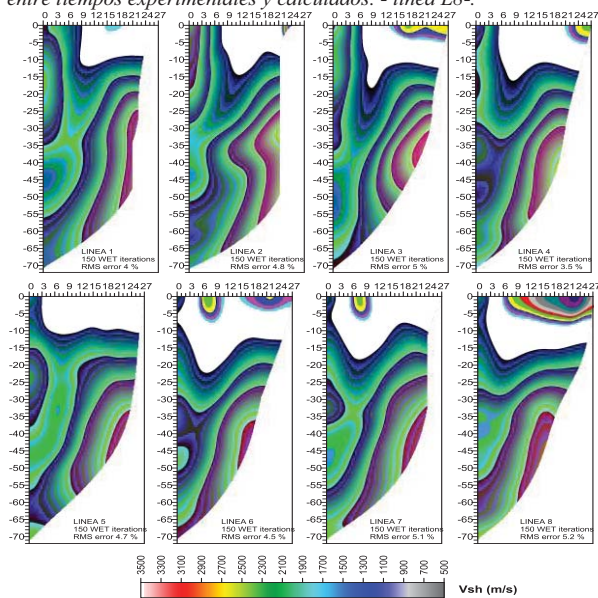


FIGURA 5. Modelos resultantes  $V_{SH}(x,z)$  de los 8 perfiles sísmicos

## RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Los tres campos de velocidades proporcionan un modelo geofísico que puede interpretarse en términos de estructura geológica del subsuelo objetivo de la exploración. En primer lugar se realiza una evaluación

de la anisotropía del terreno usando el porcentaje de variación de la velocidad de las ondas  $S_H$  frente a las ondas  $S_v$  mediante la expresión:

$$A(x,z) [\%] = \frac{(V_{sv} - V_{sh})}{V_{sv}} * 100 ; A \text{ es el grado de anisotropía en } \%$$

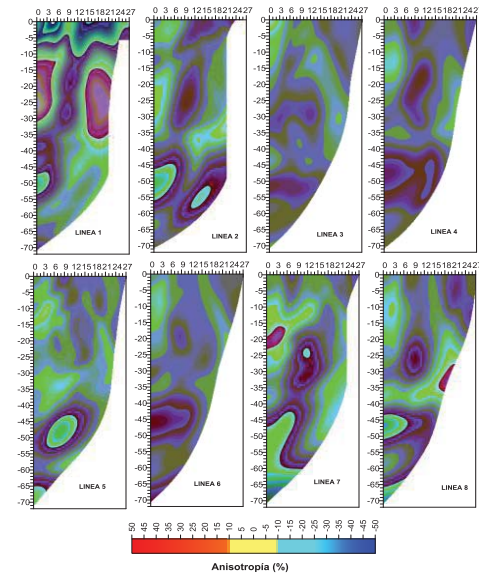


FIGURA 6. Anisotropía obtenida para los 8 perfiles sísmicos

La escala de representación de la Fig. 6 se ha establecido para diferencias entre las velocidades de cizalla que excedan un  $\pm 10\%$ . Exceptuando el primer perfil, apenas se observan diferencias significativas. Debe indicarse que en la ubicación del perfil se encuentran soterradas diversas instalaciones del edificio. Muy probablemente los datos registrados para este perfil se han visto afectados por conversiones de las ondas P. Esta explicación se ve apoyada por el hecho de las anisotropías se sitúan en la zona más superficial del perfil, por encima de los 35 m de profundidad. De modo que un primer resultado es que la porción del subsuelo estudiada no presenta anisotropía, excepto en las zonas con alteración antropogénicas.

Un segundo análisis se ha centrado en las relaciones  $V_p/V_s$  a partir de las cuales se obtienen los módulos elásticos. Se han utilizado como velocidades  $V_s$  los módulos de los vectores de componentes ( $V_{SH}$ ,  $V_{SV}$ ). Los valores  $V_p/V_s$  elevados (rojo en la Fig. 7) son indicio de anomalía que se puede estar ocasionada por la deformación y/o alteración de la roca que da lugar a que la velocidad de las ondas S se reduzca en mayor medida que la velocidad de las ondas P (Mueller *et al.*, 1991). Los valores bajos  $V_p/V_s$  (azul) corresponderían a roca íntegra no alterada.

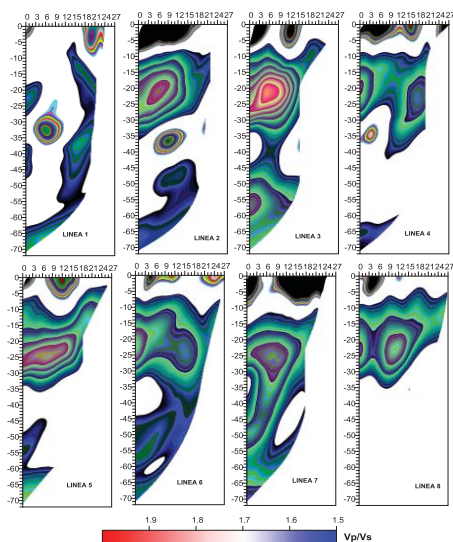


FIGURA 7. Relaciones  $V_p/V_s$  para los 8 perfiles sísmicos

A modo de ejemplo presentamos dos modelos 2.5D (Fig. 8) a partir de las velocidades de las ondas P y las relaciones  $V_p/V_s$ . Ambos han sido obtenidos calculando las coordenadas espaciales de cada perfil y construyendo la nube de puntos que engloba a la propiedad representada interpolando los datos en una malla regular.

En el modelo de  $V_p$  pueden identificarse zonas diferenciadas que se corresponden con las unidades geológicas y características estructurales y estratigráficas definidas en el sondeo Almera-1 (Jurado 2014). Se observa un nivel superficial poco consolidado y con velocidades que se corresponden con los materiales del Cuaternario más reciente, sobre unos materiales más compactos, también del Cuaternario. Se reconoce una discontinuidad subvertical a partir de una zona de baja velocidad (flecha blanca Fig. 8), y buzamiento N30°E. Se interpreta en relación con una zona de falla reconocida y estudiada en el sondeo Almera-1 que afecta a los materiales del Paleozoico en el punto de la perforación. Junto a una fracturación intensa, también asociada a la misma niveles una mayor porosidad y permeabilidad a nivel de las rocas carbonáticas (calizas del Devónico en este punto). Para la caracterización de la zona de falla pueden analizarse además las velocidades en el volumen 2.5D en el que se aprecia que los gradientes de velocidades muestran un gradiente creciente de velocidades al aumentar la distancia a la zona de falla interpretada.

Sobre las imágenes  $V_p/V_s$  de la Fig. 8, se pone de relieve además una zonación geomecánica de los materiales 3 niveles que corresponden de techo a muro al Cuaternario más reciente, Cuaternario y Paleozoico deformado. Se complementa así la información sobre las geometrías de las estructuras y cuerpos reconocidos en el sondeo Almera-1.

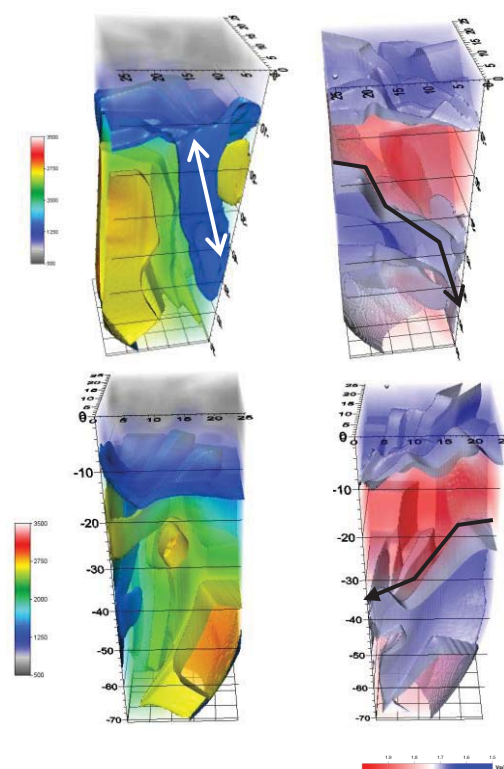


FIGURA 8. A la izquierda dos imágenes del modelo  $V_p$  2.5D campo de velocidades obtenido mediante tomografía sísmica inversa. A la derecha relación  $V_p/V_s$  del volumen estudiado.

## CONCLUSIONES

Este estudio constituye un ejemplo de cómo una exploración geofísica 3D y su integración y calibración con datos de sondeos permite definir la estructura y la continuidad y extensión espacial de fallas en el subsuelo.

## AGRADECIMIENTOS

A José Crespo por su colaboración en la adquisición de datos sísmicos. Proyecto: PNIDI-CGL2010-21568

## REFERENCIAS

- Jurado, M. J., 2014. Scientific drilling in the campus: slimhole logging, coring and monitoring. Schlumberger SIS Forum Abstracts, Barcelona.
- Li, Y., O'Brien, J., Mallick, B., Zhang, J., Wang, D., Barberan, C., Dushman D., 2003a, Tomographic velocity determination of the sedimentary and salt flank images using multifarious VSP data, **8th** Internat. Congress of Brazilian Geophys. Soc. in CD-ROM.
- Mueller, M. C., 1991, Acquisition of shear velocity information with the dipole array sonic tool (in the Gulf Coast Tertiary of Texas): 61st Ann. Internat. Mtg Soc. of Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 127-132.
- Schuster, G. T., Quintus-Bosz, A., 1993. Wavepath eikonal travelttime inversion: Theory. Geophysics 58, 1314-1323.