

Investigando la estructura litosférica en la Península Ibérica y sus márgenes: tres décadas de perfiles sísmicos profundos

Josep GALLART ¹, Jordi DÍAZ ¹ y Diego CÓRDOBA ²

¹ Instituto de Ciencias de la Tierra «Jaime Almera», CSIC Barcelona

² Departamento de Geofísica y Meteorología, Universidad Complutense, Madrid

RESUMEN

En los últimos 30 años, se han llevado a cabo en la Península Ibérica y sus márgenes continentales múltiples proyectos de investigación para caracterizar la estructura litosférica mediante experimentos de perfiles de sísmica de reflexión multicanal y de sísmica de refracción y reflexión de gran ángulo. En este trabajo se compendian cronológicamente más de 50 proyectos efectuados en dominios terrestres y marinos, y se compilan más de 100 referencias bibliográficas de trabajos basados directamente en el análisis de los datos sísmicos.

Palabras clave: estructura litosférica, margen continental, perfiles sísmicos, sísmica multicanal, sísmica de refracción y reflexión.

Investigating the lithospheric structure of the Iberian Peninsula and its margins: three decades of deep seismic profiles

ABSTRACT

In the last 30 years a great number of research projects have been carried out in the Iberian Peninsula and its continental margins, to characterize the lithospheric structure based on experiments of multi-channel seismic reflection, and refraction / wide-angle reflection profiling. In this work we summarize in chronological order more than 50 projects developed in terrestrial and marine domains, and more than 100 references are compiled of papers directly based on the analysis of the seismic datasets.

Keywords: lithospheric structure, continental margin, seismic profiles, multichannel seismic, seismic refraction and reflection.

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la estructura interna, a escala litosférica, de una determinada región terrestre es fundamental para comprender su comportamiento geodinámico y para validar cualquier modelo evolutivo. Los estudios basados en métodos sísmicos proporcionan parámetros físicos (velocidades, impedancias,...) espe-

cialmente relevantes para caracterizar la estructura profunda. La importancia de efectuar tales estudios es bien reconocida internacionalmente desde hace varias décadas, y su desarrollo tanto a nivel académico como en exploración de recursos naturales ha sido notable a partir de los años 70, coincidiendo con la disponibilidad de instrumentación adecuada de adquisición de datos.

En España, el interés por efectuar estudios sísmicos en el ámbito peninsular se plasmó con el establecimiento en 1971 de la Comisión Nacional del Proyecto Geodinámico, que creó un Grupo de Trabajo de Perfiles Sísmicos Profundos en el que participaron expertos internacionales y que estableció un programa de Perfiles cuyo primer experimento se llevó a cabo en 1974 en las Béticas (Banda y Garín, 1975, Udías, 1975a y b).

El objetivo de este trabajo es efectuar una compilación cronológica de los experimentos de sísmica activa, tanto de perfiles de reflexión vertical como de gran ángulo o refracción, que se han llevado a cabo en la Península Ibérica y sus márgenes continentales a partir de 1970, proporcionando una relación bibliográfica lo más extensa posible. Esta bibliografía comprende tanto las publicaciones donde se describen los diversos experimentos sísmicos y se muestran sus primeros resultados, como los principales trabajos donde se presentan interpretaciones más elaboradas, basadas en esos datos sísmicos. En este último caso hay que tener presente que es muy difícil abarcar la totalidad de publicaciones que comportan alguna referencia a los resultados sísmicos, por lo que se ha pretendido incluir aquellos artículos considerados de mayor relevancia respecto de cada experimento.

Para facilitar la consulta al lector, se ha agrupado la bibliografía en términos geográficos, considerando 7 grandes regiones, a saber: Pirineos / Cantábrico, Zona Centro (Macizo Ibérico, Sistemas Ibérico y Central), Levante / Golfo de Valencia, Béticas / Alborán, Golfo de Cádiz / SurOeste de Iberia, Margen Atlántico / NorOeste de Iberia y, finalmente, Canarias.

En una primera sección nos referiremos a los experimentos llevados a cabo en el interior de la Península Ibérica para posteriormente presentar los experimentos de sísmica marina así como los registros en tierra de perfiles marinos (dispositivos «onshore-offshore»). En la Figura 1 se detallan los perfiles de gran ángulo y refracción en tierra, la Figura 2 muestra la compilación de perfiles de sísmica multicanal de reflexión y en la Figura 3 se presentan los perfiles marinos de refracción y sus registros de gran ángulo en tierra (dispositivo «onshore-offshore»). En este trabajo nos centraremos en los aspectos técnicos de los diversos proyectos, ya que una compilación exhaustiva de los resultados obtenidos y su discusión correspondiente requeriría una extensión muy superior.

2. PERFILES SÍSMICOS EN TIERRA

El primer experimento de sísmica activa realizado en la Península Ibérica se llevó a cabo en 1970 en la zona del Algarve, en el extremo suroccidental de la Península y su realización fue responsabilidad de un grupo de trabajo internacio-

nal liderado por la Universidad de Zurich (Mueller et al., 1973; Sousa Moreira et al., 1977, 1978). Se realizaron tres perfiles dobles (invertidos) de entre 150 y 250 km de longitud. Se utilizaron como fuentes explosiones de dinamita en mar y el dispositivo de registro consistió en 10 estaciones de registro analógicas. Se realizaron diversas explosiones en cada punto de tiro, entre las cuales las estaciones de registro se desplazaban incrementando así la cobertura total a lo largo de la línea.

En 1972, como resultado de la propuesta realizada por la Comisión Nacional del Proyecto Geodinámico, se constituye el «Grupo de Trabajo para Perfiles Sísmicos Profundos», que queda encargado de proponer y llevar a cabo una serie de perfiles sísmicos profundos en la Península. El grupo está coordinado por el Departamento de Física de la Tierra y del Cosmos de la Universidad de Barcelona y cuenta con la participación del Instituto Geográfico y Catastral, el Instituto y Observatorio de la Marina y la Universidad de Granada, así como instituciones europeas tales como el Institut de Physique du Globe de París, el Institut für Geophysics de Zurich, la Universidad de Karlsruhe y el Servicio Meteorológico de Lisboa.

La primera zona de estudio escogida es el Sur de la Península, debido fundamentalmente a su interés geotectónico. En 1974 se lleva a cabo un perfil inverso Cartagena-Cádiz, con explosiones en mar y en tierra, y tres perfiles en el Mar de Alborán (Udías 1975a y b, Banda y Garin, 1975). El perfil terrestre, de más de 500 km de longitud fue registrado a partir de explosiones en mar en cada extremo y de tiros en una cantera situada aproximadamente en el centro del perfil. Se utilizaron un total de 37 estaciones de registro, si bien sólo 7 de ellas pertenecían a instituciones españolas. Estas estaciones se desplazaron varias veces hasta conseguir una separación media de unos 3 km. Los perfiles en el Mar de Alborán se realizaron mediante estaciones de registro fijas en tierra mientras que el buque realizaba explosiones desplazándose a lo largo de los perfiles (Boloix y Hatzfeld, 1977; Working Group for Deep Seismic Sounding in Alborán 1974, 1978).

La actividad del «Grupo de Trabajo para Perfiles Sísmicos Profundos» continuó centrándose en gran medida, durante el resto de la década de los 70 e inicios de los 80, en la zona Sur de la Península Ibérica. Su financiación procedía básicamente de la Comisión Asesora interministerial de I+D. En la campaña de 1975 se registraron dos nuevos perfiles, Adra-Úbeda y Adra-Cartagena (Working Group for Deep Seismic Sounding in Spain 1974-1975, 1977; Banda y Ansorge, 1980). Posteriormente, en 1977, se adquirieron los perfiles La Línea-Carmona, Almería-Málaga y Málaga-Trafalgar (Udías, 1980, Medialdea et al., 1986; Barranco et al., 1990). En 1981 una nueva campaña permite adquirir un perfil marino en el Golfo de Cádiz y explorar zonas del Macizo Ibérico, campo de Gibraltar y del macizo peridotítico de Ronda, así como investigar la terminación sur-oriental del Sistema Ibérico mediante dos perfiles en dirección NW-SE y WSW-ENE registrados a partir de explosiones en mar frente a Torreblanca, Castellón (Grupo de Trabajo de Perfiles Sísmicos Profundos, 1983).

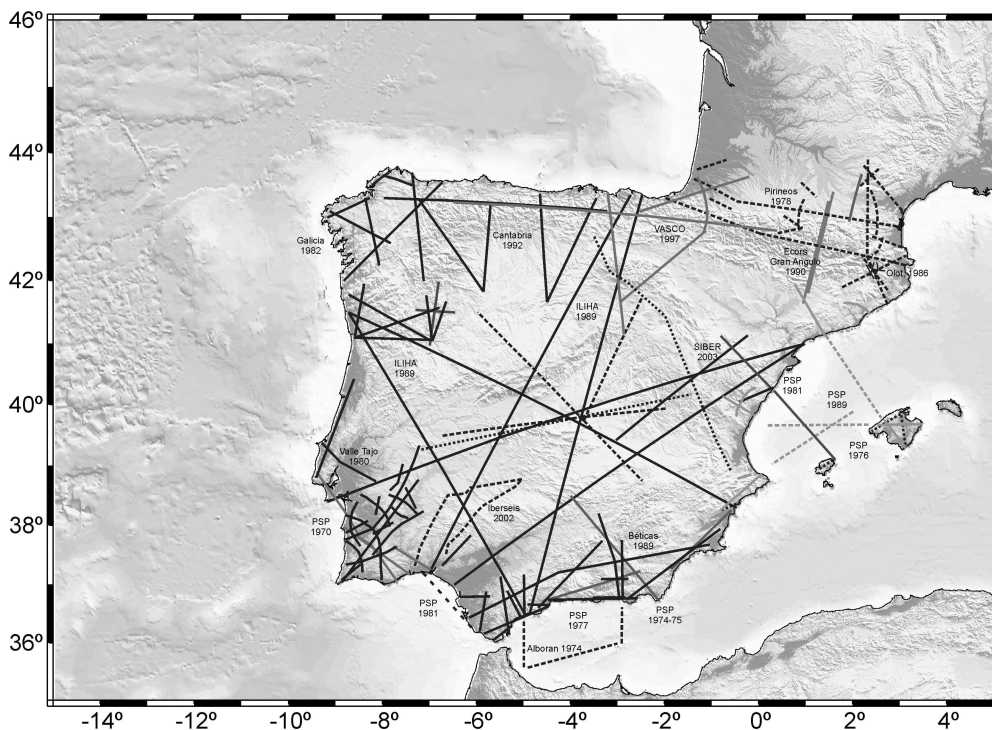


Figura 1.- Perfiles de refracción y reflexión de gran ángulo en tierra.

En 1976 se lleva a cabo el primer perfil de sismica profunda en las islas Baleares. Se efectuaron 10 explosiones en mar entre Alicante e Ibiza, Mallorca y Menorca, registradas por 24 estaciones en las islas, espaciadas unos 5 km, obteniéndose un perfil en dirección NE-SW. Adicionalmente, se realizaron dos explosiones cerca de Blanes (Girona), registradas a lo largo de una línea N-S en Mallorca (Banda et al., 1980). Los tiros efectuados entre la costa peninsular e Ibiza fueron registrados también a lo largo de un perfil de cerca de 500 km siguiendo la zona central del Sistema Ibérico, con un espaciado entre estaciones de 10 a 40 km. (Zeyen et al., 1985)

El estudio de la zona central del Macizo Ibérico se inicia con un perfil registrado por el Instituto Geográfico y Catastral a partir de las explosiones llevadas a cabo en la cantera de Yepes (Payo y Ruiz de la Parte, 1977). El perfil se extiende desde Huete (Cuenca) hasta Trujillo (Cáceres) a lo largo de 270 km, con una distancia entre estaciones de entre 3 y 10 km. Posteriormente, y siempre utilizando explosiones de canteras como fuente energética, se registran los perfiles Cáceres-Toledo-Teruel y Toledo-Soria (Banda et al., 1981).

La estructura cortical en las Islas Canarias se empezó a investigar mediante métodos sísmicos en 1977, a través de un proyecto hispano-suizo. En la primera fase se registraron 5 explosiones en mar en un conjunto de 25 estaciones de regis-

tro situadas en Lanzarote y Fuerteventura, a lo largo de una línea de unos 160 km y orientación SSW-NNE. En una segunda fase del experimento, realizada en 1979, se registraron 16 explosiones en 27 estaciones dispuestas en dos perfiles; Gran Canaria-La Palma y Hierro-Tenerife (Banda et al., 1981).

En Portugal la actividad fue también notable durante este periodo, realizándose perfiles a lo largo de la costa atlántica, entre Cabo Raso, Nazaré y Figueira da Foz (Sousa Moreira et al., 1980), en el valle del Tajo a unos 50 km al N de Lisboa (Mendes Victor et al., 1980) y en la zona Sur del país, cerca de la falla del Alentejo (Hirn et al., 1981).

La otra gran zona de estudio a finales de los años 70 fueron los Pirineos, mediante una gran campaña de perfiles sísmicos profundos gestionada por un consorcio de grupos franceses y españoles y con el apoyo de instituciones suizas, portuguesas y alemanas (Explosion Seismology Group Pyrenees, 1980). Se registraron dos grandes perfiles E-W al Norte (Daignières et al., 1981) y Sur (Gallart et al., 1981) de la cordillera además de una transecta N-S en la zona oriental de los Pirineos y múltiples perfiles complementarios (Gallart et al., 1980). Se efectuaron un total de 11 explosiones en mar y 7 en tierra, llegando a los 1500 kg de carga. Se emplearon 64 equipos de registro que se desplazaron en algunas ocasiones hasta conseguir una distancia entre estaciones de entre 3 y 5 km.

Así pues, al inicio de los años 80 se disponía de una base de datos importante para el conocimiento de la estructura cortical de la península (Banda et al., 1983), si bien amplias zonas, en especial del centro y noroeste restaban aún sísmicamente inexploradas. La posibilidad de realizar múltiples explosiones en un mismo punto, utilizando cantidades importantes de explosivo, permitió en esa época conseguir mediante sucesivos desplazamientos de las estaciones una buena densidad de registros. Sin embargo el carácter analógico de los datos restringía sus posibilidades de explotación. Cabe destacar las limitaciones experimentales de la época, con estaciones de registro que requerían la presencia continua de personal, dificultad para conseguir una buena señal de tiempo, necesidad de controlar derivas de relojes internos o problemas de comunicación eficiente entre los distintos equipos de campo.

En la primera parte de la década de los 80 la atención principal de la exploración sísmica en tierra pasa del estudio de las zonas afectadas por la orogenia alpina a la caracterización del Macizo Ibérico, es decir, del gran dominio hercínico de la península.

El proyecto de mayor envergadura al inicio de esta década es la exploración de Galicia mediante un conjunto de 7 perfiles sísmicos, realizados en Julio de 1982. Se efectuaron un total de 27 explosiones, 22 de ellas en mar, con cargas de explosivo muy diversas, de 20 hasta 1000 kg. El registro se efectuó mediante 32 estaciones analógicas que se desplazaron hasta permitir un espaciado medio de 2.5 km en los perfiles largos, si bien en algunos casos los primeros 60 km se registraron con espaciados de sólo 1 km (Córdoba et al., 1987, 1988; Téllez et al., 1993). Cabe destacar que los datos obtenidos en este experimento permitieron la primera interpretación basada en el análisis de las ondas de cizalla registradas en las componentes horizontales (Téllez y Córdoba, 1996, 1998). En el mismo año

1982 se registraron también cinco perfiles en el Norte de Portugal (Mendes-Victor et al., 1988), ampliando así el área de estudio.

Previamente, en 1981, se habían registrado ya dos perfiles ortogonales, de entre 50 y 70 km de longitud, un poco más al Sur del Macizo Ibérico, en la zona de Tras-Os-Montes (Hirn et al., 1982).

Siguiendo la tradición de utilizar con fines científicos las explosiones en la cantera de Yepes, de hasta 4500 kg, se investiga la estructura profunda del Sistema Central mediante el registro de un perfil NW-SE Salamanca-Hellín (Suriñach y Vegas, 1988) cruzando el Sistema Central.

En la segunda mitad de la década, la atención vuelve a la zona alpina. En 1985-1986 se realiza el primer experimento de sismica de reflexión vertical profunda en tierra organizado por instituciones académicas hispano-francesas y con apoyo de empresas de hidrocarburos, el experimento ECORS-Pirineos, que tendrá una importancia de primer orden para la modelización de la orogenia pirenaica. El perfil se extiende desde Balaguer en la depresión del Ebro, hasta cerca de Toulouse, cruzando los Pirineos en una transecta orientada NNE-SSW. En el segmento español, los datos se adquirieron en 1986 con sucesivos despliegues de ristas de 240 geófonos separados 60 m entre ellas. Cada 2 o 4 ristas se efectuó un tiro central de 20 kg de explosivo. El segmento francés se adquirió el año anterior, y se utilizó un dispositivo similar, excepto para el segmento más meridional (24 km) en el cual se utilizaron camiones vibradores de 13.5 y 7.8 toneladas. Los dos segmentos se conectaron mediante un perfil E-W de 8 km operado totalmente mediante helicópteros (ECORS Pyrenees team, 1988; Choukroune, 1989).

En 1987 se efectúa un perfil de sismica de gran ángulo sobre la misma línea del perfil ECORS con el fin primordial de obtener información sobre la estructura de velocidades (Suriñach et al., 1993). En este caso se efectuó un tiro de 800 kg en cada extremo del perfil, cubierto por un total de 42 estaciones de registro. Además se registró también un perfil N-S en abanico con la fuente en Bielsa y los equipos de registro entre Quillan y Carcassonne, para esclarecer las variaciones laterales en el Moho y su discontinuidad a la altura de la falla nor-pirenaica (Daignières et al., 1989).

El programa ECORS se completa, por lo que se refiere a la sismica en tierra, con la adquisición del perfil ECORS-Arzacq, una línea a través de los Pirineos Occidentales franceses registrada entre el valle de Ansó y Arzacq, en la cuenca de Aquitania (Daignières et al., 1994; Damotte, 1998a y b).

En 1986, financiado por el programa JOULE de la Comunidad Económica Europea, se llevó a cabo un experimento de sismica de refracción de alta densidad en la zona volcánica de Olot (Girona) que supuso el inicio de la utilización de equipos de registro digitales. Se empleó un método de trabajo análogo a los 'expanding spread profiles' utilizados en sismica multicanal de reflexión marina, con lo que se consiguió disponer de datos cada 0.8 km, utilizando 30 estaciones de registro y 8 explosiones de 100 kg de dinamita (Gallart e Hirn, 1989; Gallart et al., 1991).

La exploración del sur peninsular se retomó en el otoño de 1989 con la realización de dos perfiles en dirección NW-SE y WSW-ENE entre Puertollano y

Cabo de Gata y Málaga y Águilas respectivamente, con financiación del Plan Nacional de I+D. Se utilizaron tiros de cantera en Puertollano así como 6 explosiones de 1500 kg en tierra, aprovechándose también de alguno de los tiros en mar del experimento ILIHA, realizado simultáneamente. Los equipos de registro fueron 90 instrumentos analógicos de la Univ. de Hamburgo, desplegados a intervalos de 2-2.5 km. (Banda et al., 1993).

En la misma época se llevó a cabo la adquisición de datos de sismica activa del experimento ILIHA (Iberian Lithosphere Heterogeneity and Anisotropy). Este proyecto multidisciplinar, auspiciado por el proyecto europeo GEOTRAVERSE y financiado por la CEE (programa SCIENCE) se diseñó para explorar la presencia de heterogeneidades y/o anisotropía en la litosfera subcortical del Macizo Ibérico. Para ello se dispusieron 6 perfiles de unos 800 km de longitud muestreando la península según diversas direcciones azimutales, llegándose a identificar fases cuyo origen se situó cerca de los 100 km de profundidad. Las fuentes de energía utilizadas fueron tiros en mar de entre 400 y 1000 kg de carga explosiva y explosiones en las canteras de Yepes y Puertollano. Se utilizaron 193 estaciones de registro analógicas y digitales provenientes de diversas instituciones de 9 países europeos, con lo que se obtuvo una densidad de registro cercana a los 4 km a lo largo de cada uno de los perfiles. (Díaz et al., 1993a, 1993b)

Al inicio de la década de los 90 la actividad en sismica activa se centra en el desarrollo del Programa ESCI (Estudios Sísmicos de la Corteza Ibérica), financiado por el Plan Nacional de I+D de Recursos Geológicos (1987-1991). El objetivo central del proyecto era la obtención de imágenes de sismica de reflexión multicanal profunda en diversas zonas de la península, tanto en tierra como en mar. Las zonas investigadas fueron las Béticas y Mar de Alborán, los Catalánides y Golfo de Valencia, y la cordillera Cantábrica y margen asociado. En total se adquirieron un total de 1325 km de sismica en mar y 450 km en tierra. En lo referente a los datos en tierra, el sistema de adquisición utilizado consistió en un conjunto de 240 trazas, separadas 60 m entre sí (14.5 km de longitud total), con un tiro de 20 kg de dinamita cada 240 m, lo que supone un recubrimiento nominal de 30. El tiempo de registro osciló entre los 20 y los 25s, con un muestreo de 40 ms.

En las Béticas, en verano de 1991 se adquirieron dos perfiles de reflexión multicanal orientados NW-SE y SE-NW a través de los dominios externos e internos, de una longitud total de 200 km. (García-Dueñas et al., 1994), y con continuidad en la cuenca del Mar de Alborán. A través de los Catalánides se registró en el invierno de 1991 un perfil de cerca de 50 km con el objetivo de conectar el perfil ESCI-Golfo de Valencia con el perfil ECORS-Pirineos y obtener una transecta continua de unos 700 km, desde un orógeno hasta un dominio oceánico (Gallart et al., 1994). Finalmente, en la Cantábrica se adquirieron dos perfiles en dirección E-W y N-S (verano 1993) a través de los dominios varisco y alpino, con longitudes respectivas de 140 y 65 km (Pérez-Estaún et al., 1994; Pulgar et al., 1995), y con continuación a lo largo del margen continental.

En lo referente a estudios de sismica de gran ángulo, durante esta década se intensificó la exploración de la zona norte de la península, hasta entonces limitada a los experimentos del 1982 en Galicia. En el otoño de 1992, siempre bajo la

financiación del Plan Nacional de I+D, se llevó a cabo un experimento en el cual se registraron un total de 5 perfiles a partir de 7 explosiones en tierra de 1500 kg cada una. El perfil principal, orientado E-W, tuvo se extendió a lo largo de 400 km, cruzando desde las partes más externas a las más internas del dominio Varisco. Los otros cuatro perfiles, orientados básicamente en N-S y de unos 200 km de longitud cada uno, fueron diseñados para muestrear la estructura profunda de la transición entre la cordillera Cantábrica y la cuenca del Duero. Se utilizaron 170 estaciones, en su mayoría procedentes del 'pool' o parque instrumental PASSCAL de Estados Unidos, desplegadas simultáneamente para cada tiro, lo que supone un espaciado medio de 2-2.5 km (Fernández-Viejo et al., 2000). La utilización de un número tan elevado de instrumentos de registro marca el inicio del periodo reciente en la metodología de adquisición de perfiles de sismica de gran ángulo. Las crecientes dificultades logísticas y/o económicas para efectuar grandes explosiones hacen inviable repetir los disparos en un mismo punto de tiro, lo que implica que es necesario utilizar un número importante de instrumentos de registro para mantener o aumentar la densidad final de observaciones.

El estudio de la zona norte de la península por métodos de sismica activa continuó en 1997 con otro experimento de refracción/reflexión de gran ángulo diseñado para investigar la transición estructural entre los Pirineos y la cordillera Cantábrica. Para ello se utilizaron nueve explosiones en tierra de 1500 kg cada una, situados en 5 puntos distintos y registradas por un total de 100 estaciones distribuidas a lo largo de 4 perfiles, con una densidad de 2.5 km por estación. El perfil principal, de 560 km de longitud se orientó en dirección E-W para prolongar el perfil obtenido en la campaña de 1992. El segundo perfil, de dirección WSW-ENE, cruza la terminación occidental de los Pirineos desde la cuenca vasco-Cantábrica hasta la cuenca de Aquitania. Dos perfiles en dirección N-S y NE-SW se planearon para explorar las transiciones entre los diversos dominios tectónicos. (Pedreira et al, 2003). En este caso se utilizaron ya únicamente estaciones de registro digitales equipadas con recepción de tiempo a partir del sistema de satélites GPS. Esto supone una mejora muy sensible dado que se eliminan los problemas relacionados con la corrección de las derivas de tiempo y se simplifica enormemente el tratamiento de la señal.

Hasta el verano de 2001 no se lleva a cabo en la península ninguna nueva campaña de sismica activa. El experimento encargado de retomar esta actividad se enmarca en el proyecto IBERSEIS, auspiciado por el programa EUROPROBE de la European Science Foundation y financiación repartida entre diversas empresas y comunidades autónomas. Su objetivo central era obtener una sección a escala cortical del SO del Macizo Ibérico mediante sismica multicanal de reflexión profunda. Para ello se diseñó una línea de 300 km de longitud que cruzaba las zonas Sur-Portuguesa, de Ossa Morena y Centro-Ibérica de forma ortogonal a los principales contactos geológicos, formando una línea arqueada entre Huelva y las proximidades de Toledo. En este perfil se utilizó un dispositivo de adquisición de 400 canales y 5 camiones Vibroseis de 22 toneladas. El espaciado entre canales fue de 35 m y la distancia entre puntos de vibración de 70 m, lo que supone un alto valor de recubrimiento, 60 de media (Simancas et al., 2003).

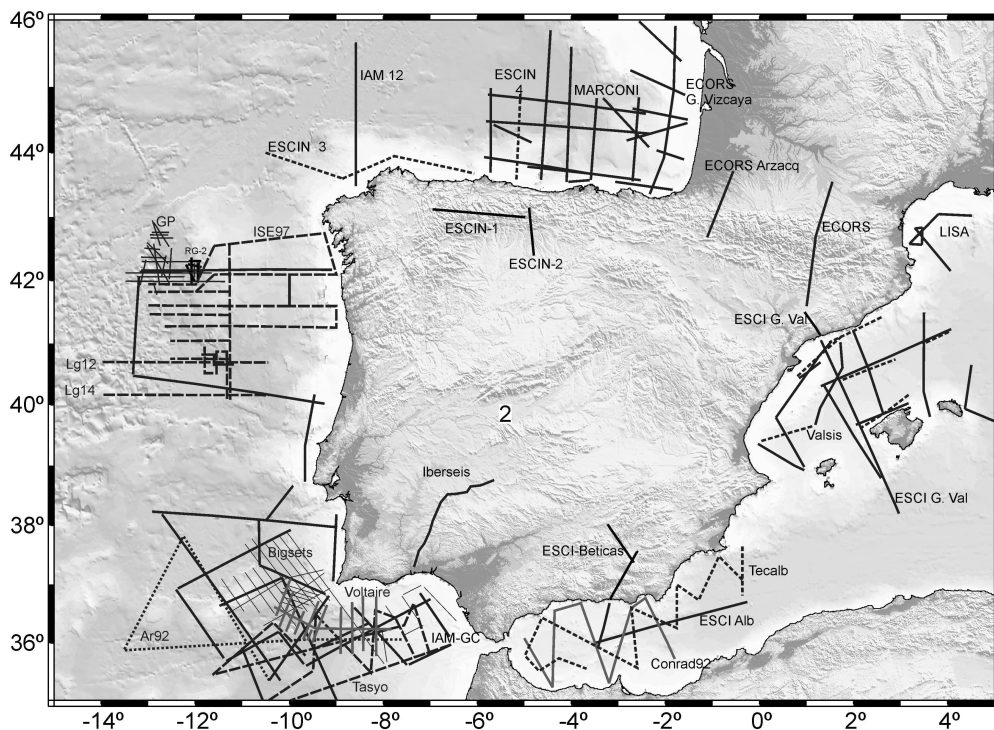


Figura 2.- Perfiles de sismica de reflexión multicanal.

Complementando el perfil de sismica multicanal, se realizó al año siguiente un experimento de sismica de gran ángulo/refracción para obtener información sobre la estructura de velocidades. Se utilizaron en total 690 estaciones sísmicas digitales del ‘pool’ americano PASSCAL, 40 de ellas de 3 componentes, para registrar disparos en 9 puntos de tiro espaciados unos 60 km y con cargas de entre 250 y 1000 kg. Se registraron dos perfiles subparalelos, con el extremo NE coincidente. Este experimento se adaptaba a la tendencia creciente de aumentar drásticamente la densidad de los datos para poder obtener modelos más detallados mediante técnicas de inversión tomográfica, en contraposición a los ajustes tradicionales por métodos directos de trazado de rayos. El espaciado entre estaciones fue de 400 y 150 m en cada uno de estos perfiles, un orden de magnitud mejor que en los experimentos previos. Esto supone un esfuerzo experimental importante, solo posible mediante la utilización de instrumentos ligeros y de rápida instalación.

Por último, en diciembre de 2003 se realiza una primera transecta sísmica a través del Sistema Ibérico, en forma de perfil de sismica de gran ángulo en dirección SW-NE, ortogonal a las principales estructuras, con el objetivo de investigar la geometría y posible engrosamiento cortical bajo el orógeno. Se registraron

3 explosiones de 1000-1500 kg en los extremos y el centro del perfil, en el que se desplegaron un total de 76 estaciones de registro espaciadas unos 4 km. (Gallart et al., 2004).

Actualmente, hay un proyecto en curso de Plan Nacional, proyecto ALCUDIA, cuyo objetivo es prolongar la transecta IBERSEIS hacia el NE en el dominio varisco de la Meseta, mediante la realización de otro perfil de sismica multicanal de reflexión de unos 300 km de longitud, cuya adquisición está prevista en verano de 2006.

3. PERFILES SÍSMICOS EN MAR

En este apartado hemos optado por reseñar los experimentos centrados en la estructura profunda, impulsados normalmente por instituciones académicas, siendo conscientes de que existe además un enorme volumen de líneas sísmicas marinas, adquiridas habitualmente por empresas de prospección de hidrocarburos, enfocadas a la obtención de imágenes de alta resolución de las estructuras sedimentarias.

La investigación de la estructura litosférica de los márgenes continentales Ibéricos por métodos de perfiles sísmicos proporciona resultados significativos a partir de los años 80. Con anterioridad se habían realizado algunos experimentos de refracción, en el Golfo de Valencia y en el Margen Atlántico (Fahlquist, 1963; Fahlquist y Hersey, 1969; Hinz, 1973; Purdy, 1975) utilizando un número muy limitado de sismógrafos de fondo marino (OBS) o de sonoboyas.

El límite Banco de Galicia y la llanura abisal ibérica, frente a las costas de Galicia fue escogido como uno de los emplazamientos de los sondeos profundos del consorcio DSDP. Como paso previo a la realización del sondeo, se efectuó una campaña de sismica multicanal de reflexión vertical en la que se adquirió una serie de perfiles orientados básicamente E-W. (perfiles GP, Groupe Galice, 1979; Mauffret y Montadert, 1987 y 1988).

En otoño de 1984, dentro del programa francés ECORS-Pirineos se llevó a cabo un experimento marino en el Golfo de Vizcaya. Se efectuó un perfil de sismica multicanal de 300 km de longitud y de dirección aproximada N-S, partiendo de la costa de Guipúzcoa hasta sobrepasar la desembocadura del Garona (Bois y Gariel, 1997). Complementariamente, se registraron 6 perfiles transversales con dispositivos 'expanding spread profiles' (ESP) para tener control de velocidades (Marillier et al., 1988).

En 1986 se lleva a cabo una serie de perfiles de refracción en el margen occidental de Iberia, en la zona más oriental de la llanura abisal Ibérica (Tagus plain), en una campaña británica mediante el buque Discovery, registrando en diversos OBS las señales generadas por un conjunto de 4 cañones de aire comprimido de 16 l (Whitmarsh et al., 1990; Pinheiro et al., 1992).

Un año más tarde, utilizando también la técnica de la sismica de refracción/gran ángulo, el experimento franco-británico Reframarge estudia la zona límite entre el Banco de Galicia y la llanura abisal. La adquisición de datos

se realiza mediante el buque *Le Suroît* en Abril de 1987. Se registraron 4 perfiles de entre 80 y 150 km de longitud y tres perfiles adicionales de menor longitud. El perfil principal sigue la traza del de reflexión vertical GP101, en dirección E-W. La fuente de energía utilizada estaba constituida por 8 cañones de 1000 in³ (16.4 l) con tiros cada 300m aproximadamente. El registro se efectuó mediante 3 OBS desplegados en cada una de las líneas. (Whitmarsh et al., 1996).

El proyecto franco-americano VALSIS se desarrolló en el Golfo de Valencia a finales de 1988, y constituyó un experimento multidisciplinar de sismica marina de gran envergadura, en el que a partir de dos buques oceanográficos coordinados como emisor/receptor, se efectuaron perfiles de CDP (reflexión multicanal), COP ('common offset profiles') y ESP ('expanding spread profiles'). El proyecto contó con la colaboración de instituciones españolas, y en él se adquirieron en total 2000 km de sismica multicanal y seis ESP con rangos entre tiros y receptores de hasta 100 km. Se utilizaron los buques R/V *Conrad* y N/O *Jean Charcot*, cada uno de ellos equipado con streamers de 96 canales y 2400 m de longitud, con una distancia entre trazas de 25 m, utilizándose una fuente de 95 l. Para los perfiles CDP el intervalo entre tiros se fijó a 30s, mientras que para los ESP se utilizó un intervalo de 60s, lo que corresponde, respectivamente, a separaciones de 75 y 150m (Torné et al., 1992; Pascal et al., 1992). Los disparos de algunos de los perfiles de este experimento fueron también registrados en tierra por estaciones portátiles, desplegadas sucesivamente según las líneas marinas, en lo que fue el primer experimento 'onshore-offshore' realizado en nuestro país utilizando señales de cañones de aire comprimido (Gallart et al., 1990). La adquisición de este tipo de señales comporta un registro continuo de datos en tierra, lo que, con la instrumentación entonces disponible, representaba un notable esfuerzo logístico, puesto que la autonomía de registro de cada equipo no sobrepasaba las 3h.

La exploración sísmica del Golfo de Valencia continúa en 1989 con la realización de un experimento de sismica de gran ángulo organizado por instituciones españolas y con instrumentación alemana. En este caso se utilizaron fuentes explosivas en mar a lo largo de tres perfiles en dirección NW-SE, E-W y NE-SW. Se realizaron un total de 290 tiros de 20 y 100 kg, con un intervalo aproximado de 1.5 km. Estas señales fueron registradas por 110 estaciones en tierra y 10 sensores de fondo oceánico (OBS). (Dañobeitia et al., 1992).

La corteza atlántica situada al oeste de las islas Canarias fue explorada a finales de la década de los ochenta mediante la adquisición de 2000 km de sismica multicanal a lo largo de tres perfiles NW-SE, E-W y SW-NW (Banda et al., 1991). El experimento se enmarcó en el estudio de la posible ampliación de la Zona Económica Exclusiva (ZEE) española al oeste del archipiélago. En este caso se utilizó el buque M/V *GECO TAU*, equipado con un conjunto de cañones de 103 l de volumen activados cada 50 m y registrados en un streamer de 3000 m y 120 canales, con una duración de registro de 16 s.

La campaña francesa *Lusigal*, realizada en 1990 mediante el buque *Le Suroît*, permitió la adquisición de nuevas líneas de sismica vertical en el margen occidental de Iberia, en una zona cercana a la explorada previamente por el expe-

rimento del Discovery. En este caso se utilizaron 8 cañones de 80 in³ cada uno, tirando cada 50m. Se registraron 8 s para cada tiro a lo largo de un streamer de 96 canales y 2400m de longitud (separación entre grupos, 25m), obteniéndose un recubrimiento de 24 (Beslier et al., 1993; Beslier, 1996).

En los años 1992-93 la exploración sísmica marina alrededor de Iberia alcanza un máximo de actividad. El proyecto germano-español VICAP (Volcanic Island Clastic Apron Project) permitió la adquisición en 1992 de 700 km de sísmica multicanal en la zona Sur de las Islas Canarias, con el objetivo de estudiar en detalle el apron volcánico de Gran Canaria (Funck et al., 1996; Geisslinger et al., 1996). En este caso se utilizó un sistema de adquisición formado por un conjunto de cañones de aire comprimido de 9 l de volumen total, activados cada 50 m y registrados durante 12 s por un streamer de 2400 m de longitud y 48 canales. La adquisición de estos datos se efectuó en 1991, como parte del crucero 16/4 del buque R/V Meteor. En 1993, un nuevo crucero del mismo buque permitió la adquisición de nuevas líneas alrededor de Gran Canaria, registradas también en OBS y estaciones en tierra (Ye et al., 1999).

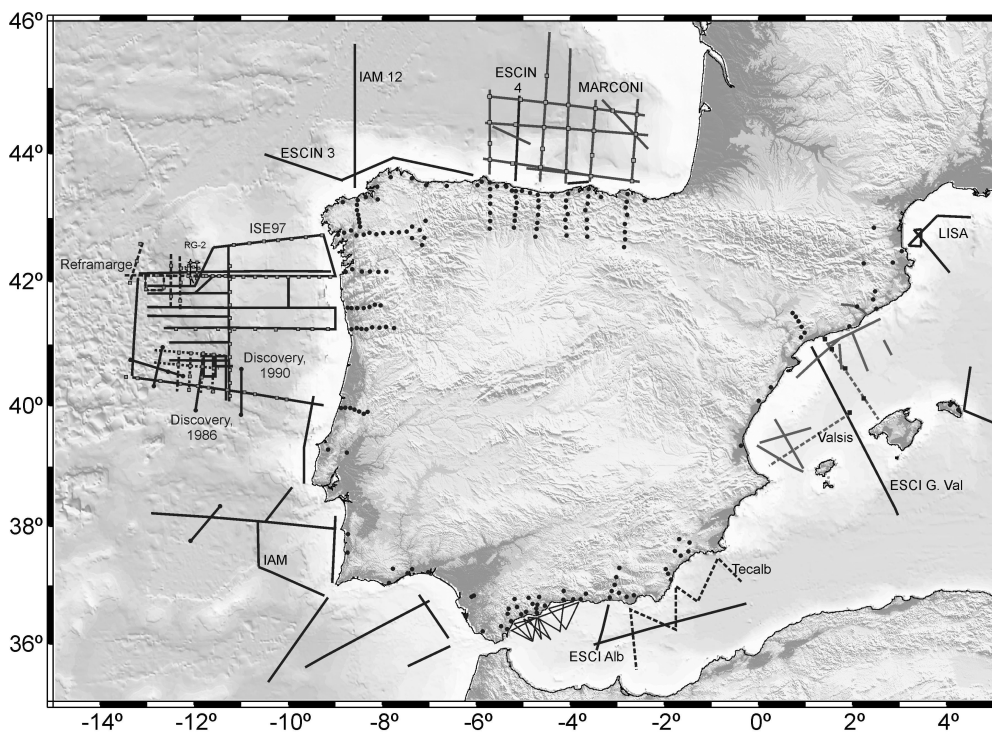


Figura 3.- Perfiles de refracción en mar (OBS) y onshore-offshore.

En 1992 la zona SW del margen continental de Iberia, cerca de la región epicentral del terremoto de Lisboa de 1755, fue estudiada mediante un conjunto de perfiles de sismica multicanal en el experimento AR92, financiado por instituciones italianas (Sartori et al, 1994). Se utilizó un conjunto de cañones de 80 l de capacidad total y un streamer de 3000 m de longitud y 120 trazas, con un intervalo de tiro de 50 m, obteniéndose un recubrimiento medio de 30. El tiempo de registro utilizado fue de 13 s. Se registraron 8 líneas al SW del cabo Espichel, justo al oeste de la zona de transición océano-continente.

Tal como ya hemos comentado para la sismica en tierra, a principios de los años 90 se llevó a cabo el programa ESCI financiado por el Plan Nacional de I+D, en el cual se registraron en mar unos 1325 km de sismica de reflexión vertical y que supuso un nuevo paso adelante en la sismica de exploración nacional. En Febrero de 1992 se efectuaron los primeros perfiles ESCI en mar, a lo largo de dos líneas en la cuenca del Mar de Alborán, con una longitud total de 400 km. El primer perfil, en dirección NE-SW, discurre por la zona norte del Mar de Alborán, mientras que el segundo parte del centro de esta cuenca y llega hasta la cuenca SurBalear (Comas et al., 1995). Se utilizó un streamer de 4500 m y 180 trazas, que registró las señales generadas por un conjunto de cañones de 120 l de capacidad total. Cada tiro fue registrado durante 20 s y el recubrimiento nominal obtenido fue de 30. El primer perfil fue registrado también en tierra por un conjunto de 5 estaciones portátiles (Gallart et al., 1995).

Inmediatamente después se registró el perfil ESCI Golfo de Valencia, una línea de 400 km de longitud en dirección NW-SE, entre las costas de Tarragona y el S de Mallorca (Gallart et al., 1995). También en este caso las señales se registraron en tierra, permitiendo la obtención de imágenes estructurales con continuidad entre los perfiles ESCI en mar y en tierra (Gallart et al., 1994). Esta transecta de la cuenca Sud-Balear se englobó también en el proyecto europeo STREAMERS de estudio mediante sismica multicanal de diferentes márgenes Mediterráneos.

En Mayo de 1992 se efectuó un test del sistema de fuente sismica de cañones de aire en el nuevo buque oceanográfico español BIO Hespérides, en el cual se adquirió un conjunto de 17 perfiles de sismica de refracción en el Mar de Alborán. Los perfiles, de una longitud media de 50 km, cubrieron el sector más próximo a la costa entre Málaga y la Línea de la Concepción según distintas orientaciones. Se utilizó como fuente un conjunto de cañones de 24 l de capacidad total, disparados cada 40 s (aprox. 100m). El registro de estas señales se llevó a cabo en tierra mediante 5 estaciones, cuya ubicación fue cambiando hasta cubrir un total de 24 posiciones.

En ese mismo año se adquirieron nuevos datos de sismica multicanal en el Mar de Alborán mediante un proyecto financiado por la National Science Foundation estadounidense. Se utilizó el buque Conrad dotado de un streamer de 2.4 km con 48 grupos activos separados 50 m. Los disparos se efectuaron mediante un conjunto de cañones de aire comprimido de 5346 in³ de volumen total, activados cada 50m, y registrados durante 20s. Los cinco perfiles principales tienen

una orientación próxima a N-S, cruzando la cuenca de Alborán desde las proximidades de las costas marroquíes hasta las costas españolas (Watts et al., 1993).

En 1993 la adquisición de datos marinos del programa ESCI se completó con la realización de los dos perfiles previstos en el margen peninsular Nor-Ibérico. En este caso se empleó un conjunto de cañones de 90 l de capacidad, cuyas señales se registraron por un streamer de 4.5 km y 360 trazas, separadas 12.5 m entre ellas. El perfil ESCIN-3 discurre a lo largo de 380 km desde el Oeste de Galicia hasta la costa asturiana, siguiendo una línea quebrada con dirección predominante E-W, muestreando las estructuras variscas (Alvarez-Marrón et al., 1995a). A continuación, y con la misma configuración, se registro el perfil ESCIN-4, de 145 km de longitud en dirección N-S para estudiar la deformación alpina del margen Cantábrico mediante una transecta perpendicular entre Oviedo y Santander, atravesando el Banco de Le Danois (Alvarez-Marrón et al., 1995b). En ambos casos se desplegó una red de estaciones sísmicas en tierra para registrar los disparos de los perfiles y obtener datos de gran ángulo que permitieran controlar la distribución interna de velocidades (Ayarza et al., 1998; Fernández-Viejo et al., 1998).

Tras la finalización del programa ESCI, la actividad en el campo de la sísmica marina se retomó en el marco del proyecto IAM (Iberian Atlantic Margins) financiado por la Unión Europea. Este nuevo proyecto proporcionó una enorme base de nuevos datos tanto en los márgenes norte y oeste de la península, como en la región del Banco de Gorringe y el golfo de Cádiz, al registrar durante el año 1993 unos 3500 km de sísmica de reflexión vertical, (Banda et al., 1995). Se utilizó un conjunto de cañones con una capacidad total de 7524 in³, activados cada 75 m, registrándose 25 s de señal en un streamer de 4.8 km de longitud y 192 canales. En algunas de las líneas, tales como el perfil IAM12, en la longitud de La Coruña, o el perfil IAM3, en el golfo de Cádiz, se registraron los disparos en estaciones en tierra para extender la zona de estudio (Fernández-Viejo et al., 1998; González et al., 1996).

A finales de 1993 la investigación de la estructura cortical del archipiélago Canario se reactivó con la realización por parte de instituciones británicas y españolas de un perfil de sísmica de reflexión vertical de unos 570 km de longitud y orientación SW-NE entre las islas de Selvagens y el Echo Bank. Se utilizó el buque RRS Charles Darwin, equipado con un streamer de 2.4 km y 48 canales y una fuente sísmica de aprox. 75 l activada cada 40s, y se desplegaron 6 OBS y estaciones de registro en tierra (Watts et al., 1997). Durante la misma campaña, la estructura del edificio volcánico de Tenerife fue explorada mediante la realización de un perfil quasi-circular alrededor de la isla, registrado también por estaciones en tierra (Canales et al., 2001).

En 1995 se llevó a cabo el proyecto LISA (Liguria-Sardinia), financiado por instituciones francesas, en el cual se adquirieron perfiles de sísmica multicanal profunda a lo largo de diversas zonas del Mediterráneo occidental, en Liguria, Tirreno, Baleares y Golfo de León (Nercessian et al., 2001). Cinco perfiles realizados en las cercanías de la terminación oriental de los Pirineos fueron registrados por una red de estaciones terrestres, permitiendo adquirir datos significativos

de la transición entre los dominios dominados por compresión Pirenaica y extensión Neógena. (Gallart et al., 2001).

En la segunda mitad de los 90 el margen atlántico de Iberia continuó atrayendo la atención científica, con diferentes proyectos de exploración sísmica. Así la campaña anglo-americana 'Discovery 215' permitió adquirir un perfil de sísmica de gran ángulo de 340 km coincidente con la línea de sísmica de reflexión IAM9 y en una malla de 60 x 60 km centrada en la transición océano-continente. La fuente utilizada fueron 12 cañones de 104 l activados cada 40 o 50 s y registrados en una red de hasta 16 OBS. Simultáneamente se adquirió sísmica de reflexión vertical mediante un streamer de 2.4 km de longitud y 48 canales (Chian et al., 1999; Dean et al., 2000).

En el verano de 1997 el buque R/V Maurice Ewing llevó a cabo la campaña ISE97, de financiación americana y participación de instituciones alemanas y españolas, en la que se adquirieron simultáneamente sísmica de reflexión vertical y de gran ángulo. Se utilizó un streamer de 160 canales y 4 km de longitud y un conjunto de cañones de 130 l en total, activados cada 100 m, lográndose un recubrimiento nominal de 20. Se registraron más de 4000 km de perfiles, distribuidos entre nueve líneas, cada una de unos 130 km de longitud, perpendiculares al margen en la zona de transición océano-continente; cuatro líneas E-W de mayor longitud, llegando hasta las cercanías de la costa y una línea N-S de unos 250 km. Se desplegó 3 veces un dispositivo de 25 OBS registrando con densidades variables en las distintas líneas (Pérez-Gussinye et al., 2003; Henning y Sawyer, 2004). Los perfiles más cercanos a la costa fueron registrados también por estaciones de tierra (González et al., 1999).

En Noviembre de 1998 se llevó a cabo la adquisición de datos del proyecto de la Unión Europea BIGSETS, cuyo objetivo era la caracterización de la zona epicentral del seísmo de Lisboa de 1755, frente a las costas del Cabo de San Vicente. Se registraron más de 2700 km de sísmica multicanal a partir de una fuente de 1000 in³, activada en intervalos de 10, 15 y 40s. El registro se efectuó mediante un streamer de 3000m de longitud y 48 trazas. (Zitellini et al. 2001)

El proyecto español TASYO, cuya fase de adquisición de datos se llevó a cabo en 2000, tuvo como objetivo el estudio de la evolución tectónica en el Golfo de Cádiz. Para ello se adquirieron un total de 1728 km de sísmica multicanal a bordo del BIO Hespérides, utilizando cañones con capacidad total de 22.45 y 34.8 l y un streamer de 2500 m y 96 trazas. Se efectuaron tiros cada 50m, registrándose 10 s de señal después de cada tiro. Los dos perfiles principales, de cerca de 400 km de longitud, tienen una orientación próxima a E-W y son cruzados por diversos perfiles complementarios de corta longitud (Medialdea et al., 2004).

En el año 2000, el estudio mediante métodos sísmicos del Mar de Alborán se reemprende mediante la campaña española (Plan Nacional) TECALB. Se utilizó el equipamiento del BIO Hespérides para la adquisición de un conjunto de perfiles sísmicos de entre 50 y 180 km de longitud en la zona situada entre Málaga y el Cartagena, desplegándose también algunos OBS españoles (red UTM) y estaciones en tierra. En 2003 estos datos fueron reprocesados hasta los 8s de tiempo doble (Comas et al, 2004).

El Golfo de Cádiz fue nuevamente explorado mediante técnicas sísmicas en Noviembre de 2002, durante el proyecto *Voltaire*, financiado por instituciones italianas y portuguesas. La adquisición se realizó utilizando el buque oceanográfico *Urania*, equipado con 2 cañones de 210 in³ cada uno y un streamer de 600m y 48 trazas, con lo se registraron un total de 1111 km de sísmica multicanal (Zitellini et al., 2002).

Como consecuencia del hundimiento del buque petrolero ‘*Prestige*’ en Noviembre de 2002, el Plan Nacional de I+D impulsó un estudio multidisciplinar del área del naufragio, a unos 250 km mar adentro de la costa Oeste de Galicia, en la transición entre el Banco de Galicia y la llanura abisal. Este estudio incluyó un experimento de sísmica activa, efectuado en verano de 2003, en el que se registró una malla de 3 perfiles E-W y 3 perfiles N-S de entre 20 y 40 km de longitud alrededor del pecio. Las señales generadas por un conjunto de cañones de entre 1935 y 2690 in³ de capacidad total y activados cada 100 m fueron registradas por un streamer de 2400m de longitud y 96 trazas, arrastrado por el BIO Hespérides, obteniéndose perfiles de reflexión vertical multicanal de buena calidad. Además se desplegó una red densa de 10 OBS (de procedencia francesa) a partir de los cuales se obtuvieron perfiles de gran ángulo (Díaz et al., 2006).

Inmediatamente después, el buque BIO Hespérides inició la adquisición de datos del proyecto MARCONI, también del Plan Nacional, para investigar la estructura profunda de la zona oriental del Golfo de Vizcaya. Se registraron un total de 1800 km de sísmica multicanal utilizándose el mismo dispositivo experimental citado anteriormente. Se desplegaron también 24 OBS (20 de procedencia alemana y 4 de la Unidad de Tecnología Marina del CSIC) para obtener información respecto a la estructura de velocidades a partir de registros de gran ángulo. Tres perfiles de aproximadamente 240 km de longitud se efectuaron en dirección Este-Oeste, cortados por cinco perfiles en dirección Norte-Sur con dimensiones variables entre 103 y 236 km. Además, otras dos líneas de menor entidad se disponen en dirección NO-SE con 74 y 104 km de longitud y una más corta en la plataforma de Santander en dirección E-O.

Aunque en los dos últimos años no se han adquirido nuevos datos sísmicos en los márgenes peninsulares, la investigación de su estructura profunda y variaciones laterales mediante técnicas de perfiles sísmicos marinos continúa siendo objetivo preferente de diversos equipos de científicos, nacionales y extranjeros, que impulsan proyectos que incluyen este tipo de experimentos. Por ejemplo, en el margen sur de la Península existen diversos proyectos ya en curso o de próximo inicio con campañas sísmicas previstas. Es el caso del proyecto de Plan Nacional SAGAS que debe adquirir a finales de 2006 una red de perfiles de sísmica multicanal en la Cuenca del Mar de Alborán y transición a la Cuenca Sud-Balear utilizando el BIO-Hespérides. En la misma zona el proyecto West-Med, impulsado por el programa EUROMARGINS de la ESF, prevé efectuar en el otoño de 2006, a partir del buque alemán *Meteor*, una serie de perfiles de gran ángulo/refracción, registrados en una red de 15 OBS de procedencia alemana y estaciones españolas desplegadas en tierra, para controlar la naturaleza de este

margen en función de la distribución interna de velocidades. Por último, en el dominio adyacente del Golfo de Cádiz y con finalidad análoga, el proyecto NEA-REST financiado por la Unión Europea prevé efectuar en 2007 otra serie de perfiles de gran ángulo/refracción con registros en redes de OBS y estaciones en tierra.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La indudable complejidad estructural del llamado ‘microcontinente Ibérico’, en el que coexisten dominios geológicos afectados por sucesivos procesos tectónicos de diversa naturaleza, ha motivado un interés continuado por parte de grupos de investigadores nacionales y extranjeros en establecer sus propiedades de estructura interna, como primera etapa para comprender su evolución geodinámica.

La metodología de perfiles sísmicos, de reflexión vertical o de gran ángulo y refracción, se ha considerado la más apropiada para caracterizar la estructura litosférica de Iberia y por ello, desde los años 70 se han efectuado multitud de experimentos de este tipo, auspiciados por proyectos de investigación de gran envergadura, en muchos casos comportando la integración de diversos equipos internacionales. Las características técnicas de estos experimentos han sido las propias de la investigación puntera en esa materia a nivel mundial en cada época.

En el ámbito terrestre de la Península Ibérica se han llevado a cabo más de 20 proyectos basados en la adquisición de perfiles sísmicos de reflexión y refracción a escala cortical y litosférica. Se han estudiado con bastante detalle todos los dominios tectónicos relevantes, aunque con menor densidad de muestreo en algunas zonas del centro como los Sistemas Central e Ibérico.

En los márgenes continentales Ibéricos se han desarrollado en las últimas décadas una treintena de proyectos de investigación sísmica abarcando todos los dominios marinos. Se dispone ya de decenas de miles de kilómetros de sísmica multicanal, mientras que se carece de un control comparable de la distribución interna de velocidades a lo largo de los distintos márgenes por la dificultad encontrada hasta ahora de obtener datos de refracción registrados en OBS. Por ello, en el futuro inmediato se prevé intensificar la investigación en esta línea, desplegando redes de OBS con la mayor densidad posible.

Todos estos experimentos sísmicos han generado un enorme volumen de trabajos de investigación, tesis doctorales, etc. En la bibliografía adjunta se relacionan más de 100 artículos publicados en revistas de impacto internacional, basados en el análisis de los datos de perfiles sísmicos, y resultan casi incontables los que utilizan de modo más o menos indirecto algunos de los resultados sísmicos en sus investigaciones específicas.

Los resultados obtenidos con esta metodología sísmica ponen de relieve una gran heterogeneidad estructural bajo los dominios Ibéricos, con variaciones laterales notables de la estructura profunda (i.e. cambios del espesor cortical de casi un factor 2) en zonas cercanas geográficamente. La necesidad de incrementar la densidad de muestreo regional, junto con el aumento deseable en la resolución de

los modelos de estructura profunda justifican, a pesar de su elevado coste económico, la continuidad de los programas de perfiles sísmicos, ya que continúan siendo la herramienta geofísica más potente de la que se dispone para resolver la litosfera terrestre.

Cabe señalar, por último, que los grupos de investigación españoles expertos en perfiles sísmicos, además de su actividad en el ámbito peninsular, han participado activamente y/o liderado proyectos internacionales de investigación en regiones de gran interés geodinámico, abarcando tanto orógenos como Tibet o Urales, dominios de interacción entre placas tectónicas como Caribe, Antillas, México, Golfo de California, Ecuador, Chile, etc., zonas volcánicas/'hot spots' de Italia, Grecia, Islas de la Sociedad, La Reunión, etc., así como en dominios Antárticos.

5. REFERENCIAS

Nota: Se ha desglosado la bibliografía por áreas geográficas con el objetivo de facilitar la identificación de los trabajos.

PIRINEOS / CANTÁBRICO

- ÁLVAREZ-MARRÓN, J.; A. PÉREZ-ESTAÚN; J. J. DAÑOBEITIA; J. GALLART; F. GONZALEZ-LODEIRO; E. BANDA; M. C. COMAS & D. CÓRDOBA (1995a). Results from the ESCI-N3.1 and ESCI-N3.2 marine deep seismic profiles in the northwestern Galicia Margin *Revista Sociedad Geológica de España* vol. 8 (4), 331-340
- ÁLVAREZ-MARRÓN, J.; J. A. PULGAR; J. J. DAÑOBEITIA; A. PÉREZ-ESTAÚN; J. GALLASTEGUI; J. R. MARTÍNEZ-CATALÁN; E. BANDA; M. C. COMAS & D. CÓRDOBA (1995b). Results from ESCI-N4 marine deep seismic profile in the northern Iberian Margin *Revista Sociedad Geológica de España* vol. 8 (4), 355-364
- AYARZA, P. (1995). *Procesado, interpretación y modelado del perfil de reflexión profunda ESCIN-3.3. (Zonas Asturoccidental-Leonesa y Centro Ibérica)*. Tesis Doctoral, Univ. Salamanca
- AYARZA, P.; J. R. MARTÍNEZ CATALÁN; J. GALLART; J. A. PULGAR & J. J. DAÑOBEITIA (1998). ESCIN 3.3: A seismic image of the Variscan crust in the hinterland of the NW Iberian Massif. *Tectonics*, 17 (2), 171-186.
- BOIS, C. & O. GARIEL (coord.) (1997). ECORS Bay of Biscay survey. Mem. Soc. Geol. Fr, 171. Paris.
- CHOUKROUNE, P. & ECORS-PYRENEES TEAM (1989). The ECORS Pyrenean deep seismic profile. Reflection data and the overall structure of an orogenic belt. *Tectonics*, 8, 1, 23-39.
- DAIGNIERES, M.; J. GALLART & E. BANDA (1981). Lateral variation of the crust in the North Pyrenean Zone. *Annales Geophysique*, 37, 3, 435-456.

- DAIGNIERES, M.; B. DE CABISOLE; J. GALLART; A. HIRN; E. SURINACH & M. TORNE (1989). Geophysical constraints in the deep structure along the ECORS Pyrenees line. *Tectonics*, 8, 5, 1051-1058.
- DAIGNIÈRES, M.; M. SÉGURET; M. SPECHT & ECORS TEAM (1994). The Arzacq-Western Pyrenees ECORS Deep Seismic Profile. In: Mascle, A. (ed) *Hydrocarbon and Petroleum Geology of France*. Eur. Assoc. Pet. Geosci. Spec. Publ., vol. 4, Springer-Verlag, New York. 199-208
- DAMOTTE, B. (coord.) (1998a). The Ecors Pyrenean Deep Seismic Surveys, 1985–1994, *Mem. Soc. Geol. Fr*, 173, Paris.
- DAMOTTE, B. (1998b). The Ecors profile across the Pyrenees (French sector): implementation, data processing and discussion of seismic results. *Mem Soc Geol. Fr.*, 173, 15-26.
- ECORS PYRENEAN TEAM (1988). The ECORS deep reflection seismic survey across the Pyrenees. *Nature*, 331, 508-511.
- EXPLOSION SEISMOLOGY GROUP PYRENEES (A. HIRN; J. GALLART et al.) (1980). Seismic reconnaissance of the structure of the Pyrenees. *Annales Géophysique*, 36, 2, 135-140.
- FERNÁNDEZ VIEJO, G., (1997). *Estructura cortical de la Cordillera Cantábrica y su transición a la Cuenca del Duero a partir de datos de sísmica de refracción y reflexión de gran ángulo*. Tesis Doctoral, Univ Barcelona.
- FERNÁNDEZ-VIEJO, G.; J. GALLART; J. A. PULGAR; J. GALLASTEGUI; J. J. DAÑOBEITIA & D. CORDOBA (1998). Crustal transition between continental and oceanic domains along the North Iberian Margin from wide-angle seismic and gravity data. *Geophysical Research Letters*, 25, 4249-4252.
- FERNANDEZ-VIEJO, G.; J. GALLART; J. A. PULGAR; D. CORDOBA & J. J. DAÑOBEITIA (2000). Seismic signatures of Variscan and Alpine tectonics in NW Iberia: crustal structure of the Cantabrian Mountains and Duero basin. *J. Geophys. Res.*, 105, 3001-3018.
- GALLART, J. (1978). *Profils sismiques dans les Pyrénées: campagnes de 1976 et 1977*. Rapport de stage D.E.A. Univ. Paris VI.
- GALLART, J., (1980). *Structure crustale des Pyrénées d'après les études de sismologie expérimentale*. Thèse Docteur d'Université en Géophysique. Université Pierre et Marie Curie (Paris VI).
- GALLART, J., (1981). *Estudi de l'estructura de la crosta i el mantell superior als Pirineus segons tècniques de perfils sísmics. Implicacions geodinàmiques*. Tesis Doctoral Ciencias Físicas. Universidad de Barcelona.
- GALLART, J.; M. DAIGNIERES; E. BANDA; E. SURINACH & A. HIRN (1980). The Eastern Pyrenean domain: lateral variations at crust-mantle level. *Annales Géophysique*, 36, 2, 141-158.
- GALLART, J.; E. BANDA & M. DAIGNIERES (1981). Crustal structure of the Paleozoic Axial Zone of the Pyrenees and transition to the North Pyrenean Zone. *Annales Géophysique*, 37, 3, 457-480.

- GALLART, J. & A. HIRN (1989). Seismic reconnaissance of the upper crust in the volcanic zone of Olot (NE of Spain). In: K. Louwrier, E. Staroste, J.D. Garnish and V. Karkoulis (Editors), *European Geothermal Update*. Kluwer, Dordrecht, 464-473.
- GALLART, J. ; J. POUS ; F. BOIX & A. HIRN (1991). Geophysical constraints on the crustal structure of the Olot volcanic area, NE of the Iberian Peninsula . *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 47, 1/2, 33-44.
- GALLASTEGUI, J. (1999). *Estructura cortical de la Cordillera y Margen Continental Cantábricos: perfiles ESCI-N*. Tesis Doctoral. Univ. Oviedo.
- MARILLIER, F., A. TOMASSINO, PH. PATRIAT & B. PINET, (1988). Deep structure of the Aquitaine Shelf: constraints from expanding spread profiles on the ECORS Bay of Biscay transect, *Marine and Petroleum Geology*, 5, 65-74.
- PEDREIRA, D., (2003). *Transecta geológica y geofísica en la Cuenca Vasco-Cantábrica*. Tesis Doctoral, Univ Oviedo.
- PEDREIRA, D.; J. A. PULGAR; J. GALLART & J. DÍAZ (2003). Seismic evidence of Alpine crustal thickening and wedging from the Western Pyrenees to the Cantabrian Mountains (North Iberia). *Journal of Geophysical Research*, 108 (B4) pp. ETG 10-1 to ETG 10-21 10.1029/2001JB001667
- PÉREZ-ESTAÚN, A.; J. A. PULGAR; E. BANDA; J. ÁLVAREZ-MARRÓN & ESCI-N RESEARCH GROUP (1994). Crustal structure of the external variscides in northwest Spain from deep seismic reflection profiling. *Tectonophysics*, 232, 91-118.
- PULGAR, J. A.; A. PÉREZ-ESTAÚN; J. GALLART; J. ALVAREZ-MARRÓN; J. GALLASTEGUI; J. L. ALONSO & ESCI-N GROUP (1995). The ESCI-N2 deep seismic reflection profile: a traverse across the Cantabrian Mountains and adjacent Duero basin. *Revista Sociedad Geológica España*, vol. 8 (4), 383-39
- SURINACH, E; J. M. MARTHELOT; J. GALLART; M. DAIGNIERES & A. HIRN (1993). Seismic images and evolution of the Iberian crust in the Pyrenees. *Tectonophysics*, 221, 67-80.

ZONA CENTRO

- BANDA, E; E. SURINACH; A. APARICIO; J. SIERRA & E. RUIZ DE LA PARTE (1981). Crust and upper mantle structure of the central Iberian Meseta (Spain), *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 67, 779-789.
- DÍAZ, J., (1993). *Estudi de l'estructura i propietats anisotropes de la litosfera subcortical del Massís Ibèric a partir de dades sísmiques d'ones P i S*. Tesis Doctoral, Univ. Barcelona.
- DÍAZ, J., (1994). *Anisotropie sismique et deformation dans le manteau supérieur: approche conjointe par sismique refraction et ondes S télésismiques en Ibérie. Méthodes d'analyse d'ondes S et leur résultats au Tibet*. Tesis Doctoral, Univ. Paris VII.

- DÍAZ, J.; J. GALLART; D. CORDOBA; L. SENOS; L. MATIAS; E. SURINACH; A. HIRN; P. MAGUIRE & ILIHA DSS GROUP (1993a). A deep seismic sounding investigation of lithospheric heterogeneity and anisotropy beneath the Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, 221, 35-51.
- DÍAZ, J.; A. HIRN; J. GALLART & L. SENOS (1993b). Evidences for azimuthal anisotropy in SW Iberia from DSS data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 78, 193-206.
- GALLART J.; R. SALAS; J. GUIMERÀ; R. MAS; J. DÍAZ & M. RUIZ (2004). A refraction/wide-angle reflection seismic profile through the Iberian Chain: preliminary report. *Geo-Temas*, 6, (2), 183-186.
- HIRN, A.; L. SENOS; M. SAPIN & L. MENDES VICTOR (1982). High to low velocity succession in the upper crust related to tectonic emplacement: Tras os Montes-Galicia (Iberia), Brittany and Limousin (France), *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 70, 1-10.
- MENDES VICTOR, L.; A. HIRN & J. L. VEINANTE (1980). A seismic section across the Tagus Valley, Portugal: possible evolution of the crust. *Ann. Geophys.* 36, 469-476.
- PAYO, G. & E. RUIZ DE LA PARTE (1977). El primer perfil sísmico de la Meseta. Inst. Geográfico Catastral, Madrid. 1-15.
- SURINACH, E. & R. VEGAS (1988). Lateral inhomogeneities of the Hercynian crust in central Spain. *Phys. of the Earth and Planetary Interiors*, 51, 1-3, 226-234.
- ZEYEN, H.J. (1983). *Struktur der Erdkruste des Iberischen Systems in Zentralspanien*. Diplomarbeit, ETH Zurich, 105 pp.
- ZEYEN, H.J.; E. BANDA; J. GALLART & J. ANSORGE (1985). A wide-angle seismic reconnaissance of the crust and upper mantle in the Celtiberian chain (Spain). *Earth and Planetary Science Letters*, 75, 393-402.

LEVANTE Y GOLFO DE VALENCIA

- BANDA, E.; J. ANSORGE; M. BOLOIX & D. CÓRDOBA (1980). Structure of the crust and upper mantle beneath the Balearic Islands (western Mediterranean). *Earth planet. Sci. Lett.*, 49, 219-230.
- CÓRDOBA, D. (1980). *Uso de amplitudes para la determinación de gradientes de velocidad en la corteza y manto superior de las islas Baleares*. Tesis de Licenciatura. Univ. Complutense de Madrid.
- DAÑOBEITIA, J.J.; M. ARGUEDAS; J. GALLART; E. BANDA & J. MAKRIS (1992). Deep seismic configuration of the Valencia Trough and its Iberian and Balearic borders from extensive refraction-wide angle reflection seismic profiling. *Tectonophysics*, 302, 37-55.
- FAHLQUIST, D.A. (1963). *Seismic refraction measurements in the Western Mediterranean Sea*. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., 173pp.
- FALHQUIST, D.A. & J. B. HERSEY (1969). Seismic refraction measurements in the Western Mediterranean Sea. *Bull. Inst. Oceanogr.*, 67, 1386.

- GALLART, J.; H. ROJAS; J. DÍAZ & J. J. DAÑOBEITIA (1990). Features of deep crustal structure and transition offshore-onshore at the Iberian flank of the Valencia Trough (Western Mediterranean). *Journal of Geodynamics*, 12, 233-252.
- GALLART, J.; N. VIDAL & J. J. DAÑOBEITIA (1994). Lateral variations in the deep crustal structure at the Iberian margin of the Valencia trough imaged from seismic reflection methods. *Tectonophysics*, 232, 59-75.
- GALLART, J.; N. VIDAL & J. J. DAÑOBEITIA (1995). Multichannel seismic image of the crustal thinning at the NE Iberian margin combining normal and wide angle reflection data. *Geophysical Research Letters*, 22, 4, 489-492.
- GALLART, J.; N. VIDAL; A. ESTEVEZ; J. POUS; F. SABAT; C. SANTISTEBAN; E. SURIÑACH & THE ESCI-VALENCIA TROUGH GROUP (1995, pub. 1997). The ESCI-Valencia trough vertical reflection experiment: a seismic image of the crust from the NE Iberian Peninsula to the western Mediterranean. *Revista Sociedad Geológica España*, 8, 4, p. 401-416.
- GALLART, J.; J. DÍAZ; A. NERCESSIAN; A. MAUFFRET & T. DOS REIS (2001). The eastern end of the Pyrenees: seismic features at the transition to the NW Mediterranean. *Geophysical Research Letters*, 28 (11) 2277-2280.
- HINZ, K., (1973). Crustal structure of the Balearic sea. *Tectonophysics*, 20, 1-4, 295-302.
- MAUFFRET, A. (1977a). *Etude géodynamique de la marge del Iles Balears*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- NERCESSIAN, A.; A. MAUFFRET; T. DOS REIS; N. VIDAL; J. GALLART & J. DÍAZ (2001). Deep reflection seismic images of the crustal thinning in the eastern Pyrenees and western Gulf of Lion. *Journal of Geodynamics*, 31 (2) 211-225.
- PASCAL, G. ; M. TORNÉ ; P. BUHL ; A. B. WATTS & A. MAUFFRET (1992). Crustal and velocity structure of the Valencia trough (western Mediterranean), Part II. Detailed interpretation of five Expanded Spread Profiles. *Tectonophysics*, 203, 1-4, 21-35
- TORNÉ, M.; G. PASCAL; P. BUHL ; A. B. WATTS & A. MAUFFRET (1992). Crustal and velocity structure of the Valencia trough (western Mediterranean), Part I. A combined refraction/wide-angle reflection and near-vertical reflection study, *Tectonophysics*, 203, 1-20.
- VIDAL, N. (1995). *Estructura litosférica en el margen oriental de la Península Ibérica a partir de datos de sismica de reflexión vertical y de gran ángulo*. Tesis Doctoral, Univ. Barcelona.

BÉTICAS / MAR DE ALBORÁN

- BANDA, E. (1979). *Perfiles sísmicos de refracción en corteza continental. Estructura de la corteza y manto superior en las cordilleras Béticas*. Tesis Doctoral. Univ. de Barcelona.
- BANDA, E. & J. GARIN (1975). Primeros perfiles sísmicos en España. *Rev. Ibérica*, 162.

- BANDA, E. & J. ANSORGE (1980). Crustal structure under the central and eastern part of Betic Cordilleras. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 63, 515–532
- BANDA, E.; J. GALLART; V. GARCÍA-DUEÑAS; J. J. DAÑOBEITIA & J. MAKRI (1993). Lateral variation of the crust in the Iberian Peninsula. New evidence from the Betic Cordillera. *Tectonophysics*, 221, 53–66.
- BARRANCO, M.L. (1986). *Análisis de la fracturación en el SE de España. Implicaciones geodinámicas*. Tesis de Licenciatura, Univ. Madrid.
- BARRANCO, L.M.; J. ANSORGE & E. BANDA (1990). Seismic refraction constraints on the geometry of the Ronda peridotitic massif (Betic Cordillera, Spain). *Tectonophysics*, 184, 3–4, 379–392
- BOLOIX, M. & D. HATZFELD (1977). Preliminary results of measurements along seismic profiles in the Alboran Sea. *Pub. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.*, A4 (115), 365–368
- COMAS, M.C.; J. J. DAÑOBEITIA; J. ALVAREZ-MARRÓN & J. I. SOTO (1995). Crustal reflections and structure in the Alboran basin: preliminary results of the ESCI-Alboran survey 1995 *Revista Sociedad Geológica España* vol. 8 (4), 529–542
- COMAS, M.; J. I. SOTO; A. R. TALUKDER; J. CAMPOS; J. M. MARTINEZ-MARTINEZ; M. SANCHEZ-GOMEZ. & M. J. ROMAS-ALPISTE (2004). Aftermath of extension and compression in the Alboran Basin evolution: unraveling tectonic evidence from new MCS images. *Geophys. Res. Abst.*, 6, 065078.
- GALLART, J.; J. DÍAZ; N. VIDAL & J. J. DAÑOBEITIA (1995). The base of the crust at the Betics-Alboran Sea transition: evidence for an abrupt structural variation from wide-angle ESCI data. *Revista Sociedad Geológica España*, vol. 8 (4), 519–528
- GARCÍA-DUEÑAS, V.; E. BANDA; M. TORNÉ; D. CÓRDOBA & ESCI-BÉTICAS WORKING GROUP (1994). A deep seismic reflection survey across the Betic Chain (southern Spain): first results. *Tectonophysics*, 232, 77–89
- GRUPO DE TRABAJO DE PERFILES SÍSMICOS PROFUNDOS (1983). Perfiles sísmicos profundos en España 1981, *Bol. Geol. y Min.* 94(4): 339–347.
- MEDIALDEA, T. (1983). *La estructura de la corteza en el extremo occidental de la Cordillera Bética a partir de perfiles sísmicos de refracción. Su interpretación geodinámica*. Tesis de Licenciatura, Univ. Complutense de Madrid.
- MEDIALDEA, T. (2004). *Estructura y evolución tectónica del Golfo de Cádiz*. Tesis Doctoral. Univ. Complutense de Madrid.
- MEDIALDEA, T.; E. SURINACH; R. VEGAS; E. BANDA & J. ANSORGE (1986). Crustal structure under the western end of the Betic Cordillera (Spain). *Annales Geophysicae*, 4, 457 – 464
- UDÍAS, A. (1975a). Deep seismic profiles. In Spanish Commission on the Geodynamics Project (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid. 9–16.

- UDÍAS, A. (1975b). First deep seismic sounding in Spain, Cádiz-Cartagena and Alboran Sea region. *Geodynamic Highlights*, 2, 30-31.
- UDÍAS, A. (1980). Deep Seismic Sounding Studies in Spain. *Final Rep. Comm. on the Geodynamic Project. C.S.I.C.*, 43-57.
- WATTS, A.B.; J. P. PLATT & P. BUHL (1993). Tectonic evolution of the Alboran Sea Basin. *Basin Res.*, 5, 153-177.
- WORKING GROUP FOR DEEP SEISMIC SOUNDING IN SPAIN 1974-1975 (1977). Deep Seismic Soundings in southern Spain., *Pageoph*, 115, 721-735.
- WORKING GROUP FOR DEEP SEISMIC SOUNDING IN ALBORAN 1974 (1978). Crustal seismic profiles in the Alboran sea—preliminary results, *Pageoph*, 116, 166–180.

GOLFO DE CÁDIZ / S. O. DE IBERIA

- CAETANO, H. (1983). *Structure crustale de la zone Sud Portugaise et de la zone Ossa-Morena d'après les études de sismologie expérimentale*. These 3e cycle, Univ. Paris VI.
- GONZÁLEZ, A. (1993). *Perfiles sísmicos profundos en el suroeste de la Península Ibérica. La estructura de la corteza y su evolución geodinámica*. Tesis de licenciatura, Universidad Complutense.
- GONZÁLEZ, A. (1996). *Análisis de señales sísmicas. Estudio de la estructura de la litosfera en el margen suroccidental ibérico*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense.
- GONZÁLEZ, A.; M. TORNÉ; D. CÓRDOBA; N. VIDAL; L. MATIAS & J. DÍAZ (1996). Crustal thinning in the Southwestern Iberian Margin. *Geophysical Research Letters* vol. 23 (18), 2777-2480.
- HIRN, A.; L. SENOS & H. CAETANO (1981). Variações da profundidade da Moho na região da grande falha do Alentejo. Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica.
- MARTÍN DÁVILA, J. (1999). *Estructura y dinámica del Golfo de Cádiz determinadas a partir de métodos geofísicos*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense.
- MATIAS, L. M. (1996). *A sismologia experimental na modelação da estrutura da crosta em Portugal continental*. Ph. D. Thesis, Univ. Lisboa (Portugal).
- MEDIALDEA, T.; R. VEGAS; L. SOMOZA; J. T. VÁZQUEZ; A. MALDONADO; V. DÍAZ-DEL-RÍO; A. MAESTRO; D. CÓRDOBA & M. C. FERNÁNDEZ-PUGA (2004). Structure and evolution of the «Olistostrome» complex of the Gibraltar Arc in the Gulf of Cádiz (eastern Central Atlantic): evidence from two long seismic cross-sections, *Marine Geology*, 209, 1-4, 173-198.
- MUELLER, S. ; C. PRODEHL ; A. S. MENDES & V. SOUSA MOREIRA (1973). Crustal structure in the southwestern part of the Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, 20, 1-4, 307-318.
- PURDY, G.M. (1975). The eastern end of the Azores–Gibraltar plate boundary, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 43, 973–1000.

- SARTORI, R. ; L. TORELLI ; N. ZITELLINI ; D. PEIS & E. LODOLO (1994). Eastern segment of the Azores-Gibraltar line (Central Eastern Atlantic): an oceanic plate boundary with diffuse compressional deformation. *Geology*, 22, 555–558.
- SIMANCAS, F.; A. GONZÁLEZ-LODEIRO; P. JHULIN; A. AYARZA; R. CARBONELL; A. KASHUBIN; D. AZOR; G. R. MARTÍNEZ-POYATOS; E. ALMODOVAR; R. PASCUAL; SAENZ & I. EXPÓSITO (2003). Crustal structure of the transpressional Variscan orogen of SW Iberia: SW Iberia deep seismic reflection profile (IBERSEIS). *Tectonics*, 22, 6, 1962.
- SOUSA MOREIRA, V.; S. MUELLER; A. S. MENDES & C. PRODEHL (1977). Crustal structure of southern Portugal. *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.*, A-4 (115), 413-426.
- SOUSA MOREIRA, V.; S. MUELLER; A. S. MENDES & C. PRODEHL (1978). The deep structure of southern Portugal. In: *Geodinámica de la Cordillera Bética y Mar de Alborán*. University of Granada, 35-41.
- SOUSA MOREIRA, V.; C. PRODEHL; S. MUELLER & A. S. MENDES (1980). Crustal structure of western Portugal. *Proc. of the ESC*.
- ZITELLINI, N.; L. A. MENDES; D. CORDOBA; J. J. DANOBEITIA; R. NICOLICH; G. PELLIS; A. RIBEIRO; R. SARTORI; L. TORELLI; R. BARTOLOMÉ; G. BORTOLUZZI; A. CALAFATO; F. CARRILHO; L. CASONI; F. CHIERICI; C. CORELA; A. CORREGGIARI; B. DELLA VEDOVA; E. GRACIA; P. JORNET; M. LANDUZZI; M. LIGI; A. MAGAGNOLI; G. MAROZZI; L. MATIAS; D. PENITENTI; P. RODRIGUEZ; M. ROVERE; P. TERRINHA; L. VIGLIOTTI & A. ZAHINOS-RUIZ (2001), Source of 1755 Lisbon Earthquake and Tsunami Investigated, *EOS, Transactions*, Am. Geophys. Union 82, 26, 282–285.
- ZITELLINI, N.; L. MATIAS & M. ROVERE (2002). Project Voltaire. Voltaire 002 Cruise Report. *IGM Tech. Report n. 79*. Bologna.

MARGEN ATLÁNTICO / N.O. DE IBERIA

- BANDA, E.; M. TORNÉ & IBERIAN ATLANTIC MARGINS GROUP (1995). Iberian Atlantic Margins Group investigates deep structure of ocean margins, *Eos Trans. AGU* 76(3): 25, 28–29.
- BESLIER, M. O (1996). Data Report: Seismic Line LG12 in the Iberia Abyssal Plain. *Proc. Ocean Drill. Program. Sci. Results*, 149, 737-739.
- BESLIER, M.O.; M. ASK & G. BOILLLOT (1993). Ocean-continent boundary in the Iberia Abyssal Plain from multichannel seismic data. *Tectonophysics*, 218, 4, 383-393.
- CHIAN, D.; K. E. LOUDEN; T. A. MINSHULL & R. B. WHITMARSH (1999). Deep structure of the ocean–continent transition in the southern Iberia Abyssal Plain from seismic refraction profiles: Ocean Drilling Programme (Legs 149 and 173) transect. *J. Geophys. Res.*, 104, 7443–7462.

- CÓRDOBA, D. (1988). *Estudio de la Litosfera en el noroeste de la Península Ibérica. Desarrollo de un sistema de digitalización y procesado de señales sísmicas*. Tesis Doctoral. Univ. Complutense de Madrid.
- CÓRDOBA, D.; E. BANDA & J. ANSORGE (1987). The Hercynian crust in northwestern Spain: a seismic survey. *Tectonophysics*, 132, 4, 321-333.
- CÓRDOBA, D.; E. BANDA & J. ANSORGE (1988). P-wave velocity-depth distribution in the Hercynian crust of Northwest Spain. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 51, 235-248.
- DEAN, S.M.; T. A. MINSHULL; R. B. WHITMARSH & K. LOUDEN (2000). Deep structure of the ocean-continent transition in the southern Iberia Abyssal Plain from seismic refraction profiles: II The IAM-9 transect at 40° 20'N, *J. Geophys. Res.*, 105, 5859-5886.
- DÍAZ, J.; J. GALLART; O. GASPÀ; M. RUIZ & D. CÓRDOBA (2006). Seismicity análisis at the Prestige oil-tanker wreck area (Galicia Margin, NW of Iberia). Accepted in *Marine Geology*.
- GONZÁLEZ, A.; D. CÓRDOBA & D. VALES (1999). Seismic structure of Galicia continental margin, NW Iberian Peninsula. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 26, No.8, pp 1061-1064.
- GROUPE GALICE (1979). The continental margin off Galicia and Portugal: acoustical stratigraphy, dredge stratigraphy and structural evolution. In: Sibuet, Ryan et al., *Init. Repts. DSDP 47* (2), 633-622.
- HENNING, A.T. & D. S. SAWYER (2004). Exhumed upper mantle within the ocean-continent transition on the northern West Iberia margin: Evidence from prestack depth migration and total tectonic subsidence analyses. *J. Geophys. Res.*, 109, B05103, doi: 10.1029/2003JB002526.
- MAUFFRET, A. & L. MONTADERT (1987) Rift tectonics on the passive continental margin off Galicia (Spain). *Mar. Petroleum Geol.* 4, 49_70.
- MAUFFRET, A. & L. MONTADERT (1988). Seismic stratigraphy off Galicia. In: Boillot, Winterer et al., *Proc Init. Rep. ODP*, 10 (B):13-20.
- PÉREZ-GUSSINYÉ, M.; C. R. RANERO & T. J. RESTON (2003). Mechanisms of extension at nonvolcanic margins: Evidence from the Galicia Interior Basin, west of Iberia. *J. Geophys. Res.*, 108,B5, 2245, doi: 10.1029/2001JB000901.
- PINHEIRO, L.M.; R. B. WHITMARSH & P. R. MILES (1992). The ocean-continent boundary off the western continental margin of Iberia-II. Crustal structure in the Tagus Abyssal Plain. *Geophys. J. Int.*, 109, 106-124.
- TÉLLEZ J., (1992). *Análisis e interpretación de ondas P y S de perfiles sísmicos: aplicación al noroeste de la Península Ibérica*. Tesis Doctoral, Univ. Complutense Madrid.
- TÉLLEZ, J.; L. MATIAS; D. CORDOBA & L. A. MENDES-VICTOR (1993). Structure of the crust in the schistose domain of Galicia-Tra-os-Montes (NW Iberia Peninsula). *Tectonophysics*, 221, 81-93.
- TÉLLEZ, J. & D. CÓRDOBA (1996). Observation of converted Moho reflections In the north-west of the Iberian Peninsula. *Geophys. J. Int.*, 124, 7-17.

- TÉLLEZ, J. & D. CÓRDOBA (1998). Crustal shear-wave velocity and poisson's ratio distribution in Northwest Spain. *J. Geodynamics*, 25, 1, 35-45.
- WHITMARSH R.B.; P. R. MILES & A. MAUFFRET (1990). The ocean-continent boundary off the western continental margin of Iberia—I. Crustal structure at 40°30'N. *Geophys. J. Int.* 134 509-531.
- WHITMARSH, R. B.; R. S. WHITE; S. J. HORSEFIELD; J. C. SIBUET; M. RECQ & V. LOUVEL (1996). The ocean - continent boundary off the western continental margin of Iberia III. Crustal structure west of Galicia Bank. *J. Geophys. Res.*, 101, 28291-28314.

CANARIAS

- BANDA, E.; J. J. DAÑOBEITIA; E. SURIÑACH & J. ANSORGE (1981). Features of crustal structure under the Canary Islands. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 55, 11-24.
- BANDA, E.; A. CHECA; J. J. DAÑOBEITIA; J. MEZCUA; R. PARRA; C. R. RANERO; A. RIVERO; J. RUEDA & P. SLOOTWEG (1991). Estudio geofísico de la cuenca oceánica al oeste del Archipiélago Canario. Publicación Técnica num 25 del Inst. Geográfico Nacional, Madrid.
- CANALES, J.P., (1997). *Interacción litosfera oceánica-punto caliente: Aplicación al volcanismo intraplaca (Archipiélagos de Canarias y Sociedad) y dorsal mesooceánica*. Tesis Doctoral. Univ. de Barcelona.
- CANALES, J.P.; J. J. DAÑOBEITIA & A. B. WATTS (2001). Wide-angle seismic constraints on the internal structure of Tenerife, Canary Island. *J. Vol. Geotherm. Res.*, 101, 65-81.
- DAÑOBEITIA, J.J. (1980). Interpretación de la estructura de la corteza en el Archipiélago Canario a partir de perfiles sísmicos profundos de refracción. Tesis de Licenciatura. Univ. Complutense de Madrid.
- FUNCK, T.; T. DICKMANN; R. RIHM; S. KRASTEL; H. LYKKE-ANDERSEN & H. U. SCHMINCKLE (1996). Reflection seismic investigations in the volcanoclastic apron of Gran Canaria and implications for its volcanic evolution. *Geophys. J. Int.*, 125, 519-536.
- GEISSLINGER, A.; H. HIRSCHLEBER; T. M. SCHNAUBELT; J. J. DAÑOBEITIA & J. GALLART (1996). Mapping of volcanic apron and the upper crust between Gran Canaria and Tenerife (Canary Islands) with seismic reflection profiling. *Geomarine Letters*, 16, 57-64.
- WATTS, A.B.; C. PIERCE; J. COLLIER; R. DALWOOD, J. P. CANALES & T. J. HENSTOCK (1997). A seismic study of lithospheric flexure in the vicinity of Tenerife, Canary Islands. *Earth Planet. Sci. Lett.* 146, 431-437.
- YE, S.; J. P. CANALES; R. RIHM; J. J. DAÑOBEITIA & J. GALLART (1999). A crustal transect through the northern and northeastern part of the volcanic edifice of Gran Canaria, Canary Islands. *Journal of Geodynamics*, 28, 3-26.

COMPILACIONES

- BANDA E.; A. UDIAS; S. MUELLER; J. MEZCUA; M. BOLOIX ; J. GALLART & A. APARICIO (1983). Crustal structure beneath Spain from deep seismic sounding experiments, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 142, 277–280.
- MENDES-VICTOR, L.A.; J. Z. SIMÕES & L. MATIAS (1988). The program of deep seismic in Portuguese mainland. *In*: E. Banda and P. Santanach (Editors), *Proc. 5th Workshop on the European Geotraverse (EGT), the Iberian Peninsula*. European Science Foundation, Strasbourg, 13-21.