ACTA GEOLOGICA HISPANICA, v. 29 (1994), nº 1, p. 41-55 (Pub. 1996)

Resultados de la estructura cortical en el margen catalán (NE de la Península Ibérica) a partir de la sísmica profunda de reflexión y refracción

N. VIDAL, J. GALLART y J. J. DAÑOBEITIA

Dpto. de Geofísica. Institut de Ciències de la Terra "J. Almera" - CSIC.

c/ Martí i Franquès s/n, E-08028 Barcelona.

RESUMEN

Se analiza la estructura de la corteza en el NE de la Península Ibérica y en la transición al Mediterráneo a partir de datos geofísicos recientes de sísmica de reflexión y refracción. La línea de sísmica de reflexión profunda ESCI permite disponer de una transecta cortical en tierra, desde los Pirineos hasta la costa Mediterránea, y está en curso de realización su prolongación marina hasta la cuenca sud-balear. La imagen sísmica de la corteza revela la secuencia sedimentaria en las cuencas Cenozoicas y Neógenas, y diferencia una corteza superior casi transparente de una inferior muy reflectiva, desde 13-14 km de profundidad. Los reflectores buzan hacia el norte en la cuenca del Ebro y son sub-horizontales a través de los Catalánides. La base de la corteza se sitúa en torno a los 32 km. En la cuenca de Reus, la potente cobertera sedimentaria hace que la continuidad de las estructuras más internas deba resolverse con datos complementarios de sísmica de gran ángulo y refracción. Dos perfiles paralelos, con una gran densidad de registros, permiten establecer la distribución de velocidades con la profundidad, y documentan el adelgazamiento cortical hacia el Surco de Valencia. La corteza pierde un tercio de su espesor en una distancia de unos 60 km, manteniendo su carácter continental según las velocidades deducidas. El adelgazamiento afecta sobre todo a la corteza inferior. Diversos resultados indican que a lo largo de la línea de costa el Moho presenta variaciones laterales de corta longitud de onda, que pueden asociarse con la estructuración en horst y grabens resultante de la tectónica extensional Neógena que afectó al margen catalán.

Palabras clave: Sísmica de reflexión y refracción. Estructura cortical. Península Ibérica. Margen catalán.

ABSTRACT

Results of the crustal structure in the catalan margin (NE Iberian Peninsula) from reflections and refraction seismics

The crustal structure at the NE Iberian Peninsula and the transition to the Mediterranean is investigated from recent geophysical data based on reflection and refraction seismics. A crustal transect on land, from the Pyrenees to the Mediterranean coast is available after the Spanish steep reflection ESCI profile. Its continuation at sea, across the Valencia trough up to the south Balearic basin is currently under treatment. A complete processing sequence was applied to de ESCI-land line. This included crooked-line geometry, trace editing, static corrections, CMP sorting, dynamic corrections, residual statics, stacking, poststack time variant bandpass filtering, energy balance, time and depth migration, and semblance/coherency filtering. The crustal seismic image documents the sedimentary sequence in the Cenozoic and Neogene basins, and differentiates an almost transparent upper crust from a highly reflective lower crust below 13-14 km depth. The reflectors are deeping northwards beneath the Ebro basin and become sub-horizontal across the Catalanides. The Moho is located at about 32 km depth. In the Reus basin, due to the sedimentary thickness, the continuity of internal structures must be solved using complementary wide-angle and refraction data. High-quality recordings up to 50 km inland of the air-gun shots from the marine ESCI profile provide a complementary image of the structure on land. The lateral variability is investigated using a second profile displaced 30 km to the northeast. The two parallel lines with a high-density of measurements constrain the velocity-depth distribution and reveal a crustal thinning towards the Valencia trough. One third of the crustal thickness is lost in a range of 60 km distance. The crust remains of continental type according to the velocities deduced, and the thinning happens mainly in the lower crust. A number of results along the coast line indicate that the Moho is affected by lateral short-wavelength variations, which can be associated with the horst and graben structuration of the Catalan margin produced by the Neogene extensional tectonics.

Keywords: Reflection/refraction seismics. Crustal structure. Iberian Peninsula. Catalan margin.

INTRODUCCIÓN

La región nor-oriental de la Península Ibérica y la transición al Mediterráneo nor-occidental (Surco de Valencia) se caracterizan por su complejidad geotectónica y estructural. En tierra, la zona está delimitada por cadenas montañosas resultantes de la tectónica compresiva Alpina: Pirineos al norte, Sistema Ibérico al oeste y Béticas al sur-oeste. En mar, el Surco de Valencia se origina en la tectónica extensional Neógena que afecta al margen NE de la Península (ver trabajos de síntesis en Banda y Santanach, 1992). En toda la región coexisten estructuras en horst y graben (Catalánides, cuencas del Vallès-Penedès, etc.).

La superposición de procesos extensionales post-Alpinos dentro de un régimen general compresivo entre las placas Europea y Africana hace preveer que la litosfera de esta región se vea afectada por variaciones laterales importantes en su estructura actual. En este trabajo, se presentan datos geofísicos obtenidos en experimentos recientes de perfiles sísmicos de refracción y reflexión profunda, los cuales proporcionan imágenes muy detalladas de la estructura cortical y confirman la existencia de cambios notables en la reflectividad y el espesor de la corteza.

DATOS GEOFÍSICOS PREVIOS

La zona NE de la Península, el Surco de Valencia y sus flancos han sido objeto en los últimos años de una notable cantidad de estudios geológicos y geofísicos (ver recopilación en Banda y Santanach, 1992). Hasta finales de los 80, los datos geofísicos de estructura profunda eran bastante escasos. Los primeros resultados, basados en perfiles de refracción, apuntaban ya la existencia de un adelgazamiento cortical en la cuenca y el promontorio balear, con indicios de velocidades para las ondas P en el manto anormalmente bajas (Hinz, 1972; Gobert *et al.*, 1972; Banda *et al.*, 1980), respecto de las observaciones en zonas cercanas en el interior de la Península (Gallart *et al.*, 1980; Zeyen *et al.*, 1985).

Más recientemente, se han llevado a cabo diversos experimentos de sísmica de reflexión vertical profunda y de gran ángulo con una gran densidad de registros. Un primer ejemplo es el perfil ECORS: 250 km de sísmica de reflexión vertical a través de los Pirineos, realizado en 1986 y 1987 en cooperación hispano-francesa (ECORS Pyrenees Team, 1988). A lo largo de este perfil se efectuaron también registros complementarios de gran ángulo y de refracción (Daignières *et al.*, 1989; Suriñach *et al.*, 1993).

En segundo lugar, hay que citar el experimento marino multinacional VALSIS (Watts *et al.*, 1990) a lo largo del Surco de Valencia y sus flancos, con un elevado número de perfiles sísmicos con diferentes dispositivos: CDP (punto de reflexión común); COP (distancia de registro constante) y ESP (distancia de registro creciente). Asimismo, algunos perfiles se escucharon en tierra con estaciones autónomas (Gallart *et al.*, 1990). Las imágenes sísmicas de la corteza tienen una buena resolución en las áreas de plataforma continental (flancos Ibérico y Balear del Surco de Valencia). Una corteza inferior reflectiva durante unos 2 s en tiempo doble de recorrido (t.d.) muestra cambios laterales importantes, con disminución aparente de la reflectividad hacia el centro de la cuenca (Torné *et al.*, 1992; Pascal *et al.*, 1992; Mauffret *et al.*, 1992).

EL PROYECTO ESCI-SURCO DE VALENCIA

Dentro del programa ESCI (Estudios Sísmicos de Corteza Ibérica) (Gallart *et al.*, 1994) auspiciado por el Plan Nacional de Recursos Geológicos, el área que nos ocupa ha sido considerada de interés prioritario. Concretamente, se ha financiado un perfil sísmico de reflexión profunda compuesto por dos segmentos, uno en tierra de 50 km de longitud, desde el final del perfil ECORS hasta la costa, efectuado en 1991, y otro en mar de 400 km, continuación del anterior a través del Surco de Valencia hasta el SE de Mallorca, realizado en 1992 (Fig.1).

La finalidad del perfil sísmico ESCI es la de obtener, por primera vez, una transecta cortical continua, desde una cadena montañosa alpina hasta una zona de características estructurales oceánicas. Esta transecta se inicia en los Pirineos, incluyendo sus cuencas de antepaís, a partir de los datos disponibles del perfil ECORS, llega al Mediterráneo atravesando los Catalánides, y muestrea en mar el Surco de Valencia y sus flancos Ibérico y Balear, hasta acabar en la cuenca sud-Balear al SE de Mallorca.

Para completar la imagen cortical que proporciona la sísmica de reflexión en el margen Catalán, se han tenido en cuenta otros dos conjuntos de datos. Por una parte, los disparos con cañones de aire del perfil ESCI marino se registraron no solamente con el dispositivo clásico de sísmica vertical ("streamer" en el barco) sino también a distancias mucho mayores, en estaciones autónomas emplazadas sobre el perfil ESCI de tierra. Se obtienen así imágenes complementarias muy detalladas de reflexiones de gran ángulo. Por otra parte, se dispone de un experimento de perfiles de refracción efectuado en 1989 a partir de un gran número de fuentes explosivas en mar y

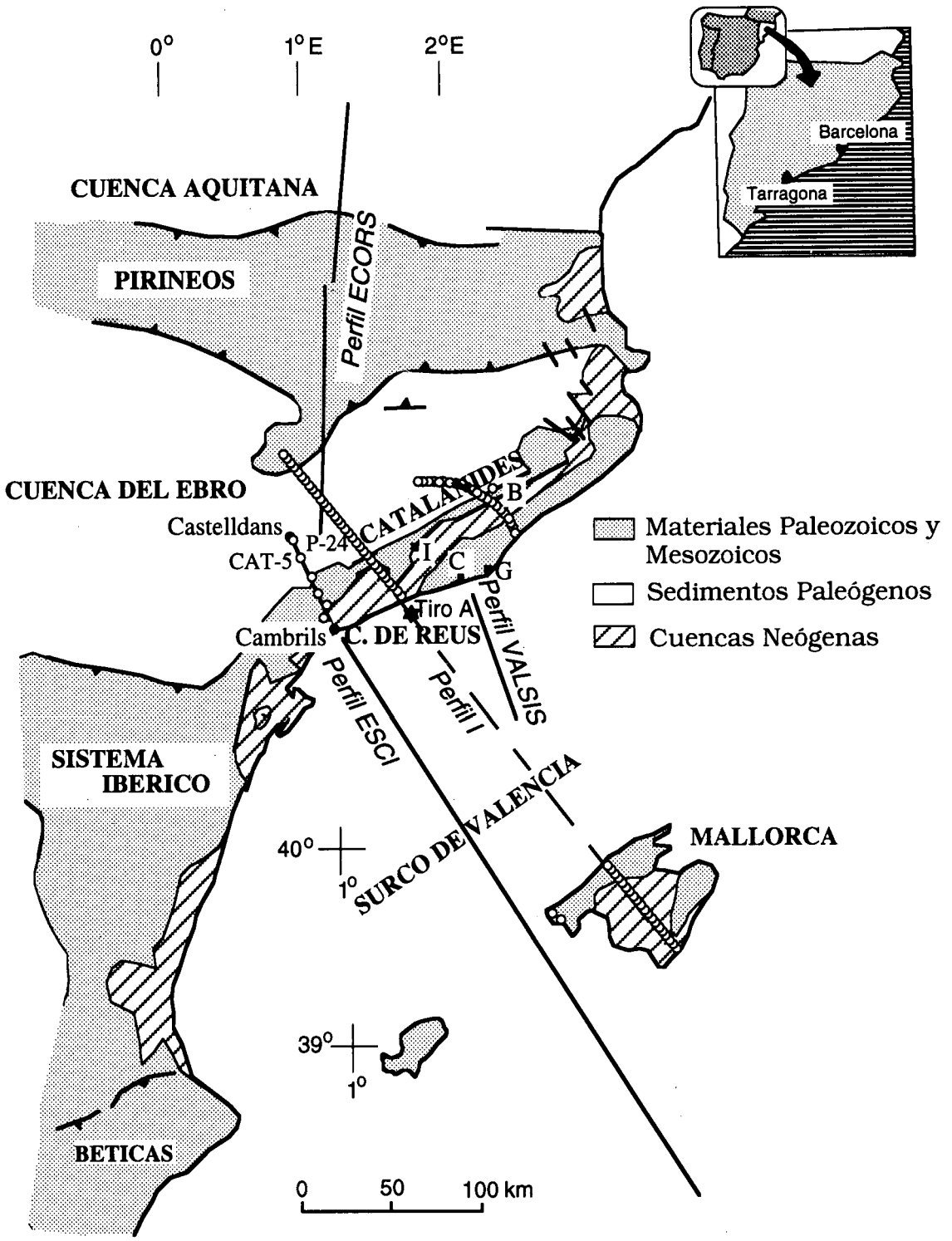


Fig. 1. Esquema Geotectónico del NE de la Península Ibérica con la localización de los perfiles sísmicos considerados en el estudio. Los círculos indican la situación de las estaciones de registro en tierra.

Fig. 1. Geotectonic sketch of the NE Iberian Peninsula including the seismic reflection profiles considered in the study: ESCI, ECORS, Valsis and Profile I. Circles mark location of the recording stations on land.

Adquisición

Tipo de energía	Dinamita
Intervalo entre tiros	240 m
Intervalo entre receptores	60 m
Número de canales	240
Cobertura	30
Longitud del registro	25 s
Intervalo de muestreo	4 ms

Procesado

1) Cambio del intervalo de muestreo : 8ms

2) Introducción de la geometría

3) Edición

4) Cálculo de correcciones estáticas
- modelo de dos capas
  -- velocidad de la primera capa 1600-4000m/s
  -- velocidad de la segunda capa 5000m/s

5) Procesado Prestack
- Corrección de atenuación de la energía por divergencia esférica
- Ordenación en grupos de CMP
- Correcciones estáticas
  -- datum variable
  -- velocidad =4500m/s
- Análisis de velocidades
- Corrección de Normal Moveout
- Aplicación de mute
- Correcciones estáticas residuales
- Suma
- Correcciones estáticas
  -- datum = 400 m

6) Procesado Poststack
- Filtro pasa-banda variable en tiempo
- Balance de energía
- Filtro de coherencia

7) Migración
Conversión a profundidad

Tabla 1. Parámetros principales de adquisición y procesado de datos para el perfil sísmico ESCI de reflexión vertical en tierra.

Table 1. Most important acquisition and processing parameters for the ESCI steep reflection seismic profile on land.

registros en tierra (Dañobeitia *et al.*, 1992). Estos dos conjuntos de datos permiten abordar una interpretación detallada de la distribución de las velocidades sísmicas con la profundidad.

IMAGENES SÍSMICAS DE LA ESTRUCTURA CORTICAL

Perfil ESCI en tierra

El perfil ESCI terrestre representa la continuación del ECORS hacia el sur (Fig.1). Debido a problemas logísticos, el trazado de los dos perfiles no es estrictamente continuo, puesto que el perfil ESCI tiene una orientación más NW-SE, y hay unos 15 km de desplazamiento horizontal entre los extremos de ambos. El perfil ESCI, emplazado entre las poblaciones de Castelldans y Cambrils, atraviesa básicamente tres unidades estructurales: la cuenca Cenozoica del Ebro a lo largo de 24 km, incluyendo el borde oriental del Macizo del Montsant en los últimos 6 km; los terrenos Paleozoicos y Triásicos de los Catalánides a lo largo de 16 km, y la cuenca Neógena de Reus en los 12 km restantes hasta la costa.

La adquisición y un primer procesado estándar de los datos ha corrido a cargo de la Compañía General de Geofísica S.A. Posteriormente, hemos efectuado una secuencia completa y más detallada de procesado, utilizando las facilidades de cálculo de que disponemos: software Insight-1 de ITA-Landmark implementado en estaciones de trabajo IBM-Risc 6000. Los parámetros más importantes en cuanto a la adquisición de la línea, y las etapas principales del procesado se sintetizan en la Tabla 1. En particular, hay que señalar que se ha realizado un cuidadoso análisis en el apartado de correcciones estáticas. En su cálculo y aplicación se han tenido en cuenta las diferencias estructurales de las tres zonas del perfil. El resultado final, es decir, la sección sísmica en tiempo ("stack") y la migración en profundidad de la misma, se muestra en la Figura 2(a,b). Previamente a la visualización, se ha aplicado un filtro de coherencia lateral a las secciones sísmicas, que mejora la relación señal/ruído y la resolución de la imagen sísmica.

En la cuenca del Ebro, un reflector que corresponde al basamento se observa claramente a 0.5 s t.d., remontando hacia los Catalánides, donde desaparece (Fig.2a). En los 12 km más al SE del perfil, aparece muy marcada la secuencia sedimentaria de la cuenca de Reus en los primeros 2 s t.d.. La corteza superior, por debajo de los sedimentos, resulta muy transparente a lo largo de toda la

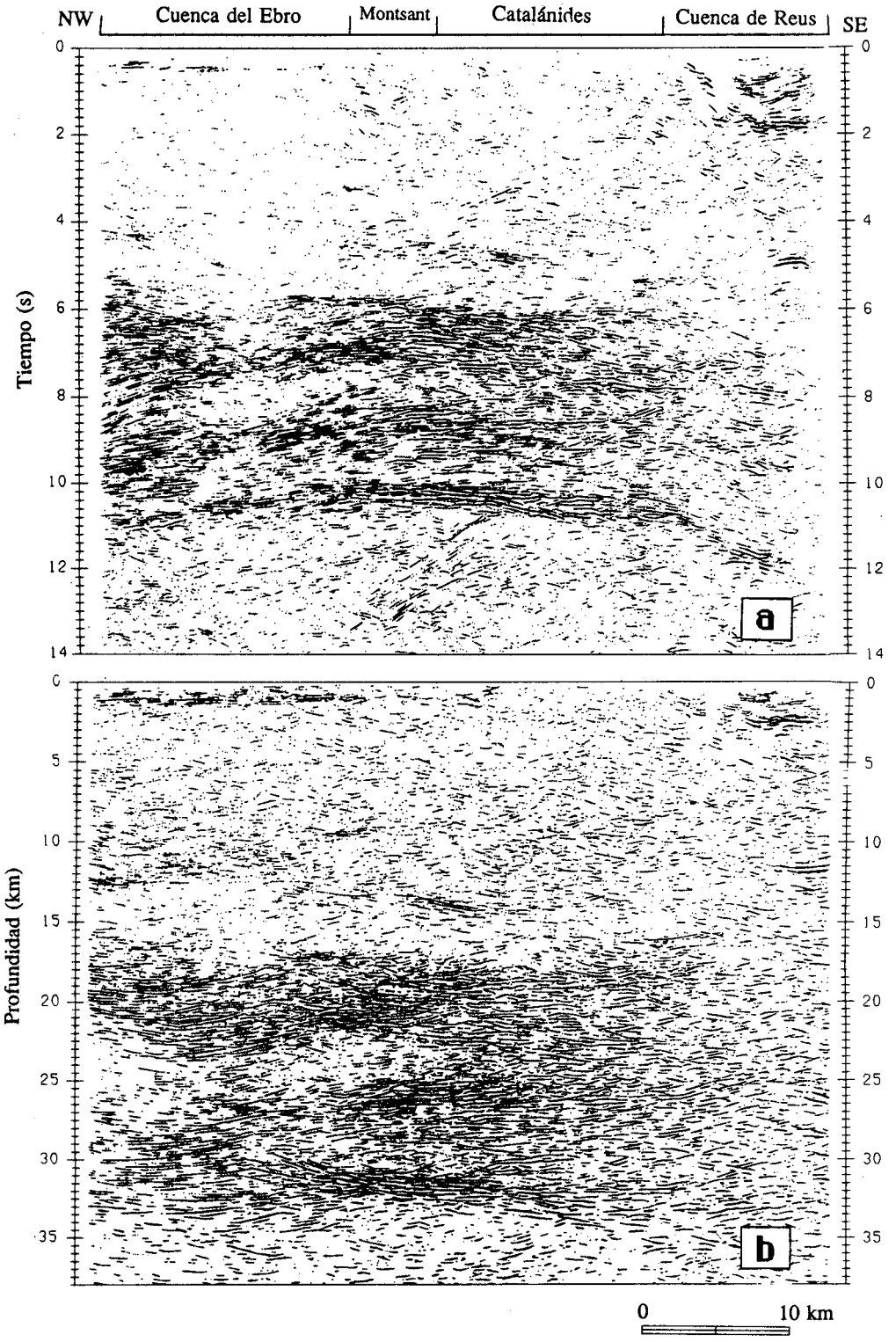


Fig. 2. Secciones sísmicas en (a) tiempo doble de recorrido y (b) profundidad correspondientes al perfil sísmico terrestre ESCI. En ambas imágenes se ha aplicado un filtro de coherencia para aumentar la relación señal/ruido.

Fig. 2. Seismic sections in (a) time (T.W.T.) and (b) depth corresponding to the ESCI seismic land profile. Migration has been performed considering the velocities obtained from the forward modelling. A coherency filter has been applied in both cases to enhance the signal to noise ratio.

sección, en contraste con una corteza inferior muy reflectiva observada entre 5 y 11 s t.d.. Aunque esta reflectividad globalmente es de tipo laminar, pueden distinguirse tres bandas en que se concentran los reflectores, la más profunda de las cuales, muy intensa, se interpreta como correspondiente al Moho.

El carácter reflectivo de la corteza inferior bajo la cuenca de Reus es más débil y difuso que en el resto del perfil. Un análisis espectral de los registros en esa zona, muestra una atenuación importante de las altas frecuencias, debida probablemente a la potencia sedimentaria de la cuenca. Otro efecto atribuible a los sedimentos Neógenos es la imagen de buzamiento aparente del Moho en esa zona (Fig. 2a). La localización del Moho entre 11 y 12 s t.d. viene determinada por las bajas velocidades en la parte más superficial de la corteza. Estas velocidades son muy inferiores a las del resto de la línea, según se deduce de los análisis de velocidades efectuados directamente en los registros de los tiros del perfil multicanal, y se corrobora con la información de sondeos existente (Bartrina *et al.,* 1992).

Una imagen de la estructura interna bajo el perfil de más fácil interpretación viene dada por la migración y conversión a profundidad de la sección sísmica en tiempo (Fig. 2b). Las velocidades consideradas en la migración provienen de las velocidades obtenidas durante la interpretación de los registros de gran ángulo y refracción (ver apartado 5.1). En la Fig. 2b es bien patente el carácter reflectivo de la corteza inferior entre 15 y 32 km de profundidad, y se observa una buena definición del Moho en todo el perfil, salvo en la parte final de la cuenca de Reus, donde la relación señal/ruido disminuye en toda la corteza inferior.

Sección conjunta ECORS-ESCI

Para obtener la transecta cortical entre los Pirineos y la costa Mediterránea hay que considerar conjuntamente las secciones ECORS y ESCI (Fig.1). En ambos perfiles el dispositivo de registro, las fuentes sísmicas y la cobertura fueron estrictamente idénticas, por lo que ambas secciones son directamente comparables. La Figura 3 muestra la sección ESCI y su continuación hacia el norte, el segmento de ECORS correspondiente a la cuenca del Ebro. La sección de ECORS que se presenta es la que resulta del procesado estándar efectuado por el contratista y distribuída a los diferentes grupos integrantes del proyecto. Se le ha aplicado únicamente un filtro de coherencia, al igual que a la sección ESCI, para resaltar mejor los eventos sísmicos.

En la Figura 3 puede destacarse la continuidad del carácter reflectivo de la corteza en ambos perfiles. La cobertera sedimentaria queda bien marcada en la cuenca del Ebro, y la corteza superior es poco reflectiva, en contraste con la elevada reflectividad observada a partir de 6 s t.d.. Los reflectores profundos presentan un acusado buzamiento hacia el norte a lo largo de la cuenca del Ebro, analizado en otros trabajos (Suriñach *et al.,* 1993), pasando a sub-horizontales hacia los Catalánides, donde se hace más patente la agrupación en bandas de reflectores. Al atravesar los Catalánides todavía no se observan indicios de adelgazamiento cortical hacia el Mediterráneo. En cambio, la menor respuesta sísmica en los 10 km del perfil ESCI más cercanos a la costa pudiera corresponder a un cambio global en la estructura cortical, aunque también puede deberse esencialmente a la presencia de la cuenca sedimentaria de Reus, cuya potencia puede ocasionar una disminución de la energía sísmica que penetra hacia el interior de la corteza.

DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES CON LA PROFUNDIDAD: SÍSMICA DE REFLEXIÓN DE GRAN ÁNGULO Y REFRACCIÓN

En el margen Catalán, se pueden analizar también características de la transición cortical tierra-mar a partir de los datos de reflexión de gran ángulo y refracción obtenidos en dos experimentos distintos.

En el primero de ellos, se efectuaron tres perfiles entre la Península y las Baleares (Dañobeitia *et al.,* 1992) utilizando fuentes explosivas en mar registradas por estaciones en tierra, y por algunos OBS (sismómetros marinos de profundidad) en el Surco de Valencia (Fig.1). Se dispararon cargas de 20 kg de explosivos, con un espaciado entre tiros de 1.5 km, que fueron registradas por 50 estaciones alineadas en la Península y 20 en Mallorca, espaciadas entre sí 2 km. Además, algunos tiros más potentes (100 kg) cerca de la costa catalana fueron registrados por otras 30 estaciones en tierra, dispuestas en abanico para estudiar, a una distancia constante, la variación hacia el interior de la Península de las reflexiones en la base de la corteza. Adicionalmente, 4 OBS proporcionan información sobre la evolución cortical hacia el Surco de Valencia.

El segundo experimento consistió en el registro en estaciones autónomas en tierra del perfil marino multicanal ESCI de reflexión vertical (Fig.1). Los disparos con cañones de aire comprimido, de un volumen total de

120 l. y efectuados cada 75 m, fueron registrados por 6 estaciones distribuídas cada 10 km desde la cuenca de Reus hasta la del Ebro, cubriendo todo el perfil ESCI de tierra. Además, otras 2 estaciones escucharon estos disparos desde la isla de Mallorca. Los sismogramas obtenidos muestran una buena relación señal/ruido hasta distancias de unos 150 km.

A continuación, se presentan los modelos de distribución de velocidad de las ondas P con la profundidad obtenidos a partir del perfil ESCI, así como del perfil I del experimento de refracción (Dañobeitia *et al.*, 1992), paralelo al ESCI y desplazado unos 30 km al NE (Fig.1). La interpretación se realiza ajustando los sismogramas experimentales con los teóricos generados por técnicas convencionales de trazado de rayos (Spence et al., 1984). En cada perfil, los modelos se han obtenido considerando una estación cada 10 km. Los datos se presentan en ensamblajes con amplitud normalizada para cada traza, velocidad de reducción de 6 km/s, y habiendo aplicado una corrección batimétrica para eliminar la influencia de la capa de agua.

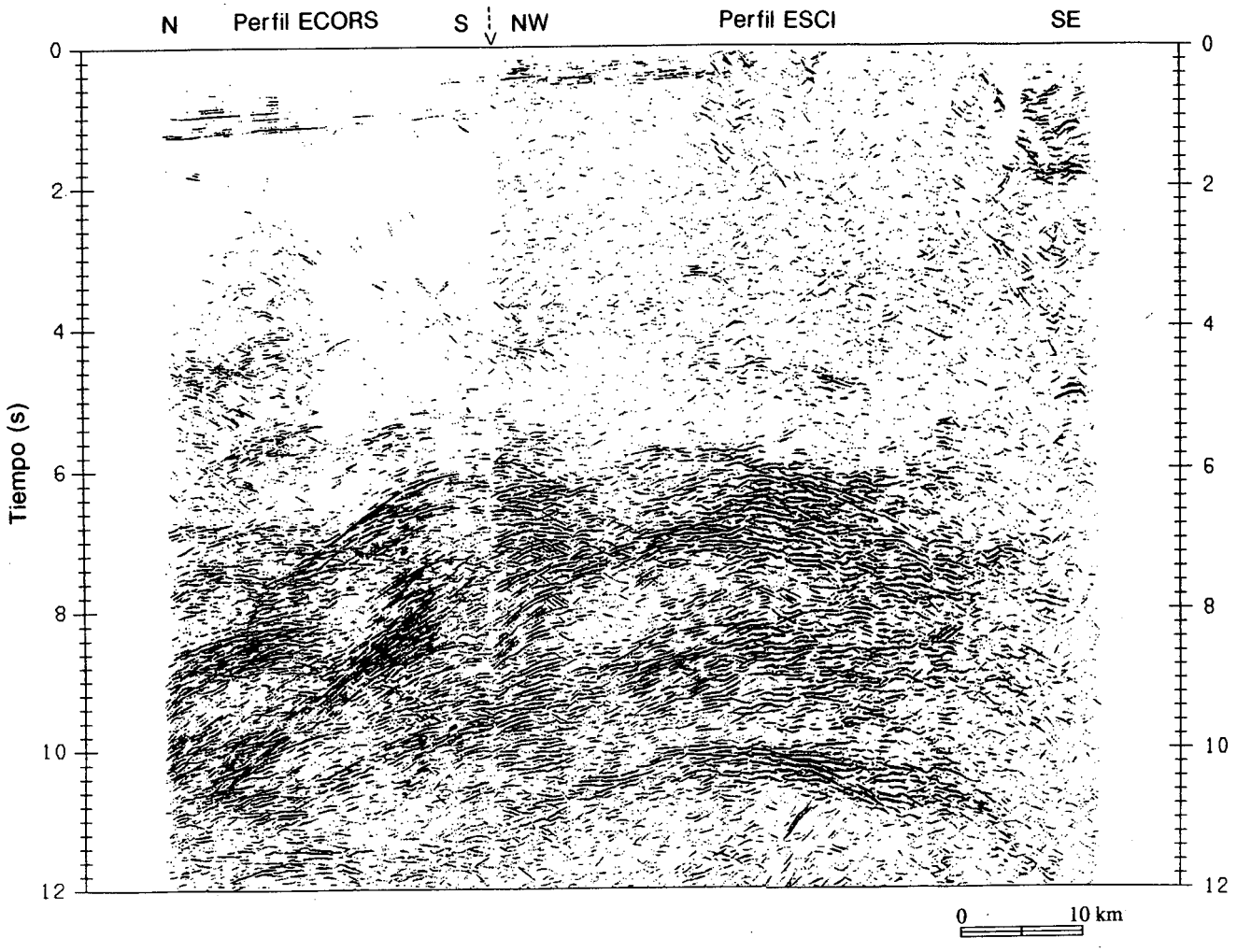


Fig. 3. Sección conjunta en tiempo del perfil sísmico vertical ESCI y su continuación hacia el norte en la cuenca del Ebro (perfil ECORS). Puede observarse la consistencia de las imágenes reflectivas de la corteza en ambos perfiles.

Fig. 3. Composed section of the deep profile ESCI and its continuation northwards in the Ebro basin (profile ECORS). Both profiles were acquired using the same type of source and geometry. The two lines have been referred to a constant 400 m datum plane. Consistency in the crustal reflective patterns is observed.

Perfil ESCI

La Figura 4 muestra un ejemplo de los sismogramas obtenidos en la estación Cat-5, emplazada en la Cuenca del Ebro, a unos 45 km de distancia de la costa. En el ensamblaje pueden identificarse con claridad diversas fases sísmicas refractadas y reflejadas, ya sea en el basamento (P_g), en la corteza intermedia (P_iP), o en la base de la corteza (P_MP y P_n). Es de destacar la buena correlación no solamente de las reflexiones P_MP sino también de las refracciones en el Moho (P_n). Este hecho no es muy habitual en registros a partir de disparos de aire comprimido, y nos ha permitido ajustar con mayor precisión la estructura y distribución de velocidades con la profundidad.

La interpretación de los datos de la estación Cat-5 y el modelo global obtenido se muestran en la Figura 5. A efectos de una comparación visual más directa con los datos disponibles del perfil I (Fig. 6), en la Fig. 5a se han eliminado trazas hasta conseguir un espaciado similar al de la estación 24 (perfil I). Las Fig. 5a y 5b permiten observar el ajuste entre los tiempos de llegada y amplitudes experimentales y los que resultan del modelo teórico. El modelo sobre el que se ha efectuado el trazado de rayos es el de la Fig. 5c, y se ha obtenido ajustando por aproximaciones sucesivas los datos de todas las estaciones de este perfil. Es de destacar la consistencia de este modelo con las observaciones disponibles, ya que se ha mantenido el criterio de que la diferencia entre los tiempos de llegada seleccionados y calculados no superara en ningún caso 0.1 s.

El modelo de velocidades resultante para el perfil ESCI (Fig. 5c y Fig. 8) abarca una longitud total de unos

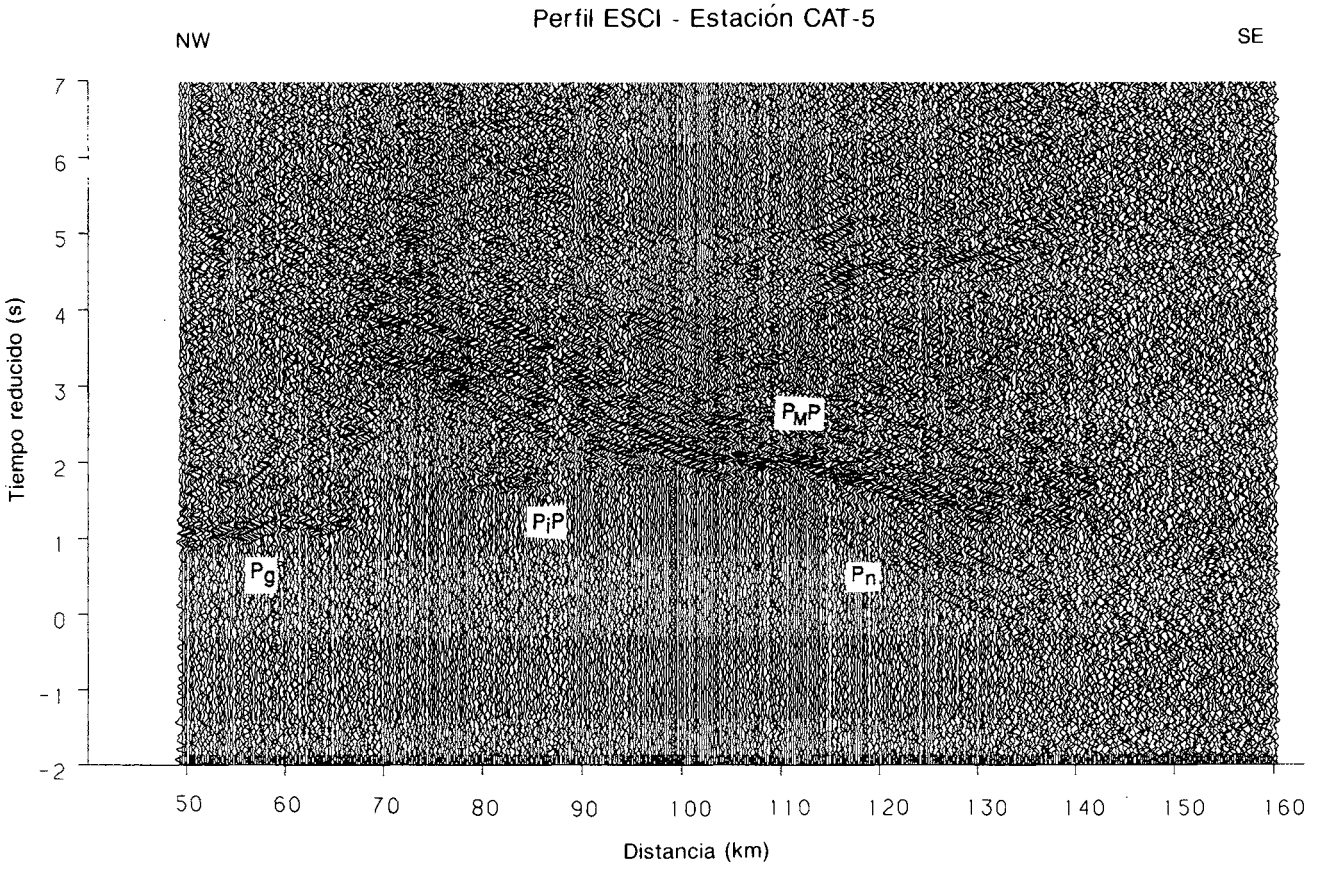


Fig. 4. Ensamblaje de los tiros con aire comprimido del perfil sísmico marino ESCI registrados en la estación CAT-5 situada en la cuenca del Ebro a 45 km de la costa. Para una visualización más clara se dibuja una de cada tres trazas. Se ha considerado un filtro pasabanda entre 3-15Hz, una velocidad de reducción de 6 km/s y la correspondiente corrección batimétrica. Se indican las fases sísmicas principales.

Fig. 4. Air-gun shots of the marine ESCI profile recorded at station CAT-5 located 45 km inland in the Ebro Basin. For a better display contrast, one trace out of three is plotted. A 3-15 Hz bandpass filter, a reduction velocity of 6 km/s and the bathymetric correction have been applied. Main refracted seismic phases Pg and Pn, as well as reflected phases P_MP and PiP can be correlated easily in all the record sections.

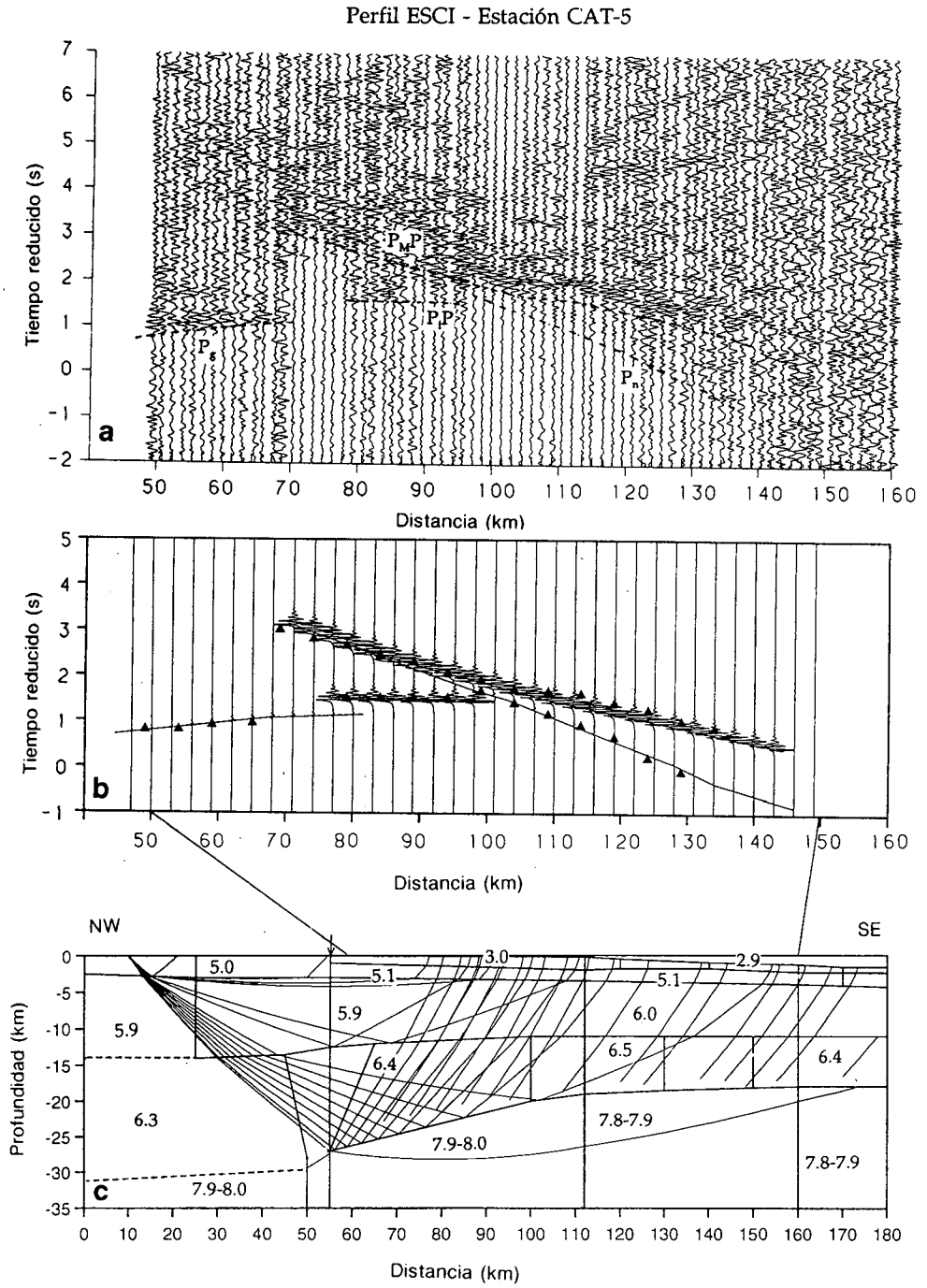


Fig. 5. a) Ensamblaje de la estación CAT-5, perfil ESCI, con la correlación de las fases sísmicas más claras. Se ha realizado una reducción en el número de trazas con el fin de comparar estos registros con los del perfil I. b) Sismogramas sintéticos obtenidos y ajuste con las observaciones experimentales (triángulos). c) Trazado de rayos para la estación CAT-5. La flecha muestra la posición de la línea de costa. El modelo cortical corresponde al obtenido ajustando todas las estaciones del perfil ESCI. En las zonas en que no hay suficiente resolución, los horizontes se indican mediante trazo discontinuo.

Fig. 5. a) Record section for station CAT-5, profile ESCI, with correlation of main seismic phases. In order to compare the data of profiles I and ESCI, the number of traces has been reduced. b) Synthetic seismograms and observed travel times (triangles). c) Ray-tracing for station CAT-5. The arrow indicates the coast line. The velocity-depth model has been fitted taking into acount all the ESCI land stations. In areas lacking of resolution, crustal horizons are plotted in dashed lines.

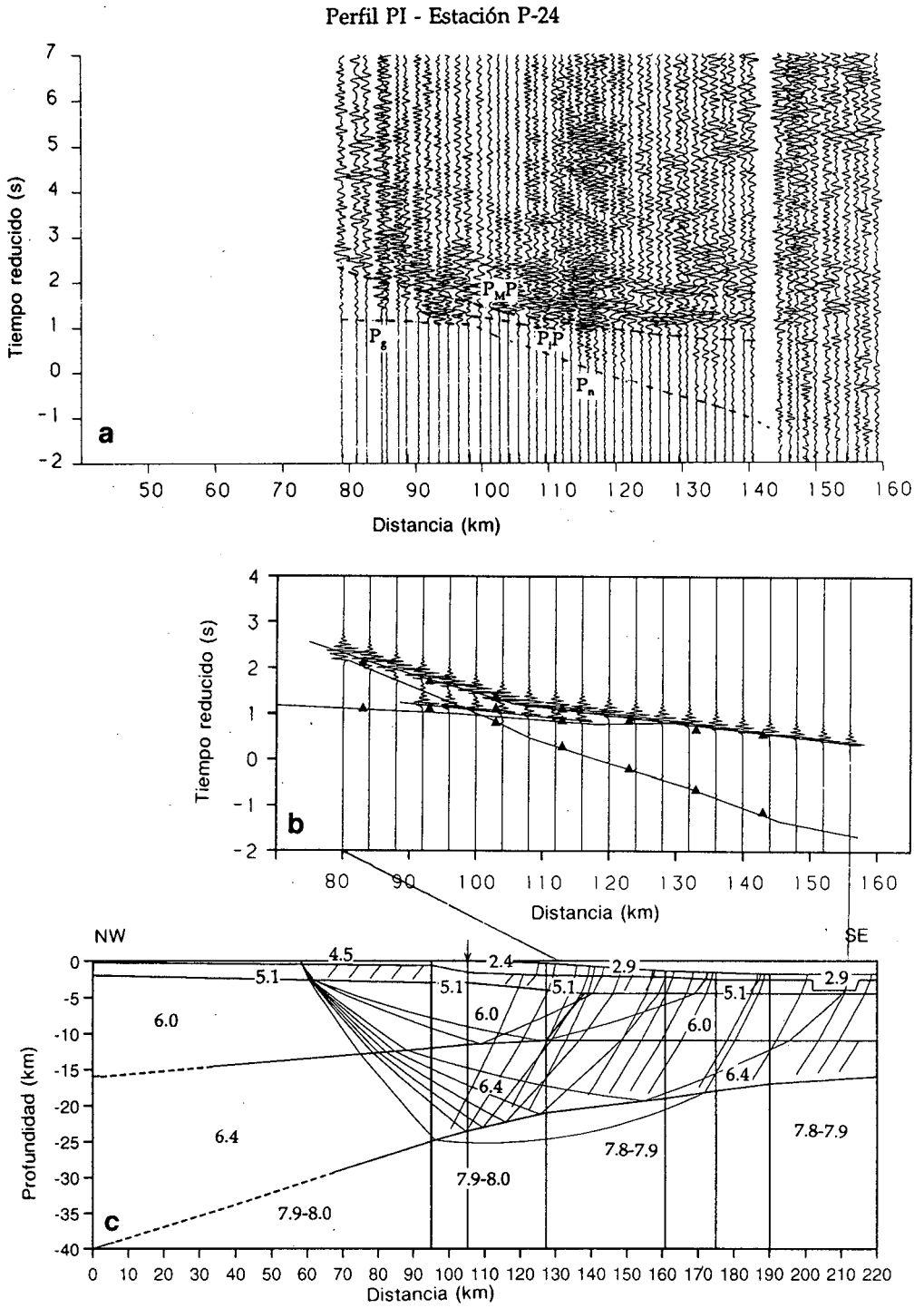


Fig. 6. - a) Ensamblaje correspondiente a la estación P-24, perfil I, situada 50 km hacia el interior, con la correlación correspondiente a las fases sísmicas análogas a las del perfil ESCI. b) Sismogramas sintéticos obtenidos y observaciones experimentales (triángulos). c) Trazado de rayos para la estación P-24 según el modelo global obtenido para el perfil I. En las zonas en que no hay suficiente resolución, los horizontes se indican mediante trazo discontinuo.

Fig. 6. - a) Record section for station P-24, profile I, located 50 km inland, with correlation of seismic phases as in profile ESCI. b) Synthetic seismograms and observed travel times (triangles). c) Ray-tracing for station P-24 with the global model obtained for profile I. In areas lacking of resolution, crustal horizons are plotted in dashed lines.

150 km, con un primer segmento en tierra de 50 km. Las velocidades en la secuencia sedimentaria representan un promedio de los valores observados en los registros de los tiros del perfil multicanal, mientras que a una profundidad de unos 3 km se alcanzan velocidades del orden de 6 km/s a lo largo de todo el perfil. Las fases P_iP se interpretan como procedentes de una discontinuidad en que la velocidad aumenta a 6.4 km/s. Este reflector está a unos 14 km de profundidad cerca de la costa, y se mantiene cuasi-constante en todo el perfil. La comparación con la sección vertical (Fig. 2b) sugiere que este horizonte corresponde al límite superior de la corteza inferior reflectiva. De acuerdo con las correlaciones de P_MP y P_n, el Moho está claramente definido; se sitúa a 32 km bajo la cuenca del Ebro al principio del perfil, se mantiene a profundidades de 27-28 km bajo la línea de costa, y remonta claramente en la plataforma, hasta unos 18 km hacia el centro de la cuenca.

Perfil I

Para obtener un modelo estructural a lo largo del perfil I (Fig.1), paralelo al ESCI unos 30 km al NE, se han utilizado 12 estaciones en la península, 6 en Mallorca y 4 OBS a lo largo de la cuenca. En la Figura 6 se muestran los registros de una estación representativa, la nº 24 situada en la cuenca del Ebro, a unos 48 km de la costa, y comparable a la del perfil ESCI de gran ángulo (Fig. 5). Se han identificado también las fases sísmicas más claras: P_MP y P_n. La fase P_g se puede observar en general para distancias de registro inferiores a 90 km, mientras que en la mayoría de estaciones la fase P_iP es menos clara que en el perfil ESCI.

El modelo cortical para el perfil I se presenta en las Fig. 6c, y Fig. 8, y en su ajuste se han aplicado los mismos criterios que en el caso de ESCI. La información

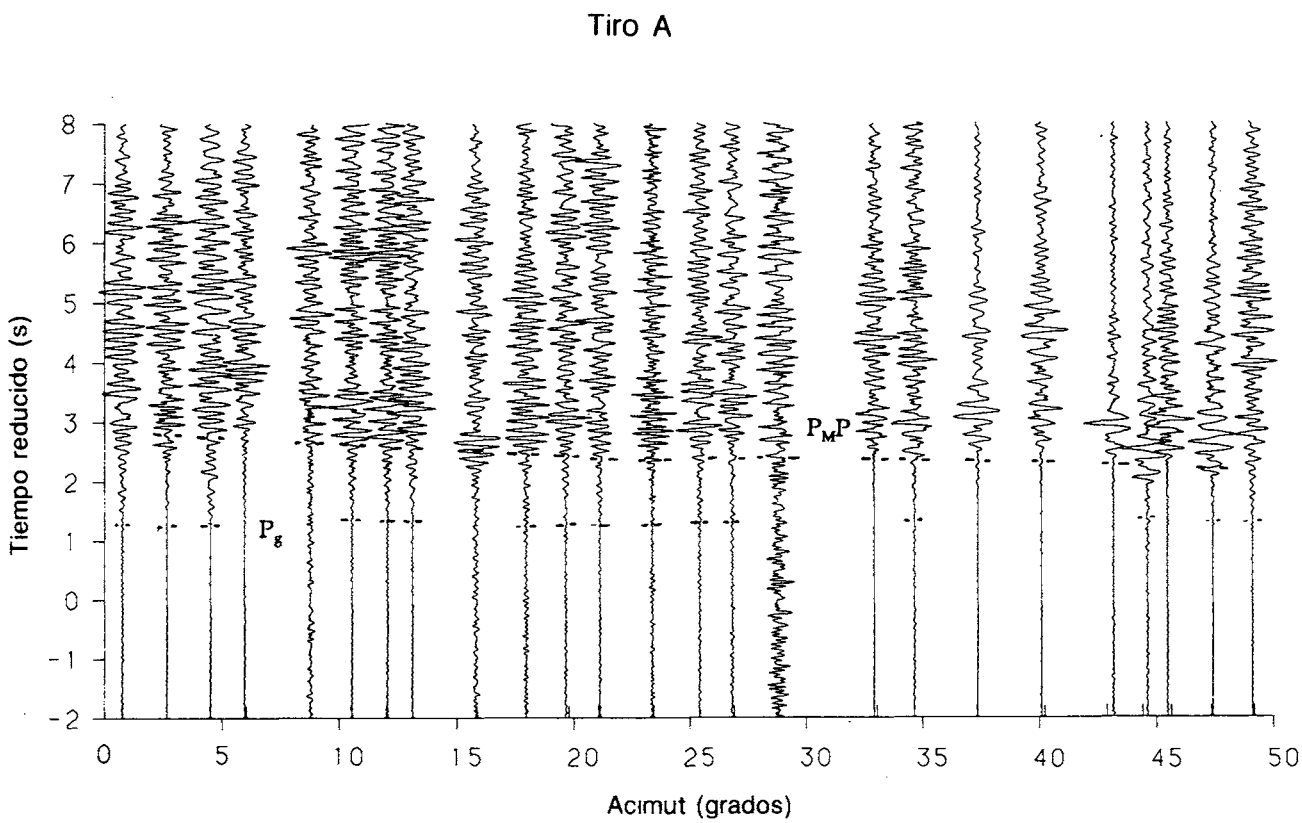


Fig. 7. Ensamblaje correspondiente al tiro A registrado en abanico a una distancia constante de 85 km. Las estaciones se representan en acimut. La velocidad de reducción aplicada es de 6 km/s. Se muestran las correlaciones de las primeras llegadas y de la fase P_MP.

Fig. 7. Record-section for shot A recorded in a fan profile at 85 km distance. Stations are displayed with respect to the azimuth. A reduction velocity of 6 km/s has been applied. Correlations of first arrivals and the P_MP phase are shown. Velocity-depth modelling gives information about the crustal thickness at points C (24 km) and I (27 km) (Fig. 1).

proporcionada por los OBS permite un buen control de la secuencia sedimentaria, en la que se han diferenciado dos capas con velocidades que varían entre 2.4 y 5.1 km/s. El basamento se localiza a una profundidad media de 3 km, y la transición hacia velocidades de 6.4 km/s se sitúa a unos 10 km de profundidad en todo el perfil. Las observaciones de la energía procedente de la base de la corteza ponen de relieve un adelgazamiento cortical continuado a lo largo del perfil. A 50 km en el interior de la península el Moho se sitúa a 32 km de profundidad; bajo la línea de costa está a 24 km, y en el centro de la cuenca remonta hasta 16-17 km.

La comparación de los modelos obtenidos para los perfiles I y ESCI muestran la existencia de variaciones laterales de estructura, con espesores de corteza inferiores en 3-4 km para del perfil I. Estas variaciones son coherentes con los datos gravimétricos existentes, que presentan un mayor gradiente en las anomalías de Bouguer a lo largo del perfil I, y pueden ser ajustadas por modelos de densidad consistentes con la sísmica (Gallart *et al.*, 1994).

Otros datos complementarios

Para comprobar el alcance de estas variaciones laterales de estructura profunda, se pueden examinar otros datos sísmicos cercanos. En el experimento de 1989 (Dañobeitia *et al.*, 1992), además del perfil I en línea, se dispuso un perfil en abanico (Fig. 1) formado por 30 estaciones en tierra, desde la costa hasta 50 km hacia el interior. Estas estaciones registraron dos tiros en mar, al principio del perfil I, a unas distancias constantes de 85 y 95 km respectivamente.

La Figura 7 corresponde al ensamblaje del tiro registrado a 85 km, presentado con una velocidad de reducción de 6 km/s, y con las estaciones dispuestas en acimut. En la mayoría de estaciones, las primeras llegadas (de amplitud débil) se observan a un tiempo reducido similar, de unos 1.3 s. En cambio, las reflexiones en la base de la corteza, aunque con ciertas irregularidades, se correlacionan para tiempos de llegada que aumentan desde las estaciones más cercanas a la costa (acimut de 50°), t= 2.3 s, hasta las estaciones más al interior (acimut de 0°), t=2.8 s. Si suponemos que a lo largo del perfil en abanico la velocidad promedio de la corteza no debe variar sensiblemente (lo que es consistente también con los resultados de los perfiles I y ESCI), esta variación en los tiempos de llegada se traduce directamente en un aumento del espesor cortical. Considerando el modelo de velocidades del perfil I, se obtienen en los extremos del abanico unos espesores de corteza de 24 km en la costa (Fig.1,punto C) y 27-28 km en el interior (punto I). Estos espesores corresponden a los puntos en que se producen las reflexiones de las ondas, es decir, a medio camino entre el foco y el receptor. Tales puntos se encuentran respecto del perfil I a distancias de unos 40 km al NE en la línea de costa, y a solo 22 km en el final del abanico (25 km hacia el interior). Los resultados del perfil en abanico muestran una continuidad de los espesores corticales hacia el NE del perfil I.

Por último, se han analizado los registros, en una estación a 40 km al norte de Barcelona, de uno de los perfiles de la campaña VALSIS (Gallart *et al.*, 1990). Este perfil (Fig. 1) da información sobre el espesor cortical a la altura de la costa de Barcelona (punto G), es decir, unos 65 km al NE del perfil I. Si para interpretar los datos del perfil VALSIS (Figura 4 de Gallart *et al.*, 1990) consideramos el mismo modelo de velocidades obtenido en el perfil I, el Moho se localiza aquí a únicamente 22 km de profundidad bajo la línea de costa. Ello indica entonces una nueva variación lateral hacia el NE, con disminución del espesor de la corteza a la altura de Barcelona.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis de un gran número de datos experimentales, obtenidos en estudios recientes en que se combinan las técnicas de sísmica de reflexión vertical y de gran ángulo, permite establecer las características actuales de la estructura cortical de la zona nor-oriental de la Península y de la transición al Mediterráneo. La utilización conjunta de estas técnicas sísmicas proporciona unas imágenes coherentes, que ponen de relieve las fuertes variaciones laterales que experimenta la corteza en la región, y resuelven en particular los detalles estructurales en la transición tierra-mar.

Los resultados del perfil ESCI de sísmica de reflexión vertical en su segmento terrestre permiten extender con continuidad la imagen cortical proporcionada por el perfil ECORS-Pirineos hasta la costa Mediterránea. Las secciones de ambos perfiles muestran una notable consistencia en su zona de unión, en la Cuenca del Ebro (Fig.3). En ella se observa una corteza superior transparente bajo los sedimentos, en contraste con una elevada reflectividad en la corteza inferior, desde 14 km de profundidad. Los reflectores tienen un buzamiento claro hacia el norte. Mas al sur, hacia el macizo del Montsant y a través de los Catalánides esta reflectividad, igualmente intensa, pasa a ser sub-horizontal, y tiende a agruparse en

tres bandas de reflectores. La base de la corteza se mantiene en torno a los 32 km de profundidad hasta la cuenca de Reus.

La energía sísmica al atravesar la potente secuencia sedimentaria de la cuenca de Reus sufre una atenuación importante, con pérdida de altas frecuencias, lo que conduce a una imagen mucho más difusa de la estructura cortical profunda. El grado de continuidad de las estructuras bajo esta cuenca debe analizarse a partir de otro tipo de datos sísmicos. Especialmente resolutiva resulta aquí la sísmica de gran ángulo, en la que se pueden utilizar dispositivos de registro y emisión fuera de la zona perturbada, y se ilumina la corteza con ángulos de incidencia para los que los coeficientes de reflexión son más elevados. A partir de los tiros del perfil marino ESCI registrados en tierra, los resultados de gran ángulo bajo la cuenca de Reus confirman la continuidad tanto del Moho como del reflector a 14-15 km de profundidad que marca la transición a corteza inferior. Se pone también de manifiesto que la corteza empieza a adelgazarse únicamente en las inmediaciones de la costa Mediterránea.

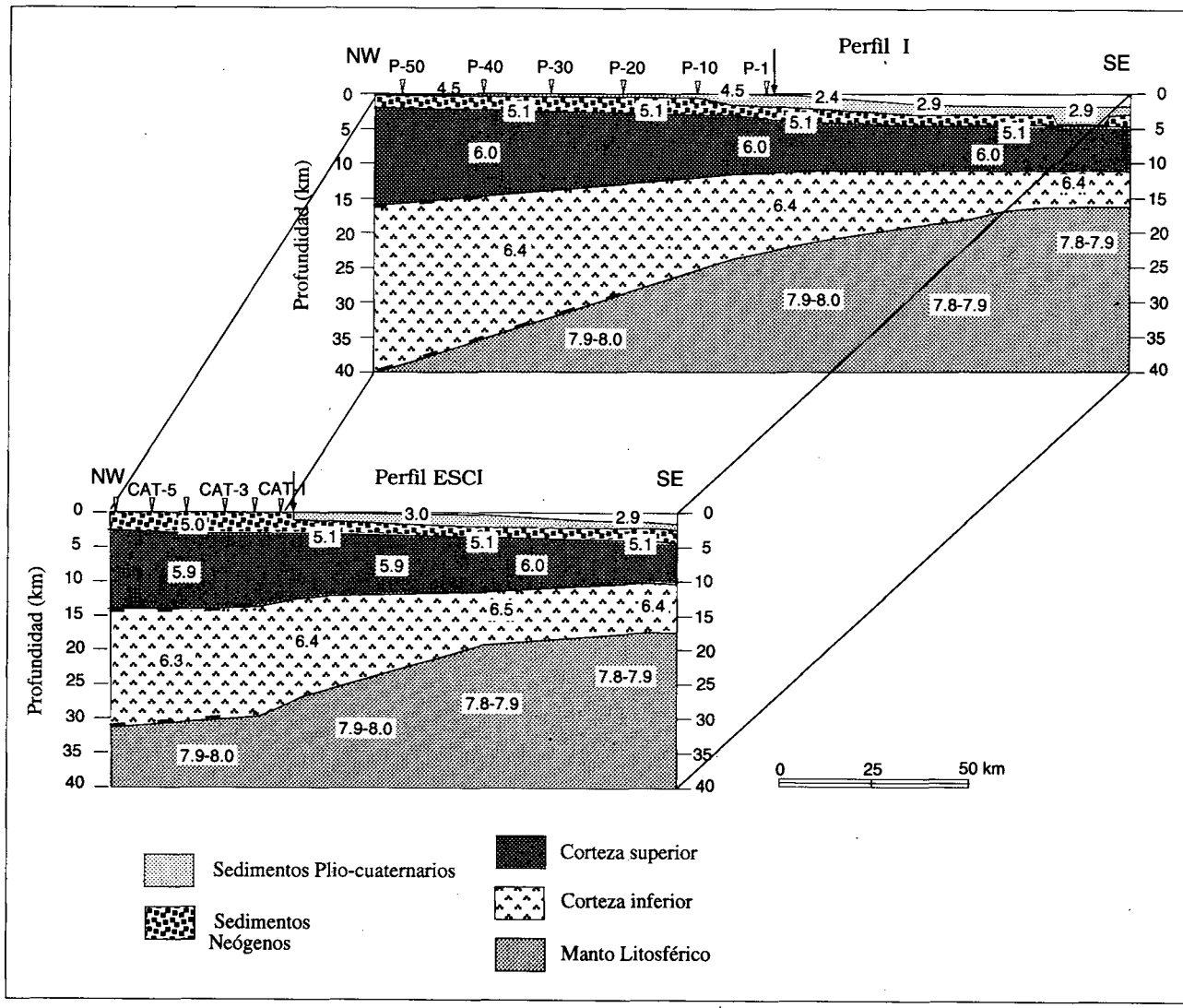


Fig. 8. Modelos de velocidad profundidad para los perfiles sísmicos I y ESCI. Las velocidades vienen dadas en km/s. Las flechas indican la situación de la costa. En las zonas en que no hay suficiente resolución, los horizontes se indican mediante trazo discontinuo.

Fig. 8. Velocity-depth models for seismic profiles I and ESCI. Values are in km/s. The arrows mark the shore line. In areas lacking of resolution, crustal horizons are plotted in dashed lines.

La sísmica de reflexión vertical, aunque proporciona imágenes de una gran resolución estructural, carece de un control adecuado de la distribución interna de velocidades. Este aspecto se ha analizado a partir de dos perfiles de gran ángulo y refracción, en dirección NW-SE, paralelos entre sí y separados unos 30 km. A lo largo de cada perfil se ha obtenido un modelo de estructura bi-dimensional (Fig. 8) que resulta del ajuste de un volumen de datos muy considerable. Se han utilizado en total 18 estaciones independientes que registraron en la península los perfiles marinos de 180 km de longitud, entre la costa Catalana y Mallorca, a partir de fuentes explosivas cada 1.5 km (perfil I), o bien tiros de aire comprimido cada 75 m (perfil ESCI). Las correlaciones que se han considerado para la obtención de los modelos de velocidad son consistentes entre las diferentes estaciones. No se han tenido en cuenta efectos locales observados en alguno de los ensamblajes y que no quedan refrendados en los restantes.

En los modelos resultantes, la parte más superficial incluye la secuencia Plio-cuaternaria y Neógena, con velocidades oscilando entre 2.4 y 5.1 km/s. Estas velocidades están mejor controladas en el perfil I, donde se dispuso de algunos OBS en la cuenca. El basamento está bien marcado a lo largo de los perfiles, y las velocidades entre 5.9 y 6.1 km/s que se le asocian sugieren una naturaleza Hercínica del mismo, tanto en tierra como en el Surco de Valencia.

La corteza inferior viene caracterizada por velocidades relativamente bajas, de 6.4-6.5 km/s, aunque hay que señalar que estos valores no provienen de observaciones directas de fases refractadas, sino del contraste de velocidades necesario para explicar las distancias críticas y las amplitudes de las distintas reflexiones.

Las velocidades subcorticales son del orden de 8.0 km/s en el NE de la Península, y solo muy ligeramente inferiores (7.9-7.8 km/s) hacia el centro de la cuenca. Los datos analizados no muestran ninguna evidencia de velocidades Pn inferiores a 7.8 km/s en el Surco de Valencia.

El resultado más destacable en ambos perfiles es el fuerte adelgazamiento que experimenta la corteza hacia el eje del Surco de Valencia. En unos 60 km de distancia horizontal el espesor cortical llega a disminuir en unos 10 km, de forma continuada ya que el Moho está bien definido a lo largo de todo el perfil. El adelgazamiento afecta sobre todo a la corteza inferior (Fig. 8).

Además de esta variación de primer orden en la dirección NW-SE, transversal a la estructuración principal, se observan diferencias entre ambos perfiles que indican variaciones laterales en la dirección ortogonal NE-SW. En el perfil ESCI, el Moho bajo la cuenca del Ebro, a 50 km de la costa, se sitúa a unos 32 km de profundidad, y se adelgaza débilmente hasta cerca de la línea de costa (27-28 km). A partir de la plataforma continental, remonta rápidamente hasta 17-18 km en el centro de la cuenca. En el perfil I un fuerte adelgazamiento cortical se observa con continuidad desde la cuenca del Ebro. El Moho se sitúa a 24 km de profundidad en la costa, y a unos 16 km en el eje del surco de Valencia. Estas variaciones entre ambas líneas son coherentes con los datos gravimétricos, ya que a lo largo del perfil I las anomalías de Bouguer tienen un gradiente muy superior al observado sobre el perfil ESCI. Los modelos de densidad que ajustan estas anomalías (Gallart *et al.,* 1994) son consistentes con los modelos sísmicos.

La persistencia de las variaciones laterales que experimenta el Moho a lo largo de la línea de costa se ha examinado utilizando algunos perfiles complementarios. Un primer perfil en abanico desde la costa hacia el interior, realizado durante el mismo experimento del perfil I, permite estudiar las reflexiones en la base de la corteza a unos 40 km al NE del perfil I. Suponiendo una distribución promedio de velocidades similar, el Moho bajo la línea de costa se localiza a 24 km de profundidad, valor que coincide con el determinado para el perfil I. No obstante, una interpretación análoga de un perfil de VALSIS (Watts *et al.,* 1990) registrado en tierra (Gallart *et al.,* 1990) indica que a la altura de la costa de Barcelona, unos 65 km al NE del perfil I, el Moho se situa a 22 km de profundidad, señalando un nuevo adelgazamiento hacia el NE.

En definitiva, los resultados obtenidos para diferentes perfiles que muestrean la transición cortical tierra-mar en unos 100 km de costa catalana, desde Cambrils hasta Barcelona, ponen de manifiesto la existencia de variaciones laterales en el espesor de corteza. En distancias horizontales de 20-30 km se observan cambios de espesor cortical que pueden oscilar entre 2 y 4 km, con una tendencia general de adelgazamiento hacia el NE a lo largo de la línea de costa. Esta estructura actual de la corteza puede estar en relación con la estructuración en horst y grabens del margen Catalán del Surco de Valencia resultante de la tectónica extensional Neógena.

La interpretación del perfil marino ESCI de 400 km de longitud, el procesado del cual está ya en su fase final, permitirá completar la transecta cortical hasta la cuenca sud-balear, de características oceánicas.

La imagen estructural que se podrá obtener a partir del proyecto ESCI, completada con los resultados de gran ángulo en la Península y Mallorca, y la información de detalle en los flancos del Surco de Valencia según los perfiles VALSIS, debe constituir una base de datos suficiente para abordar el análisis de las variaciones estructurales en los diferentes dominios, en términos de la evolución geodinámica reciente, del NE peninsular y Mediterráneo occidental.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos CICYT nos GEO89-0858-E; GEO90-0733 y PB86-0619. N. Vidal agradece la financiación del Plan Nacional de Formación de Personal Investigador.

BIBLIOGRAFÍA

BANDA, E., ANSORGE, J., BOLOIX, M. y CÓRDOBA, D.. 1980: Structure of the crust and upper mantle beneath the Balearic Islands (Western Mediterranean). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 49: 219-230.

BANDA, E. y SANTANACH, P.. 1992: Geology and Geophysics of the Valencia Trough, Western Mediterranean. *Tectonophysics*, 203, 361 pp.

BARTRINA, M.T., CABRERA,LL., JURADO, M.J., GUIMERÀ, J. y ROCA, E.. 1992: Evolution of the central Catalan margin of the Valencia trough. *Tectonophysics*, 203: 219-247.

DAIGNIERES, M., DE CABISSOLE, B., GALLART, J., HIRN, A., SURIÑACH, E. y TORNÉ, M.. 1989, : Geophysical constraints on the deep structure along the ECORS Pyrenees line. *Tectonics*, 8: 1051-1058.

DAÑOBEITIA, J.J., ARGUEDAS, M., GALLART, J., BANDA, E. y MARKIS, J.. 1992: Deep crustal configuration of the Valencia trough and its Iberian and Balearic borders from extensive refraction and wide-angle reflection profiling. *Tectonophysics*, 203: 37-55.

ECORS PYRENEES TEAM. 1988. The ECORS deep reflection seismic survey across the Pyrenees. *Nature*, 331: 508-511.

GALLART, J., DAIGNIERES, M., BANDA, E., SURIÑACH, E. y HIRN, A.. 1980: The eastern Pyrenean domain: lateral variations at crust-mantle level. *Ann. Geophys.*, 36 (2), 141-158.

GALLART, J., ROJAS, H., DÍAZ, J. y DAÑOBEITIA, J.J.. 1990: Features of deep crustal structure and the onshore/offshore transition at the Iberian flank of the Valencia trough. *J. Geodyn.*, 12: 233-252.

GALLART, J., VIDAL, N., DAÑOBEITIA, J.J. y THE ESCI-VALENCIA TROUGH WORKING GROUP. 1994: Lateral Variations in the deep crustal structure at the Iberian margin of the Valencia trough imaged from seismic reflection methods. *Tectonophysics* (en prensa).

GOBERT, B., HIRN, A. y STEINMETZ, L.. 1972: Shots of profile II, recorded on land, North of Pyrenees. *Bull. Centre Reach. Pau-SNPA* 6: 433-444.

HINZ, K., 1972. Results of seismic refraction investigations (Project Anna) in the Western Mediterranean, south and north of the island of Mallorca. *Bull. Cent. Rech. Pau-SNPA*, 6: 405-426.

MAUFFRET, A., MAILLARD, A., PASCAL, G., TORNÉ, M., BUHL, P. y PINET, B.. 1992: Long-listening multichannel seismic profiles in the Valencia trough (Valsis 2) and the Gulf of Lions (ECORS): a comparison. *Tectonophysics*, 203: 285-304.

PASCAL, G., TORNÉ, M., BUHL, P., WATTS, A.B. y MAUFFRET, A.. 1992: Crustal and velocity structure of the Valencia trough (western Mediterranean), Part II. Detailed interpretation of five Expanded Spread Profiles. *Tectonophysics*, 203:21-35.

SPENCE, G.D., WHITTWALL, K.P. y CLOWES, R.M.. 1984: Practical Synthetic Seismograms for laterally varying media calculated by asymptotic ray theory. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 74 (4): 1209.

SURIÑACH, E., MARTHELOT, J.M., GALLART, J., DAIGNIERES, M. y HIRN, A.. 1993: Seismic images and evolution of the Iberian crust in the Pyrenees. *Tectonophysics*, 221: 67-80.

TORNÉ, M., PASCAL, G., BUHL, P., WATTS, A.B. y MAUFFRET, A.. 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.

WATTS, A.B., TORNÉ, M., BUHL, P., MAUFFRET, A., PASCAL, G. y PINET, B.. 1990: Evidence for reflectors in the lower continental crust before rifting in the Valencia trough. *Nature*, 348: 631-634.

ZEYEN, H.J., BANDA,E., GALLART, J. y ANSORGE, J.. 1985: A wide angle seismic reconnaissance survey of the crust and upper mantle in the Celtiberian Chain of Eastern Spain. *Earth Planet. Sci. Letter.*, 75: 393-402.