

Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Institut de Ciències de la Terra *Jaume Almera*

Departament de Geofísica

Programa de Doctorado de *Tectònica y Geofísica*, bienio 96-98

**EVOLUCIÓN TECTÓNICA DEL MARGEN CONTINENTAL OESTE
DE MÉXICO: FOSA MESOAMERICANA Y GOLFO DE CALIFORNIA
(CORTES-P96)**

Tesis

Presentada por **Rafael Bartolomé de la Peña** ante el *Departament de Geodinàmica i Geofísica* de la *Universitat de Barcelona* para optar al grado de Doctor en Ciencias Físicas.

Director:

Dr. Juan José Dañobeitia

Tutor: **Dr. Josep Anton Muñoz**

Barcelona, Marzo de 2002

9. Transecta entre el Bloque de Jalisco y Península de Baja California

9.1 Introducción

Durante la campaña CORTES-P96 se realizó una transecta de 450 km (Fig. 9.1) desde Puerto Vallarta (Bloque de Jalisco) hasta Los Cabos (Península de Baja California) (Fig. 9.1). El objetivo fue el estudio de la transición cortical entre el Bloque de Jalisco y la Península de Baja California, a través de la zona acreción oceánica del EPR (22° N), es decir el contacto y evolución entre la placa Norteamericana con la de Rivera, por un lado, y la placa Norteamericana y la Pacífica, por el otro.

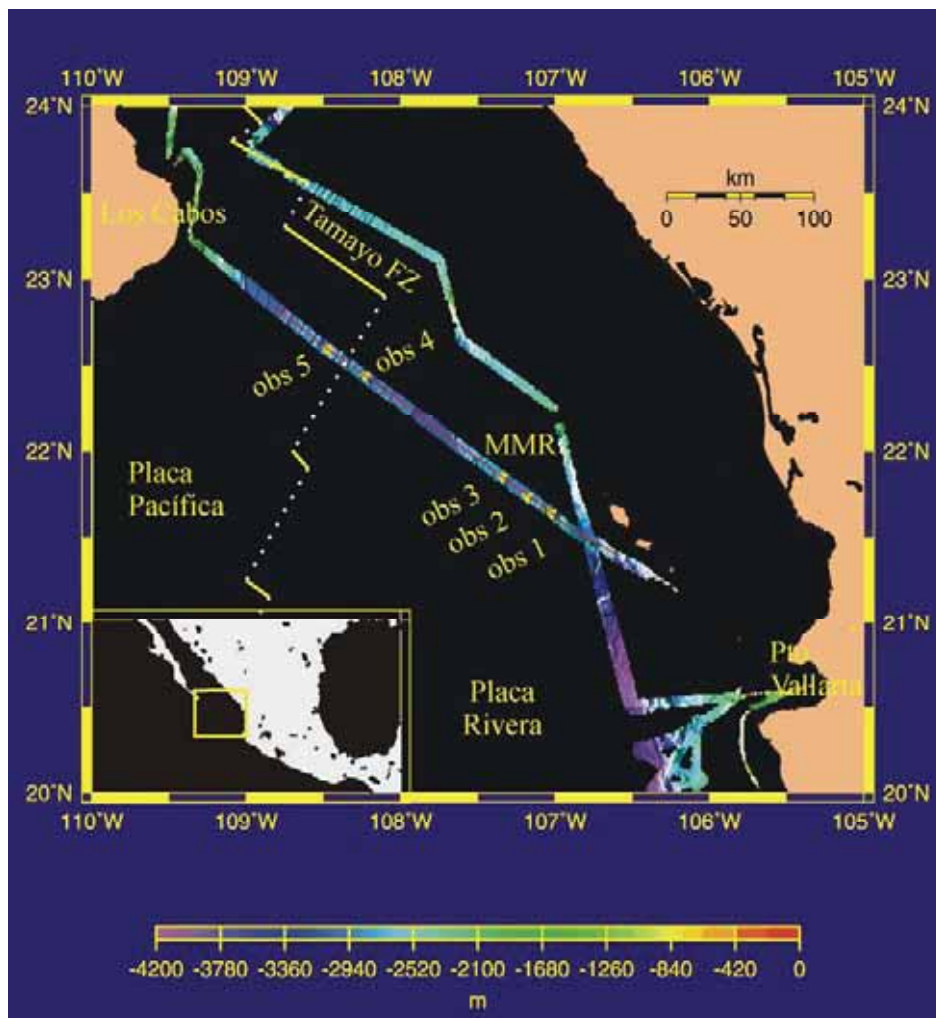


Figura 9.1: Transecta entre Puerto Vallarta y Los Cabos. La transecta incluye datos de sísmica de reflexión y refracción (5 OBS), gravimetría, magnetismo y batimetría de alta

resolución. Los segmentos en colores muestran la batimetría de la transecta y de los perfiles en la zona. Los rasgos estructurales más significativos son la dorsal del Pacífico Oriental (EPR) en línea discontinua, la zona de fractura Tamayo, en la boca del Golfo de California y la elevación de María Magdalena (MMR). Los triángulos amarillos denotan la localización de los OBS.

Para ello, se adquirieron datos de sismica multicanal, datos de sismica de refracción de gran ángulo marinos (5 OBS) y terrestres (estaciones en tierra) a ambos lados de la dorsal del Pacífico Este (EPR). Esta información se completó con datos de magnetismo y batimetría de alta resolución a lo largo del perfil o transecta (Fig. 9.2). En la Fig. 9.3 se ha realizado una compilación de los datos de batimetría, reflectividad, magnetismo y sismica de reflexión que muestrean la dorsal del Pacífico Este (EPR).

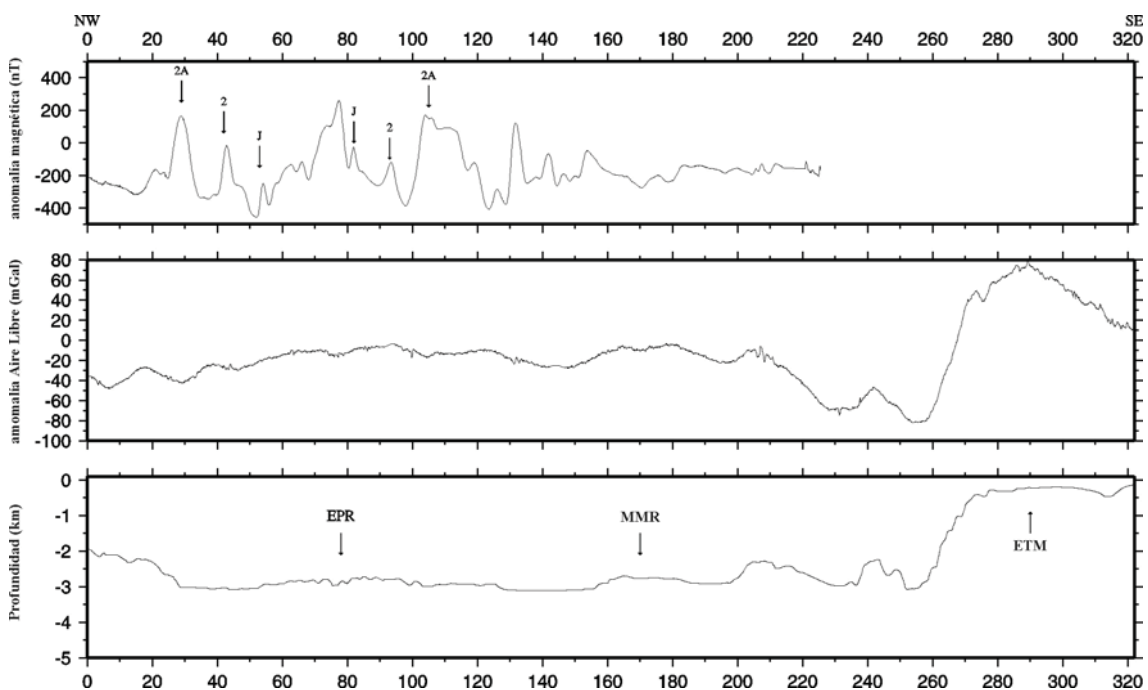


Figura 9.2: Registros magnéticos, gravimétricos y batimétricos en el escarpe de Islas Tres Marias (ETM) y las dorsales María Magdalena (MMR) y Pacífico Este (EPR), a lo largo de la transecta entre Puerto Vallarta y Los Cabos. En el panel superior se muestra las anomalías magnéticas de expansión oceánica identificadas J(1.5 Ma) , 2 (1.8 Ma) y 2 A (3.0 Ma), en el panel intermedio la anomalía de aire libre en mGal, y en el panel inferior la batimetría del fondo oceánico.

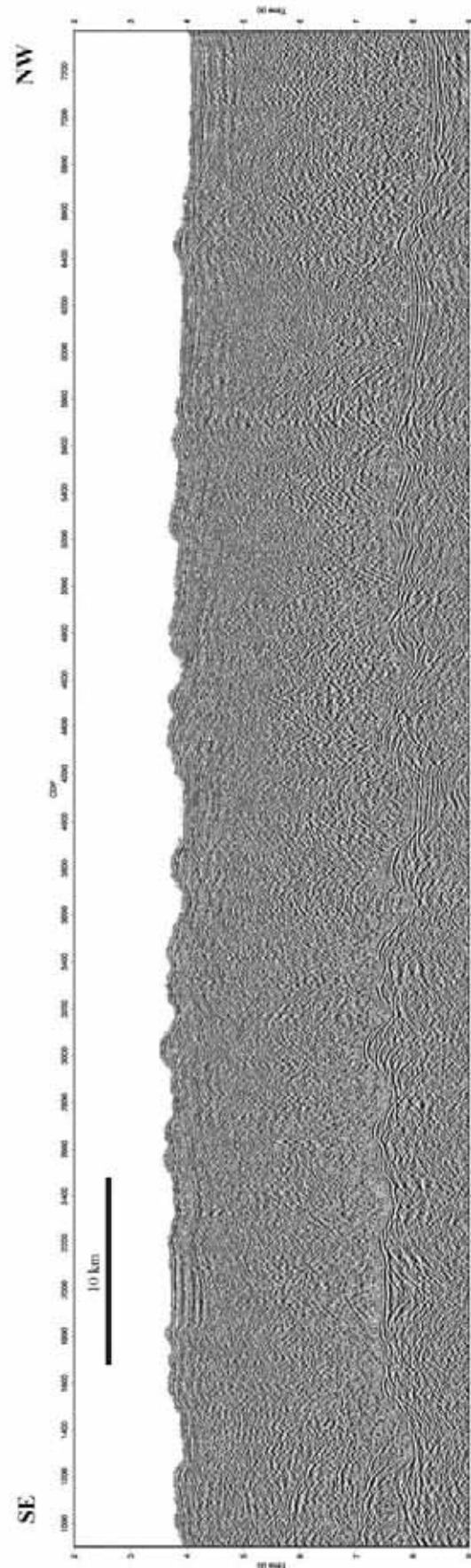
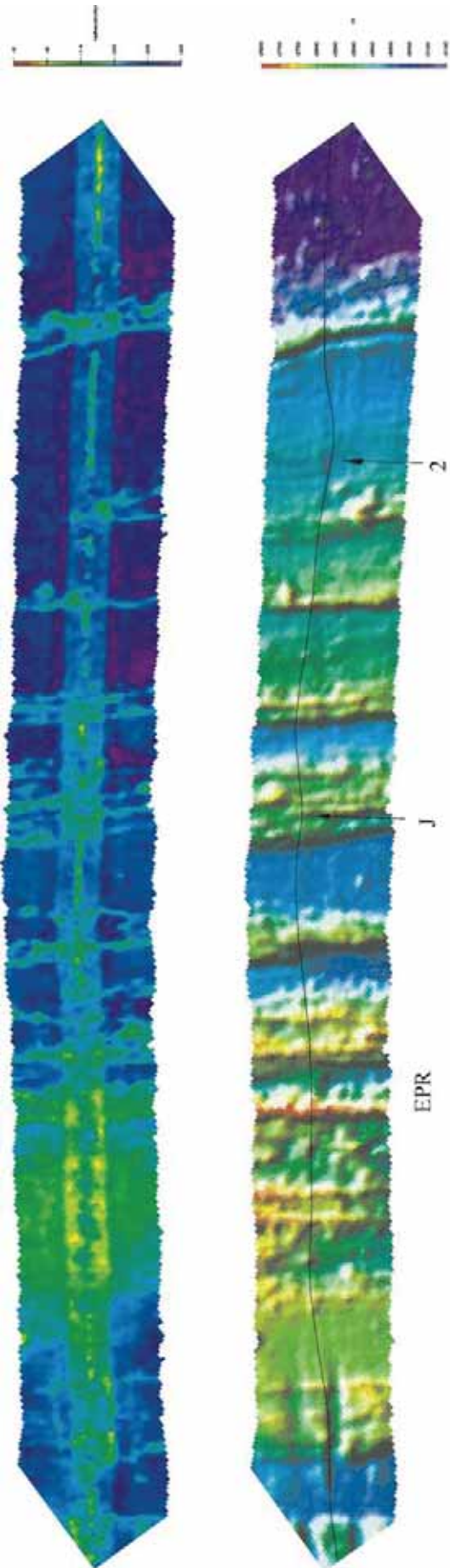


Figura 9.3: *Panel superior: Registro sonográfico mostrando la reflectividad del fondo oceánico (mayor sedimentación en azul). Panel medio: Batimetría de alta resolución indicando la localización del EPR y rasgos morfológicos de las crestas y valles de la zona axial, sobre las que se ha proyectado las anomalías de expansión oceánica J (1.5 Ma) y 2 (1.8 Ma). Panel inferior: Sección sumada (stacked) del perfil sísmico cruzando el EPR, nótese la relativa elevada reflectividad sobre los 0.8 s (TWTT) bajo la dorsal que posiblemente es el techo de la cámara magmática.*

Los datos de sísmica de reflexión, gravimetría y batimetría se han procesado siguiendo las pautas de los registros de la red sísmica de Puerto Vallarta (ver *capítulo 5*, y *capítulo*). Así, se han obtenido las anomalías magnéticas, gravimétricas, mallas de batimetría y perfiles de sísmica multicanal. Además, en este caso disponemos de información de sísmica de gran ángulo proporcionada por el despliegue de OBS y estaciones de tierra, a lo largo y en los extremos de la transecta. Por tanto, se ha podido modelizar en 2-D, la estructura cortical con distintos parámetros que restringen la multiplicidad de los modelos. En general, los distintos tipos de datos adquiridos nos permitirán finalmente la obtención de un modelo cortical en 2-D, de los márgenes conjugados del EPR: el margen oeste de la Península de Baja California (Los Cabos) y el margen este del continente mexicano en Puerto Vallarta (Fig. 9.1).

9.2 Anomalías Magnéticas

A lo largo del transecto y en los mismos perfiles donde se adquirieron datos de sísmica de reflexión y gran ángulo se obtuvieron simultáneamente datos de la variación del campo magnético, convenientemente procesados y una vez corregidos por el campo internacional de referencia (IGRF, 1985), se han obtenido las correspondientes anomalías magnéticas. La identificación de estas anomalías, como anomalías de expansión oceánica ha sido posible gracias a la correlación de las mismas, en función de la amplitud y frecuencia, con trabajos previos en la zona (De Mets y Stein, 1990). En la Fig. 9.4, se muestra un detalle de estas anomalías que corresponden a J (1.5 Ma), 2 (1.8 Ma) y la anomalía 2 A (3.0 Ma), proyectadas sobre la morfología de fondo oceánico. La identificación de estas anomalías nos permitió por tanto conocer la velocidad de

expansión de la dorsal del Pacífico Oriental (EPR), al menos en sus primeros estadios. En la Fig. 9.4, se observa las crestas y valles correspondientes a la zona axial de la dorsal Pacífica, así como su evolución temporal, controlada por las isocronas magnéticas. La topografía del fondo oceánico es bastante simétrica respecto de la dorsal, aunque en el sector mas oriental de la misma y entre la anomalía J (1.5 Ma) y la anomalía 2 (1.8 Ma) se observan algunos pequeñas diferencias estructurales. No obstante los datos magnéticos corroboran una clara simetría a nivel de acreción oceánica hasta los 3.0 Ma.

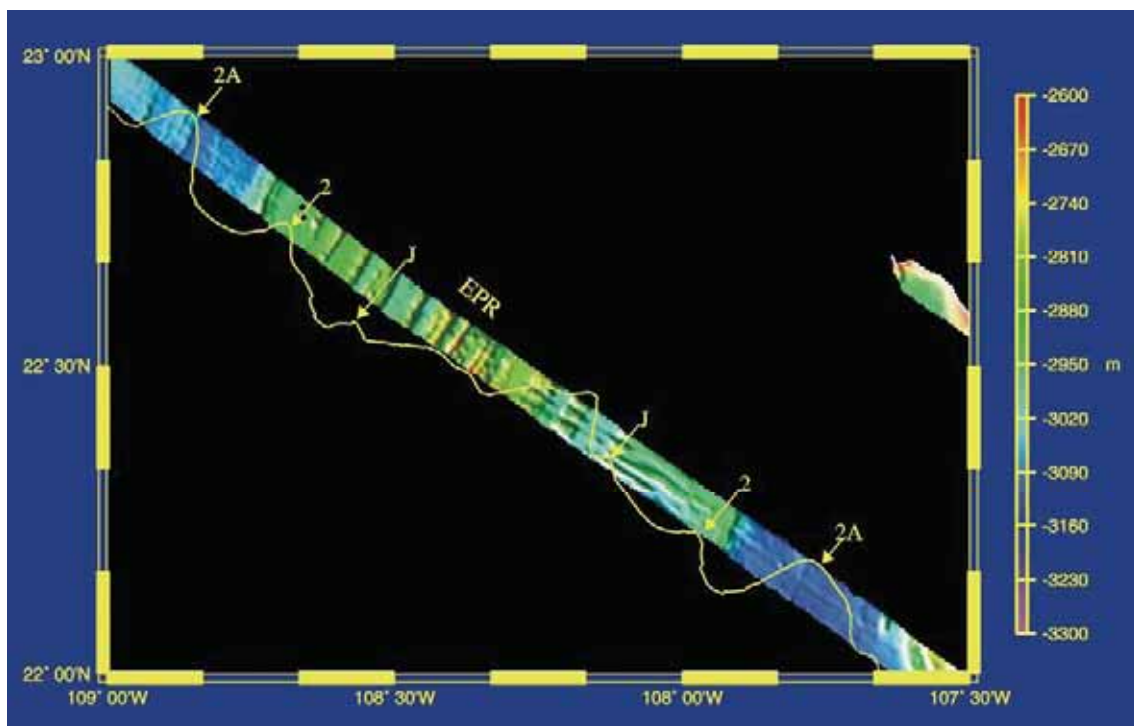


Figura 9.4: Anomalías magnética de expansión oceánica a ambos lados del EPR (placas Pacífica y Rivera), proyectadas sobre la morfología del fondo oceánico. Nótese la simetría de las anomalías magnéticas identificadas J, 2 y 2A respecto de la zona de acreción oceánica (dorsal EPR).

9.3 Sísmica

9.3.1 Sísmica de reflexión. Descripción del perfil

Los datos de sísmica de reflexión han sido tratados (ver *capítulo 2*) hasta el stack en todas las secciones. Además, se ha realizado una migración de la sección adquirida en la dorsal María Magdalena (MMR), al objeto de identificar con claridad la cobertera sedimentaria que posteriormente incorporaremos en los modelos corticales (2-D) de la sísmica de gran ángulo.

En las Figs. 9.5, 9.6 y 9.7 se muestran las imágenes crustales de toda la transecta. Los rasgos estructurales más importantes son, de Este a Oeste:

- El paquete sedimentario a lo largo de la plataforma continental en el dominio de la placa Norteamericana, de unos 100 m (Fig. 9.5). La plataforma se extiende hasta unos 40 km de la costa, el talud continental presenta una topografía muy rugosa y enorme gradiente pasando de los 0.5 s TWT (375 m de profundidad) hasta los 4 s TWT (3000 m). En la base del talud, se localiza la terminación septentrional de la fosa Mesoamericana (4.2s TWT, 3200 m), donde se alcanza la mayor profundidad en todo el perfil.
- Al oeste de la MAT, a unos 60 km se encuentra el alto batimétrico de la posible dorsal extinta de María Magdalena (MMR, Fig. 9.6), que se eleva unos 500 m sobre el fondo oceánico circundante, y cuyo origen oceánico o continental es controvertido. Entre la MAT y el MMR y sobre un basamento abrupto se localiza un paquete de sedimentos de espesor superior al localizado entre el MMR y la dorsal Pacífico Este (EPR).
- Bajo la zona axial del EPR (Fig. 9.5) se han identificado una serie de reflectores, que por su reflectividad y longitud de onda son susceptibles de ser considerados parte de la cámara magmática, aunque su geometría no ha sido posible determinarla con total precisión.
- 85 km al Oeste del EPR empieza el talud continental perteneciente a la península de Baja California, el margen conjugado del Margen Oeste.

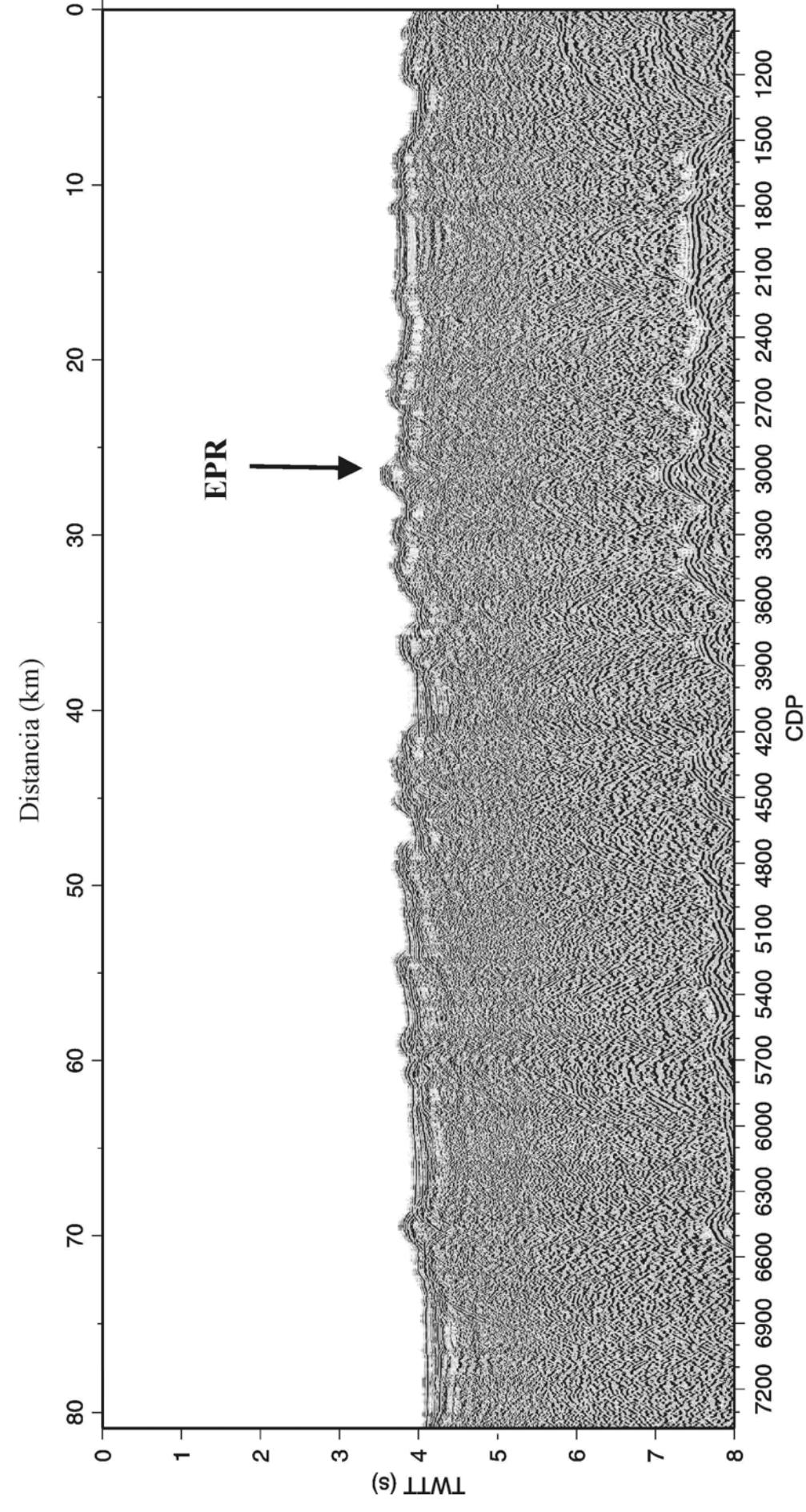
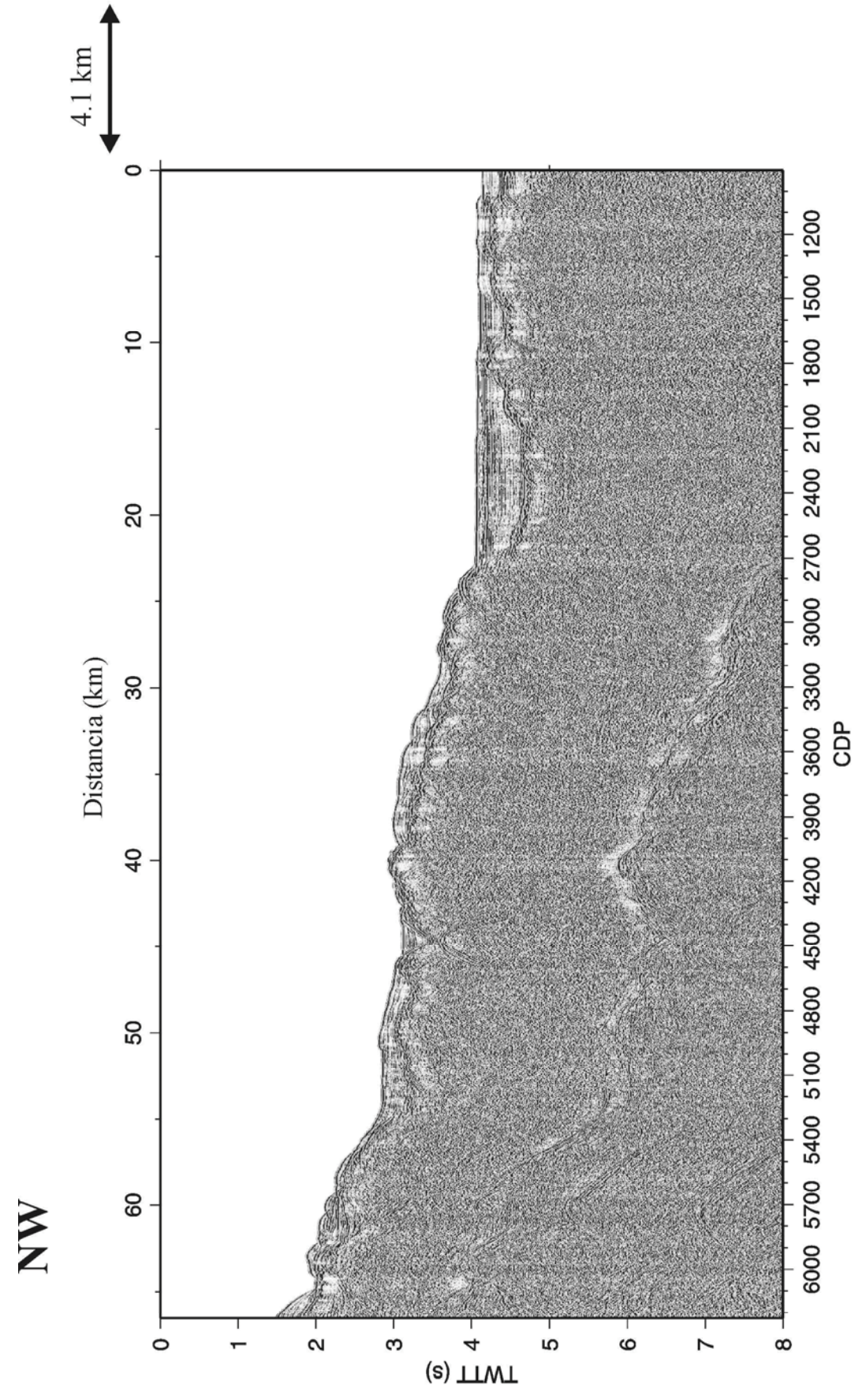


Fig. 9.4: panel superior: sección stackada en el extremo sur de Baja California (Los Cabos)
 panel inferior: sección stackada donde el perfil cruza la Dorsal del Pacífico Este (EPR)

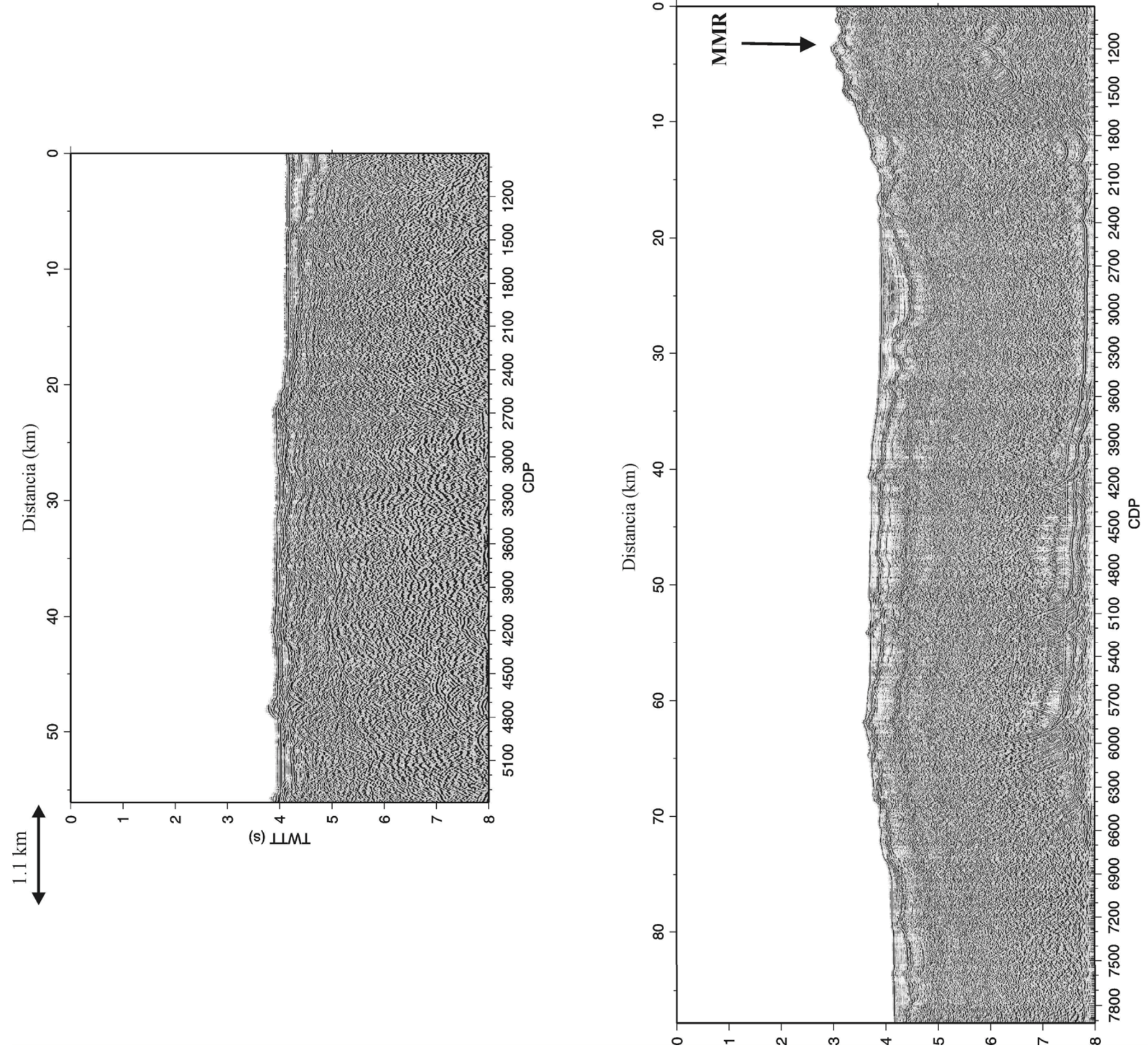


Fig. 9.5: panel superior: sección stackada del perfil entre el *EPR* y el *MMR*
 panel inferior: migración *Stolt* (velocidad del agua 1500 m/s) entre el *OBS 1* y el oeste del *MMR*.

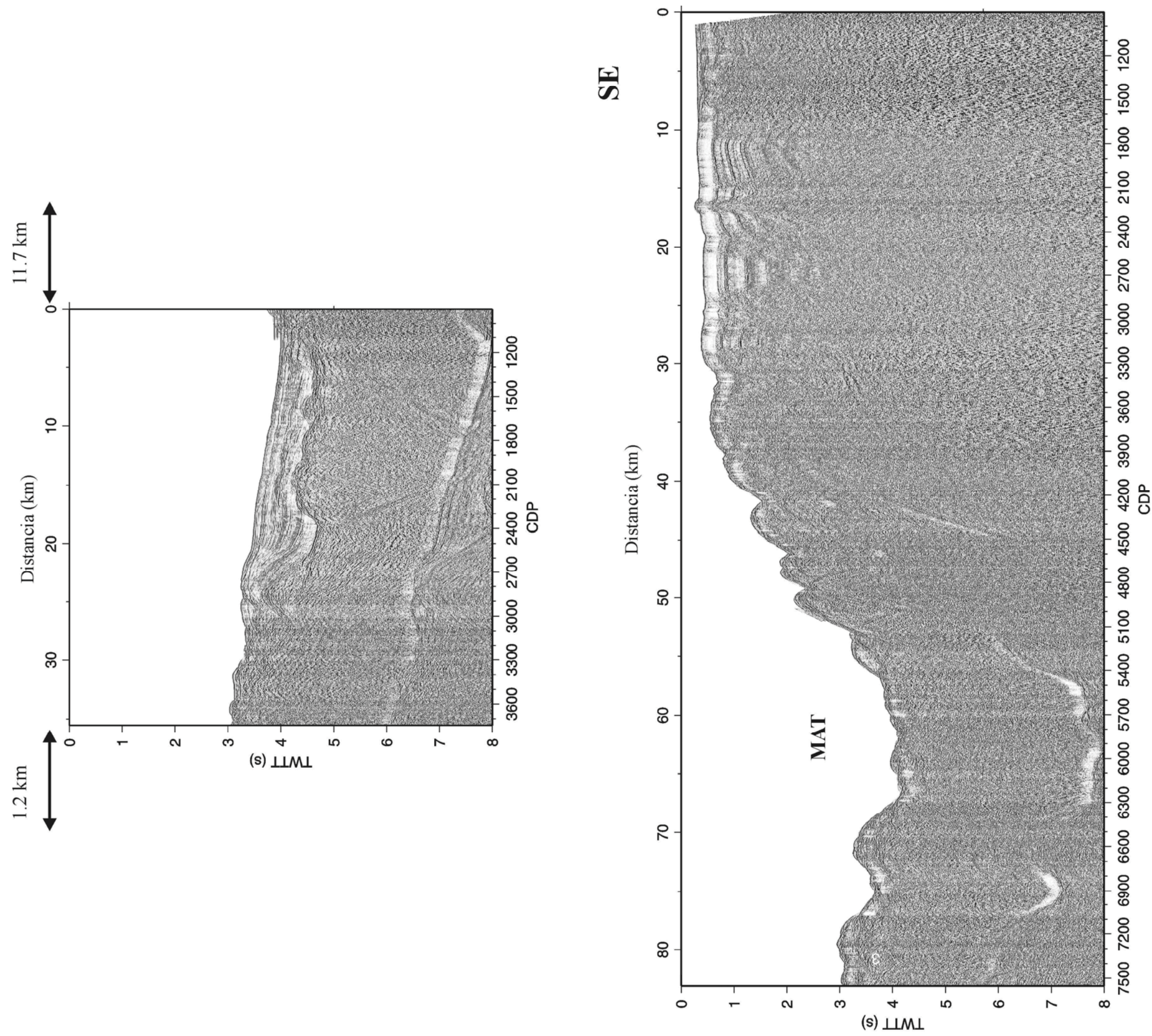


Fig. 9.6: panel superior: sección stackada al Este del MMR
 panel inferior: sección stackada en la transición del dominio oceánico al dominio continental.

9.3.2 *Sísmica de refracción. Descripción del perfil.*

La principal información para modelizar la estructura cortical y sus variaciones laterales a lo largo de la transecta Puerto Vallarta-Los Cabos, proviene de los datos de la sísmica de refracción. Para ello, durante la campaña de geofísica se desplegaron un total de 5 OBS en la transecta (Fig. 9.1), 3 de ellos en el sector oriental, localizados al oeste de las Islas Tres Marías, los otros 2 OBS se desplegaron a ambos lados de la dorsal al objeto de determinar las posibles variaciones corticales en el sector próximo a la zona de acreción. Además, en los extremos de la transecta una serie de estaciones de tierra nos han permitido muestrear la zonas próximas a ambos márgenes.

La fuente de energía utilizada ha sido como en el caso de la sísmica de reflexión una ristra de cañones de aire comprimido, con un intervalo de disparo de 30 s, lo que nos ha permitido adquirir simultáneamente datos de reflexión y refracción, que como hemos mencionado fueron registrados en OBS y estaciones sísmicas portátiles de tierra.

La transecta en cuestión transcurre a lo largo de 450 km, desde la costa oeste mexicana en el batolito de Puerto Vallarta hasta el margen este de la Península de Baja California (Fig. 9.1). La modelización de la transecta a nivel de la estructura de velocidades sísmicas con la profundidad se ha realizado utilizando los algoritmos de Zelt & Smith (1992), para el cálculo de trayectorias de rayos y tiempos de llegada de las ondas sísmicas en medios homogéneos e isótropos en 2-D. Para cada uno de los OBS, se ha realizado inicialmente una interpretación individual, ajustando las fases y los tiempos de llegada, para posteriormente incluirlos todos en un modelo único que ajustase todas las fases conjuntamente, la mayor dificultad encontrada ha sido en los OBS 1, 2 y 3 ya que muestrean zonas próximas.

Los ensamblajes correspondientes a los 5 OBS, se muestran en la Fig. 9.8, en los que se incluyen las distintas fases sísmicas identificadas, las trayectorias de los rayos, así como los ajustes de las fases identificadas. Todos los ensamblajes se presentan con una velocidad de reducción de 6 km/s, amplitud normalizada en cada traza, sin corrección batimétrica, y con un filtro paso banda de 3 y 15 Hz. Para facilitar la visualización de los ensamblajes, se ha asignado a cada fase sísmica un color (Tabla IX-I). Por la misma razón se ha mantenido el color en las fases sísmicas identificadas en los 5 OBS.

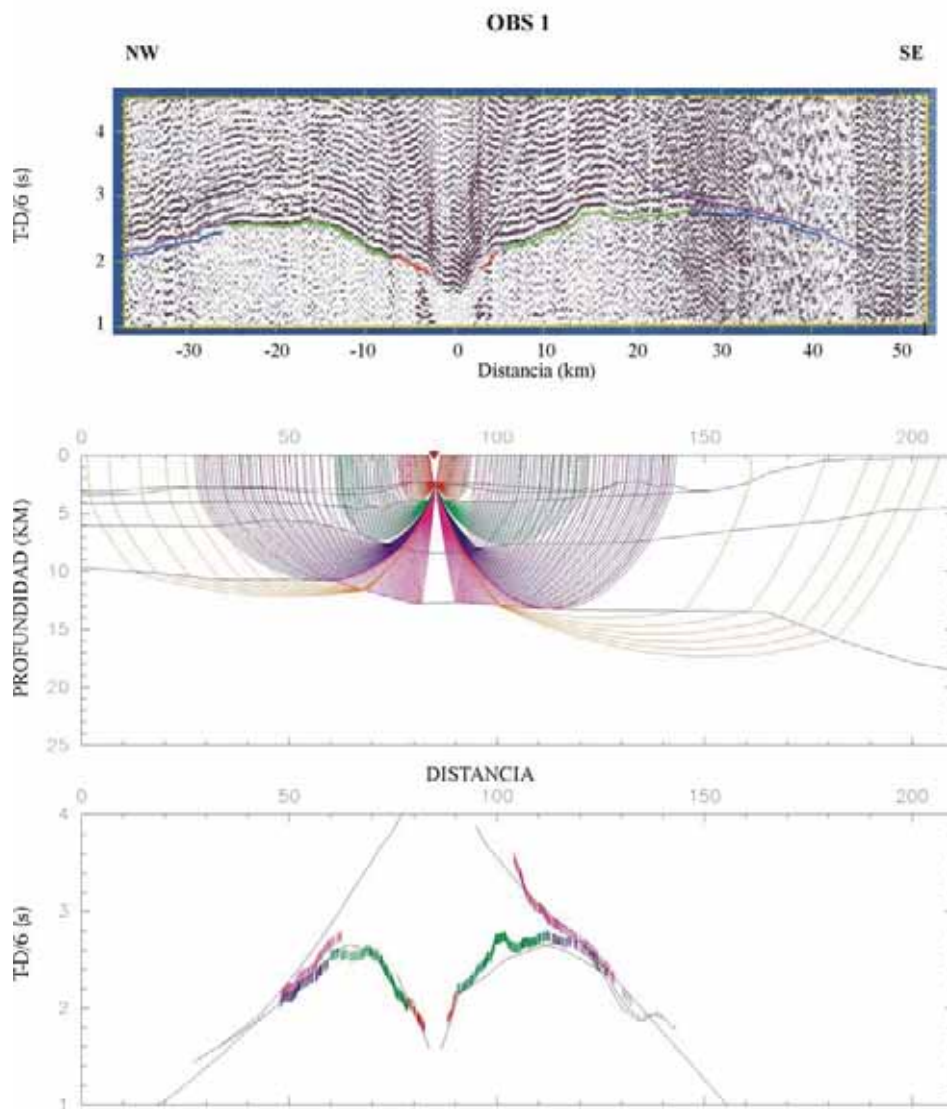
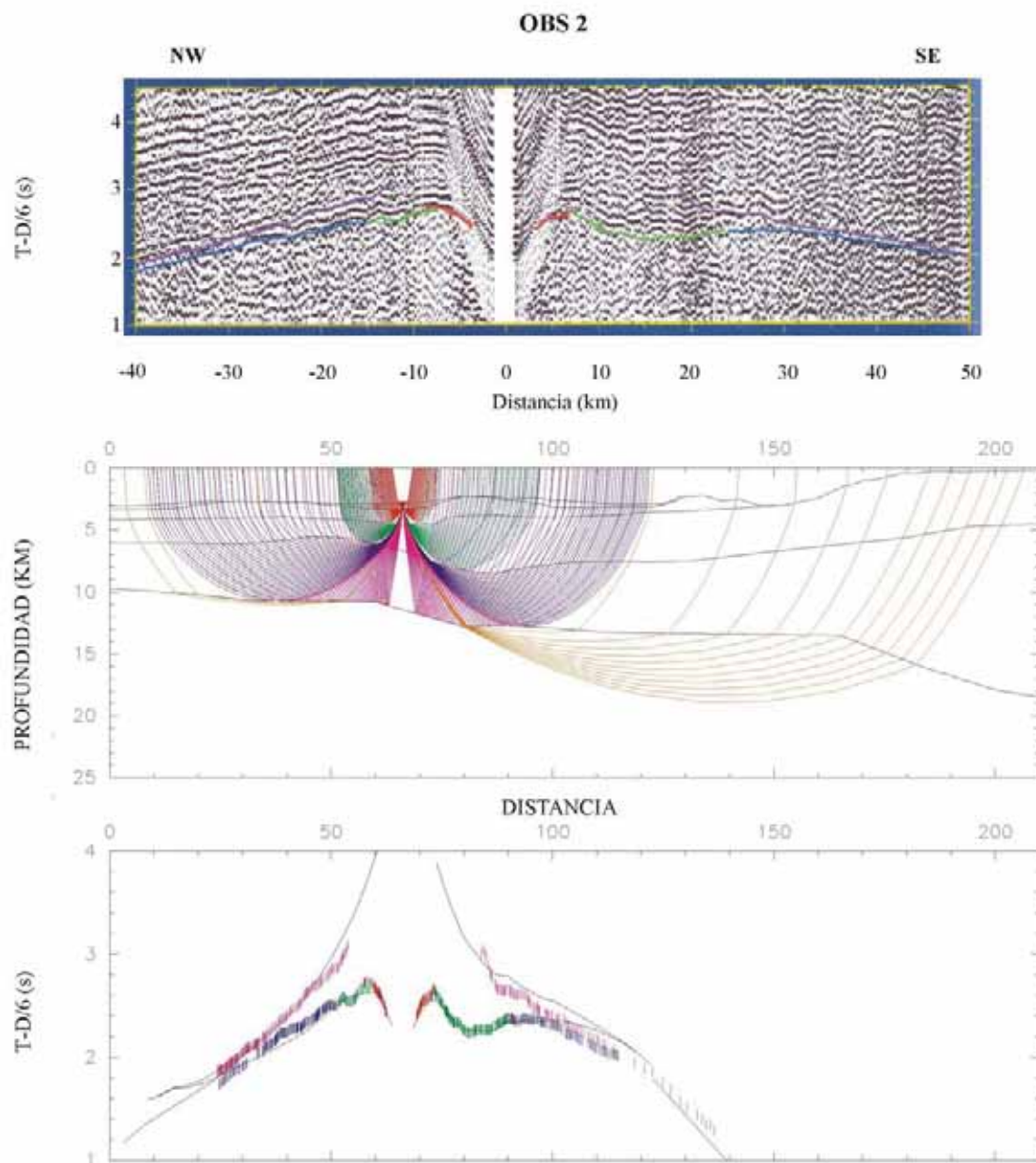


Fig. 9.8 ...

*Fig. 9.8 ...*

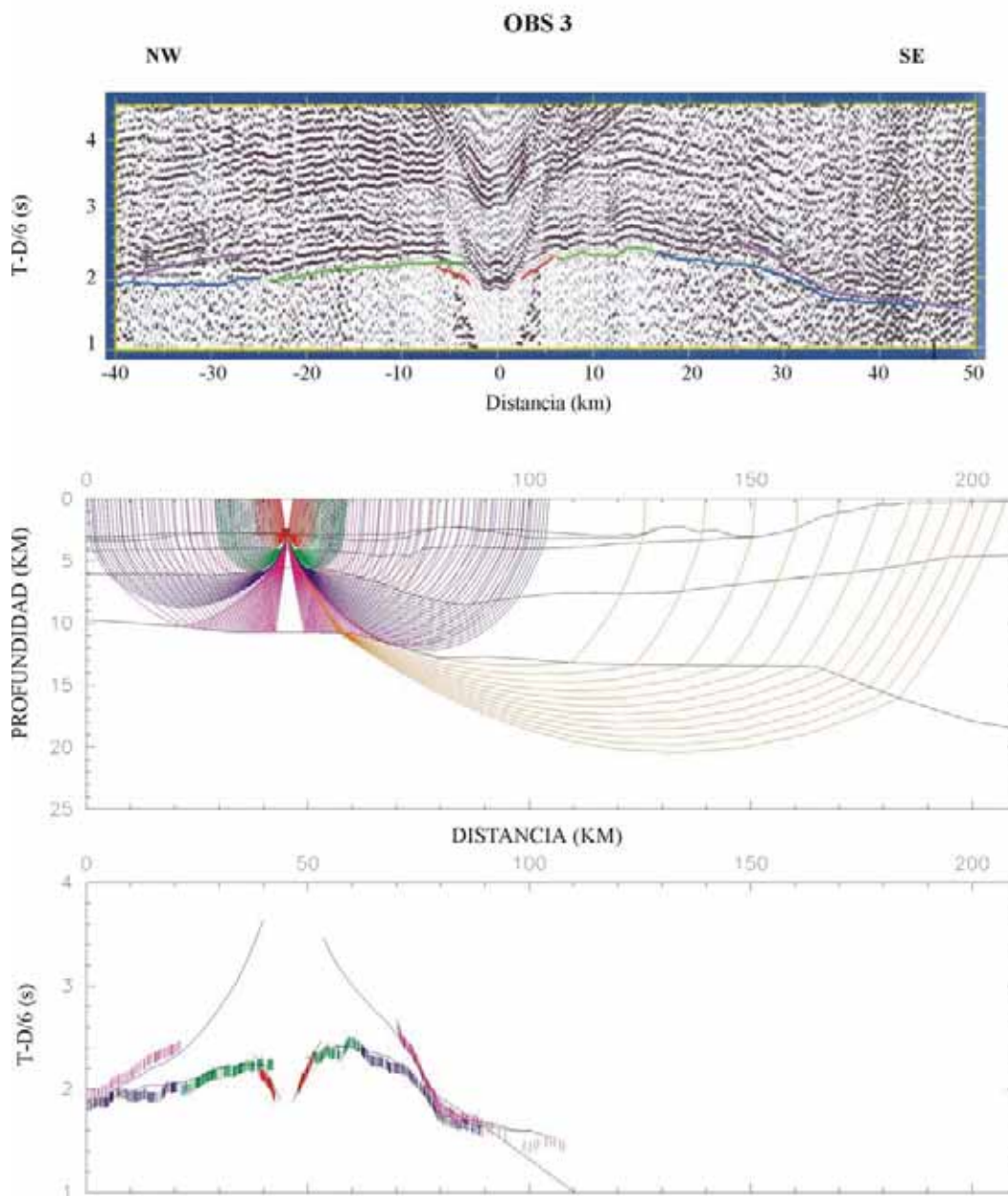
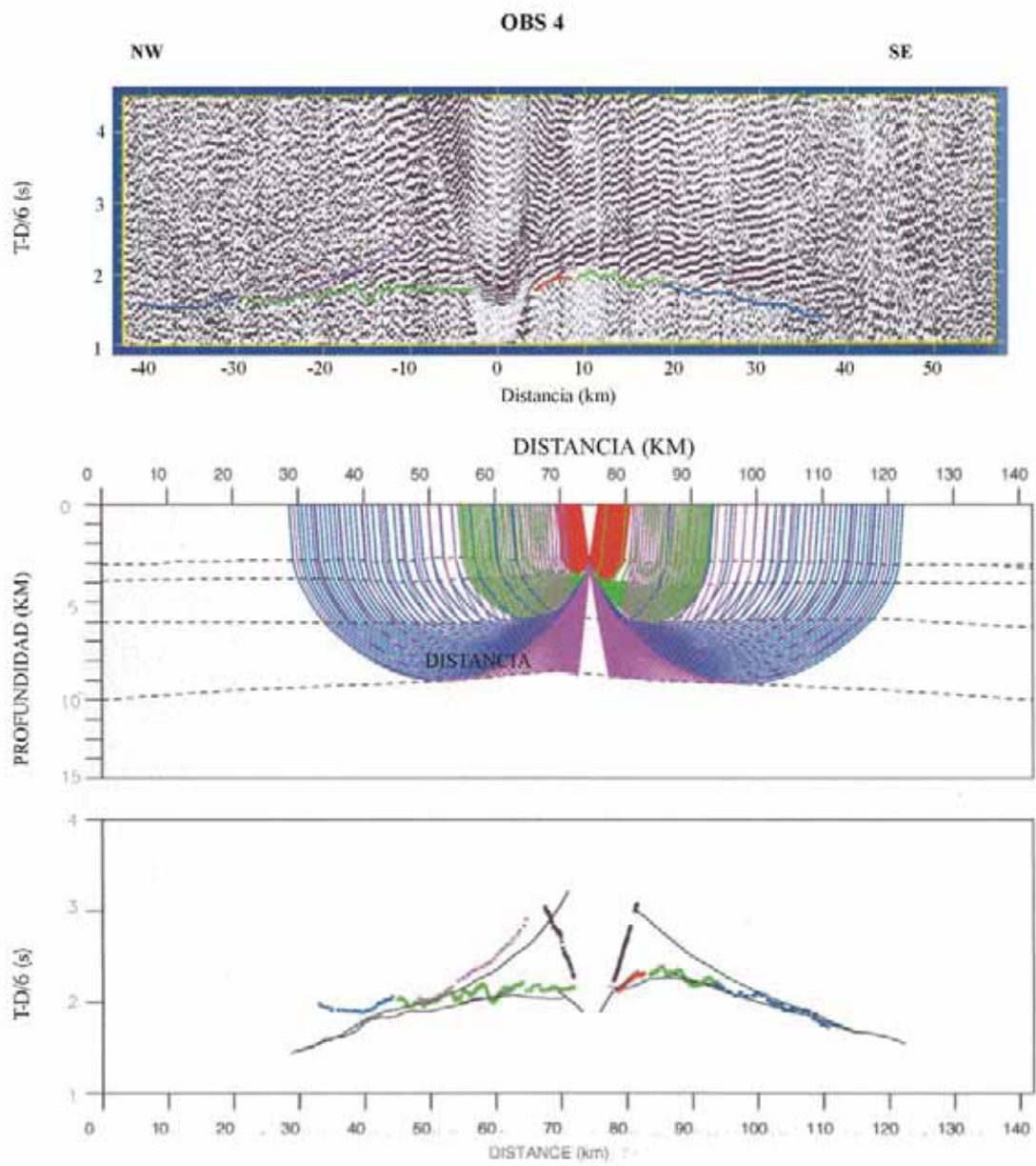


Fig. 9.8 ...

*Fig. 9.8 ...*

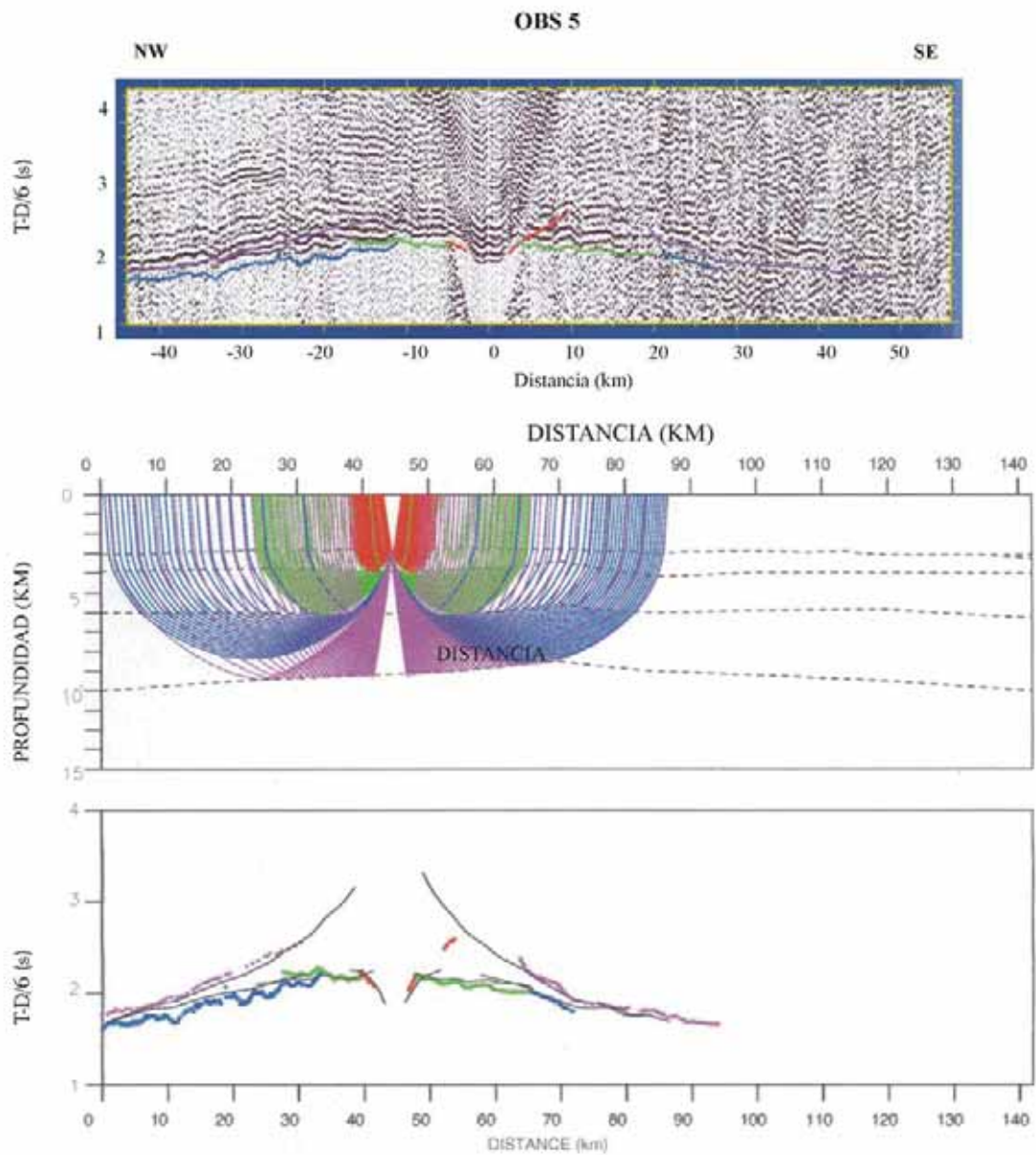


Figura 9.8: *Panel superior:* Ensamblajes correspondientes a los registros marinos de los OBS 1, 2, 3, 4 y 5 de la transecta Puerto Vallarta-Los Cabos. La localización se muestra en la Fig. 9.1. Velocidad de reducción de 6 km/s y filtro pasobanda de 3-15 Hz. Los colores denotan las diferentes fases sísmicas. *Panel intermedio:* Trayectoria de los rayos de las distintas fases identificadas en el modelo global. *Panel inferior:* Ajuste de fases sísmicas correspondientes a las fases sísmicas identificadas en el ensamble.






COLOR	INTERPRETACION
	Refracción en la capa sedimentaria
	Refracción en la corteza superior
	Refracción en la corteza inferior
	Reflexión en la Moho, $P_M P$
	Refracción en el manto superior, P_n

Tabla IX-I: Interpretación de las fases identificadas en los registros sísmicos del perfil marino.

9.3.3 Modelo de corteza de la Islas Tres Marías, sector Oriental del EPR

En el sector mas oriental, donde se encuentran los OBS 1, 2 y 3, el ajuste de las fases muestra una primera fase en la capa sedimentaria-extrusiones volcánicas que se observa en entornos de menos de 10 km sobre los OBS, con algunas sutiles diferencias en cuanto a velocidades se refiere, así las pendientes de esta fase son ligeramente superiores en los registros de los OBS 1 y OBS 3 que en el OBS2. La explicación mas plausible es que el OBS2 muestrea el centro de una pequeña cuenca sedimentaria, localizada entre el escarpe oriental de las Tres Marías y el alto estructural de María Magdalena, con una velocidad promedio entorno a los 2.5 km/s, mientras que los OBS1 y OBS3, muestrean extrusivos volcánicos (capa oceánica 2 A) con escasa sedimentación y con una velocidad promedio superior a los 4 km/s, esto se puede corroborar en los perfiles de sísmica de reflexión. La fase 2 o refracción en corteza superior (capa oceánica 2B-2C) es dominante en extensión lateral hacia la zona oriental, lo que indicaría un cierto engrosamiento de esta capa hacia zonas mas viejas de la corteza (alejadas de la dorsal), y por tanto un menor gradiente que estimamos en unos 0.25 s^{-1} frente a 0.45 s^{-1} en el sector más occidental, muestreado por el OBS 3. La corteza inferior o capa oceánica 3, queda relativamente bien muestreada por la refracción en la corteza inferior que proporciona unas velocidades y tiempos de llegada muy similares en los tres ensamblajes y que ratifica una capa 3 oceánica muy homogénea, constituida por gabros, lo que proporciona un rango de velocidades entre 6.7 y 7.3 km/s. La reflexión ($P_M P$) en el Moho restringe la base de la corteza y por tanto el espesor

cortical., esta fase se observa como segunda llegada en un rango de distancias entre 20-30 km, a unos 15-20 km del OBS.

La modelización conjunta de estos 3 OBS (Fig. 9.9), nos permite realizar un modelo único promedio para la corteza en el sector oriental de la dorsal del Pacífico que se ha extendido con datos de reflexión hasta el margen oeste mexicano. En este modelo global se observa un claro engrosamiento cortical hacia el margen oeste de México, a expensas de la corteza inferior, no obstante se observa un significativo engrosamiento de la corteza superior (capas 2B y 2C), en el sector próximo a las Islas Tres Marías. El espesor de la corteza varía desde los 6-7 km al oeste del alto de Maria Magdalena (MMR), pasando por los 10 km en las proximidades de las islas Tres Marías, y hasta unos 12 km en el talud continental, aunque esta zona queda peor muestreada solo por las estaciones de tierra.

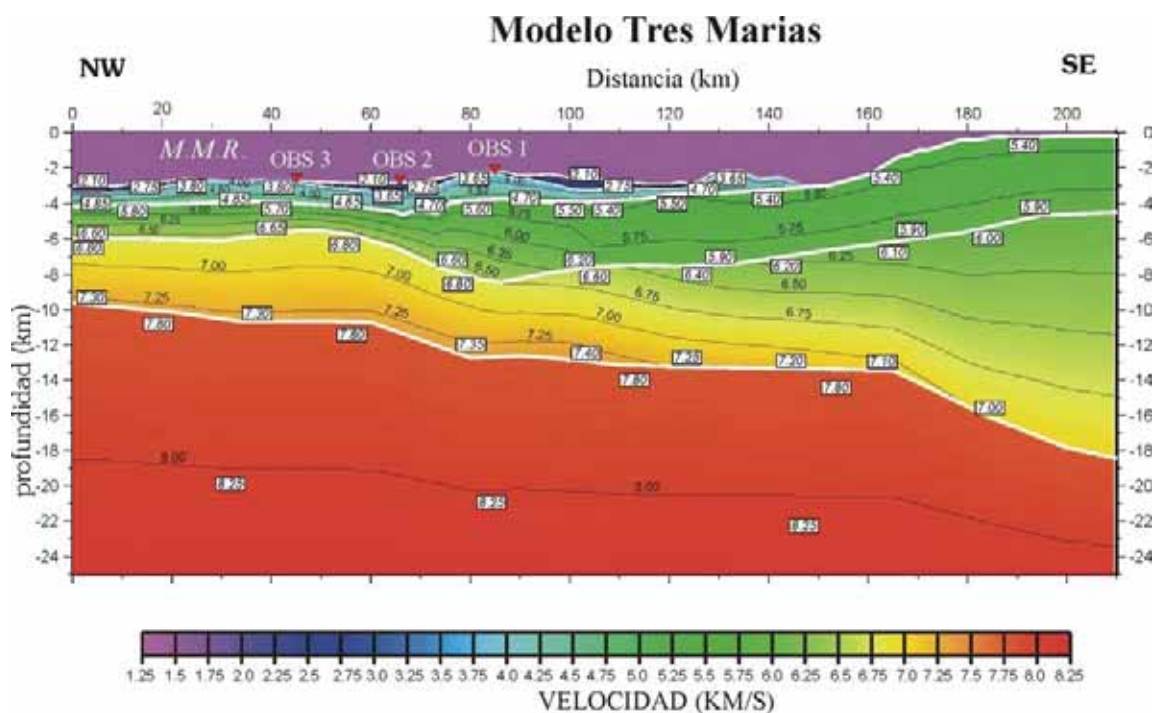


Figura 9.9: Modelo 2-D de velocidad-profundidad del sector oriental de la transecta Puerto Vallarta-Los Cabos, en el entorno de MMR. Líneas continuas en blanco muestran las distintas capas crustales, líneas continuas en negro son de isovelocidades. Los triángulos muestran la posición de los OBS. Modelo ajustado de los tiempos de llegada observados y calculados de los OBS 1, 2 y 3.

9.3.4 Modelo de corteza de la Dorsal del Pacífico Oriental (EPR) y Margen de la Península de Baja California.

El dominio del EPR está controlado por los OBS 4 y 5, además en el extremo occidental, en la Península de Baja California, se ha utilizado datos de dos estaciones sísmicas portátiles procesadas en la Universidad Complutense de Madrid. Al igual que en el caso del sector oriental el modelo se ha completado hacia el margen de la Península de Baja California con la información de la sísmica de reflexión. El fondo marino ha sido discretizado de la batimetría de alta resolución proporcionada por la sonda multihaz EM-12. Las fases mas superficiales a diferencia del Modelo de MMR, se observan en un rango muy estrecho de distancias, prácticamente en un entorno de unos 5 km, la ausencia de sedimentos, en la zonas muestreadas por los OBS, muy próximos a la zona axial del EPS, supone que el mejor ajuste de las velocidades sean elevado con un promedio de unos 4.35 km/s, lo cual es interpretada como rocas extrusivas volcánicas, típicas de la zonas de expansión oceánica. La fase 2 o refractada en la corteza superior (capa oceánica 2B, 2C), es menos dominante que en el caso del sector oriental, debido a su menor espesor cortical, aunque su velocidad promedio es algo mayor, como se observa en las ensamblajes. El gradiente de velocidades es bastante homogéneo en esta capa siendo del orden de 0.3 s^{-1} hasta llegar a las inmediaciones del margen de Baja California, lo que puede interpretarse como un secuencia de diques laminados, propios de corteza oceánica pacífica. La fase 3 o refracción en la corteza inferior se observa de manera desigual en los 2 ensamblajes, mas fruto de cierta tendencia monocromática en la señal que debido a efectos de la geometría, siendo su velocidad promedio entre 7.0 a 7.2 km/s. La reflexión (PmP) en la base de la corteza define una distancia crítica algo inferior a los 15 km, de donde se deduce un menor espesor cortical que en el caso del sector mas oriental, alcanzando un espesor promedio entorno a los 6-6.5 km.

La modelización de los OBS, con los datos de tierra se presenta en la Fig. 9.10, donde se observa una cierta homogeneización de la corteza desde el EPR hasta el talud continental, situado a unos 60 km de la costa de la Península de Baja California. La estructura de la corteza en la dorsal y hasta la anomalía J (1.5 Ma) está bien definida por los OBS 4 y 5, y muestra un grosor típico de corteza oceánica con una capa superficial o

extrusivos volcánicos de alrededor de 1 km de espesor, y un rango de velocidades entre 3.8 km/s y 4.9 km/s, una capa 2B de espesor 2 km y un rango de velocidades de 5.9 a 6.6 km/s, y una corteza inferior o capa 3 de un espesor 3-4 km con un rango de velocidades de 6.8 a 7.2 km/s. Se ha sumido una velocidad de 7.8 km/s para el manto superior. El resto de la sección, hasta la costa, está menos restringido a nivel de velocidades y espesores, no obstante de manera genérica se observa un paulatino engrosamiento de la corteza superior y sobretodo de la corteza inferior al aproximarnos a la plataforma continental.

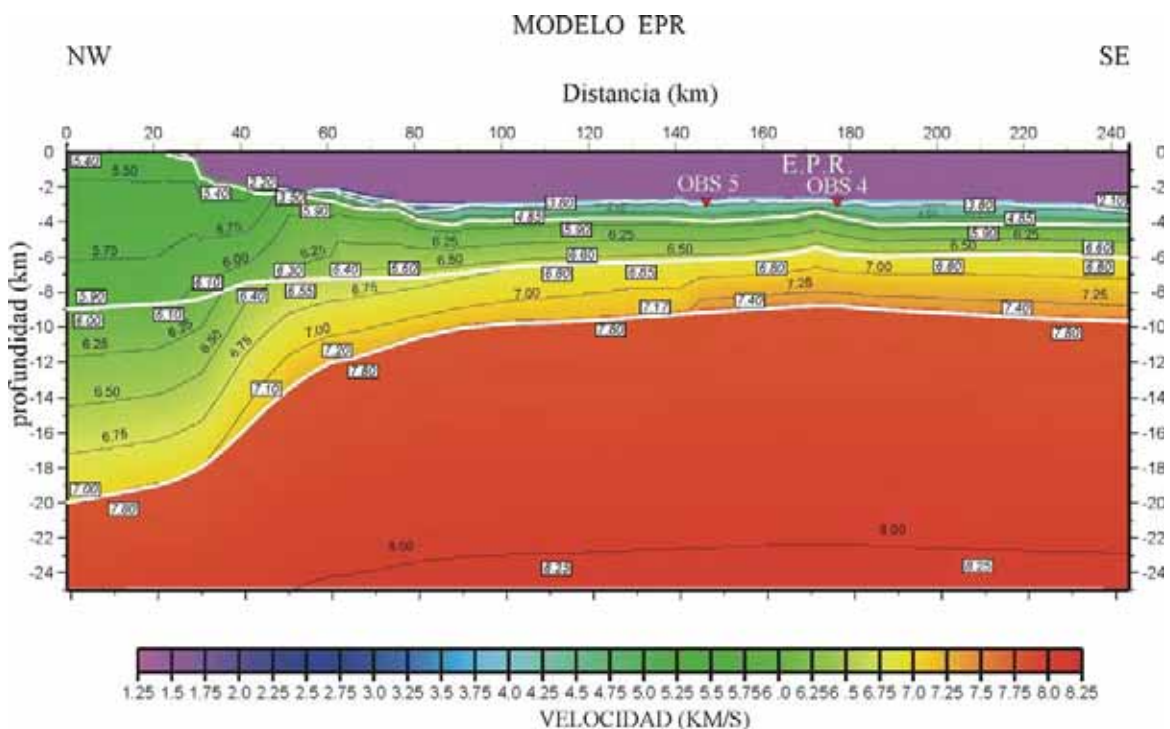


Figura 9.10: Modelo 2-D de velocidad-profundidad obtenido en el oeste del perfil Puerto Vallarta-Los Cabos, cuando cruza el EPR. Los triángulos muestran la posición de los OBS. Hemos obtenido el modelo ajustando los tiempos de llegada observados y calculados de los OBS 4 y 5 y dos estaciones en el extremo de Baja California.

9.3.5 Análisis y conclusiones del modelo de corteza Puerto Vallarta-Los Cabos

La estructura cortical de los 450 km de longitud de la transecta, está bien definida, a partir de los datos de refracción combinados con los de reflexión, al sudoeste de las islas Tres Marías, así como en las proximidades de la dorsal hasta la anomalía J (1.5 Ma), donde los datos proporcionan un razonable muestreo lateral de la corteza. Al objeto de restringir aún más estos modelos, hemos realizado un modelo gravimétrico simple, considerando los valores promedio de las velocidades, y el resultado es que el modelo gravimétrico ajusta correctamente las longitudes de onda larga del modelo de refracción (Figs. 9.11 y 9.12).

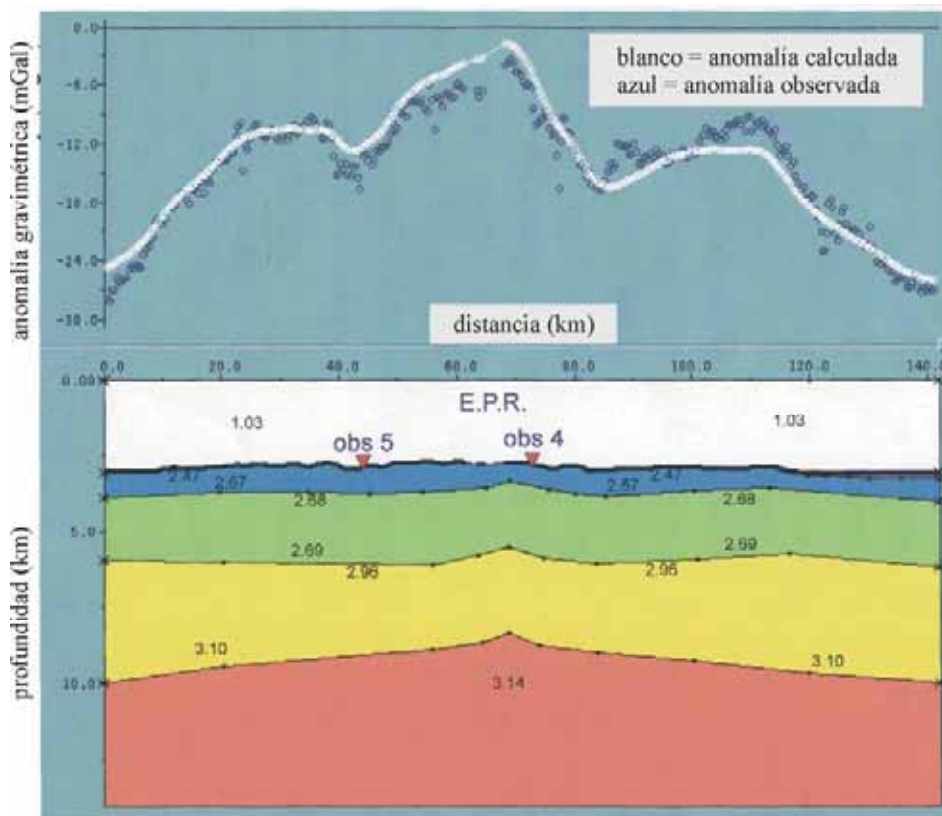


Figura 9.11: Modelo gravimétrico que cruza el EPR

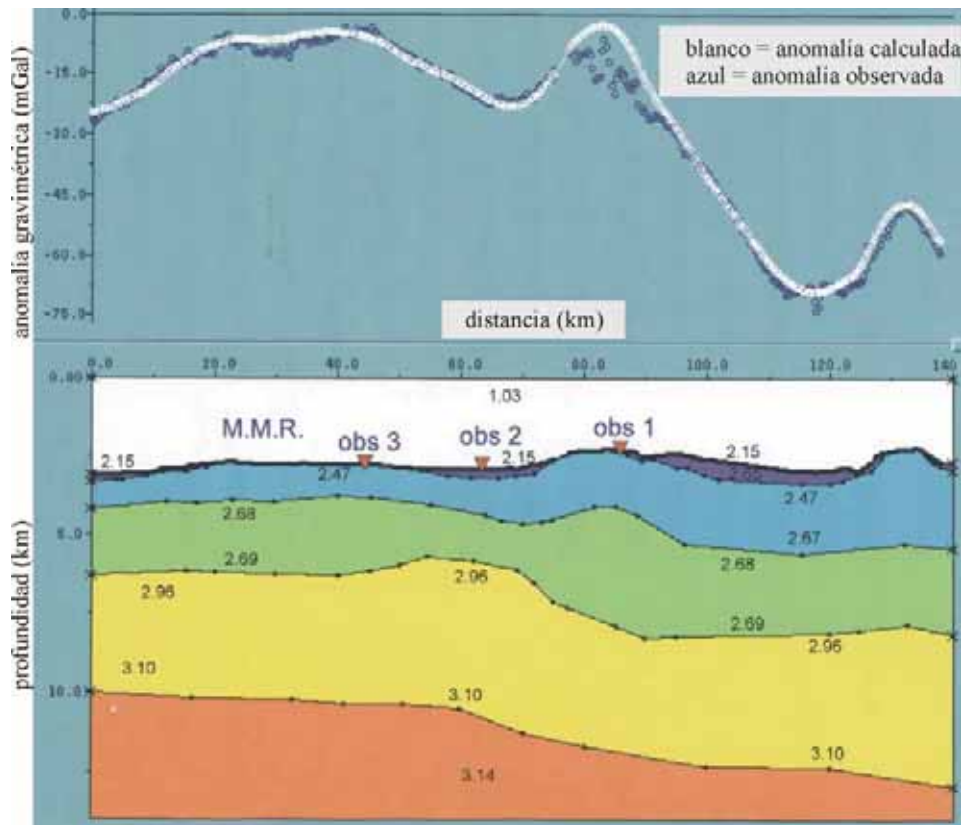


Figura 9.12: Modelo gravimétrico que cruza el MMR

Los extremos del perfil están controlados por estaciones de tierra y nos proporcionan los rasgos generales de la corteza. En las Figs. 9.9 y 9.10, se puede observar que la transición de corteza oceánica a corteza continental es paulatina y algo difusa. Un rasgo notable que merece la pena destacar es una cierta asimetría a ambos lados de la dorsal EPR, lo que no parece fácil de explicar en el contexto geodinámico de la región. Sin embargo, parece claro que la acreción oceánica es prácticamente simétrica hasta la anomalía 2 A (3.0 Ma), por lo tanto existiría un exceso de corteza en el sector oriental de la dorsal. Ahora bien, de los datos proporcionados por la estructura cortical, y considerando el límite occidental de la placa oceánica del Pacífico, coincidente con la base del talud continental, entorno al km 85 en la Fig. 9.10, el simétrico estaría aproximadamente unos 85-90 km al este de la dorsal, lo que nos situaría unos 15-20 km al oeste de la cresta del Maria Magdalena (MMR). Parece pues plausible que la dorsal extinta del MMR, se inició antes de los 3.0 Ma que impone la anomalía 2A, y que pudo haber generado anteriormente corteza oceánica, hasta que un salto en la dirección de acreción situó al MMR en el actual EPR. De hecho se consideramos que la cresta del

MMR, está situada en el km 35 de la Fig. 9.9, ésta dorsal extinta habría generado unos 20 km a ambos lados de la misma, esto situaría el extremo mas oriental de corteza generada en la antigua dorsal sobre el km 60 de la Fig. 9.9, que justo donde la corteza se engrosa de forma aparente, y donde posiblemente está la terminación norte de la subducción del Pacífico, lo que a su vez ha provocado la elevación de las Islas Tres Marías. Bajo estas hipótesis se explicaría parte de la asimetría crustal observada, debida al funcionamiento durante cierto tiempo de la dorsal MMR, y situaría el conjugado del margen de la Península de California hacia el sudoeste de la Islas Tres Marías, zona difusa pues la subducción de la placa de Pacífico habría removilizado la corteza en esa zona provocando el inicio mas reciente de elevación de las Islas. Esta hipótesis explicaría además, la existencia de altas amplitudes relativas en la anomalía magnética al oeste del MMR (ver Fig. 9.2), que podrían ser de expansión oceánica, mientras que la ausencia o amortiguación de éstas hacia el este, podría ser debido al efecto de la removilización corteza por la subducción, ya que al sudeste del MMR la corteza alcanza profundidades de 14 km en menos de 20 km de distancia.

