

EVIDENCIA SÍSMICA DE REFRACCIÓN DE UNA ZONA DE ESPARCIMIENTO EN LA BOCA DEL GOLFO DE CALIFORNIA

JOSÉ J. GONZÁLEZ G.* y
CARLOS F. FLORES L.**

RESUMEN

Se presenta la interpretación del estudio de refracción sísmica con sonoboyas, llevado a cabo en la boca del golfo de California en junio de 1975. El espesor cortical en el flanco oriente de la Dorsal del Pacífico Este al sur de la zona de fractura Tamayo, es de 4 a 5 Km y el manto mínimo tiene una velocidad de propagación de onda compresional de 7.3 a 7.5 Km/seg. En el talud continental al sur de la península de Baja California se observa un espesor de corteza de 8 Km con una velocidad para el manto de 8.1 Km/seg; para un punto intermedio se cuantificó un espesor de 7.3 y una velocidad de 8 Km/seg, lo que da una evidencia geofísica de una zona de esparcimiento representada por el adelgazamiento de la corteza bajo la Dorsal del Pacífico Este.

ABSTRACT

We shall present in this paper the interpretation of a seismic refraction survey made at the mouth of the Gulf of California during June 1975, in which sonobuoys were used. The thickness of the oceanic crust at the eastern flank of the East Pacific Rise just south of the Tamayo fracture zone average 4 to 5 Km and the minimum mantle is characterized by velocity of propagation of compressional waves from 7.3 to 7.5 Km/sec. South of the peninsula of Baja California over the continental slope the crust increase in thickness up to 8 Km with a mantle velocity of 8.1 Km/sec. For an intermediate point the crust was 7.3 Km thick with average velocity of 8 Km/sec which gives a geophysical evidence of a spreading zone represented by a thin crust underlying the East Pacific Rise.

* Departamento de Geofísica. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada. Ensenada, Baja California Norte, México.

** Departamento de Exploración, Instituto de Geofísica, UNAM.

INTRODUCCIÓN

El estado actual de los estudios que han tratado de explicar el origen, evolución y naturaleza de la provincia del Golfo de California, se encuentran influenciados por la Tectónica de Placas, teoría que marca un límite a partir de la cual esta provincia ha funcionado como un laboratorio y fuente de nuevas aportaciones o puntos de controversia de la teoría. Entre las formas y fenómenos tectónicos del golfo y áreas adyacentes se pueden mencionar: el proceso de oceanización del Golfo como un sistema de centros de dispersión y fallas transformadas (Moore, 1973, Moore y Buffington, 1968), la deriva de la propia península con respecto a la masa del continente mexicano a lo largo de fallas activas observables (Larson, Menard y Smith, 1968), la existencia, al sur, de la Dorsal del Pacífico Este (DPE), la presencia de una zona de subducción activa que corresponde a la Trincheras Mesoamericana (TMA), el posible acoplamiento o desaparición de la pequeña placa independiente conocida como Placa Rivera (PR), (Atwater, 1970; Reid, 1976), figura 1.

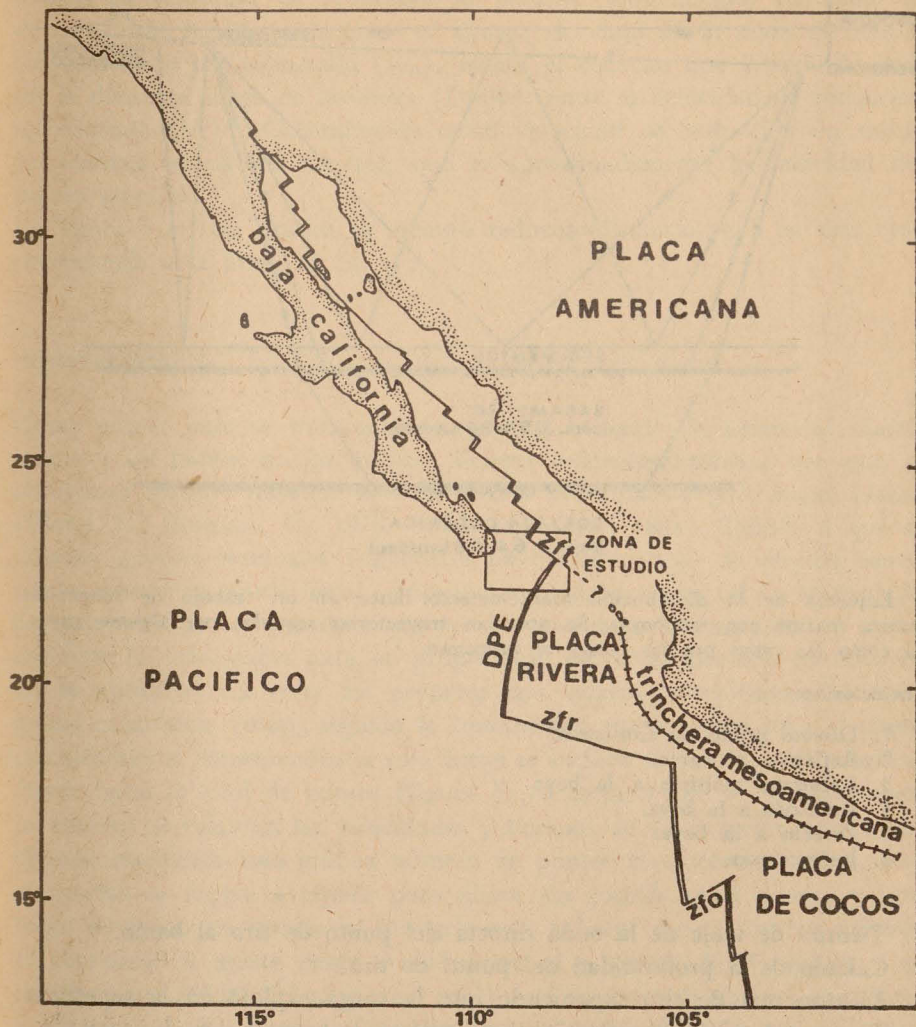
El presente estudio forma parte de un levantamiento geofísico de batimetría, reflexión y magnetometría (Flores, L.; González, G. (en preparación); Flores, L. y González, G., 1976; González, G.; Lewis y Flores, L., 1976) llevado a cabo en junio de 1975, dentro del proyecto IPOD (International Phase of Ocean Drilling). Fue realizado a bordo del B/O Thomas G. Thompson de la Universidad de Washington, en colaboración con la Institución Scripps de Oceanografía, la UNAM a través del Instituto de Geofísica y CICESE.

MÉTODO DE TRABAJO Y REDUCCIÓN DE DATOS

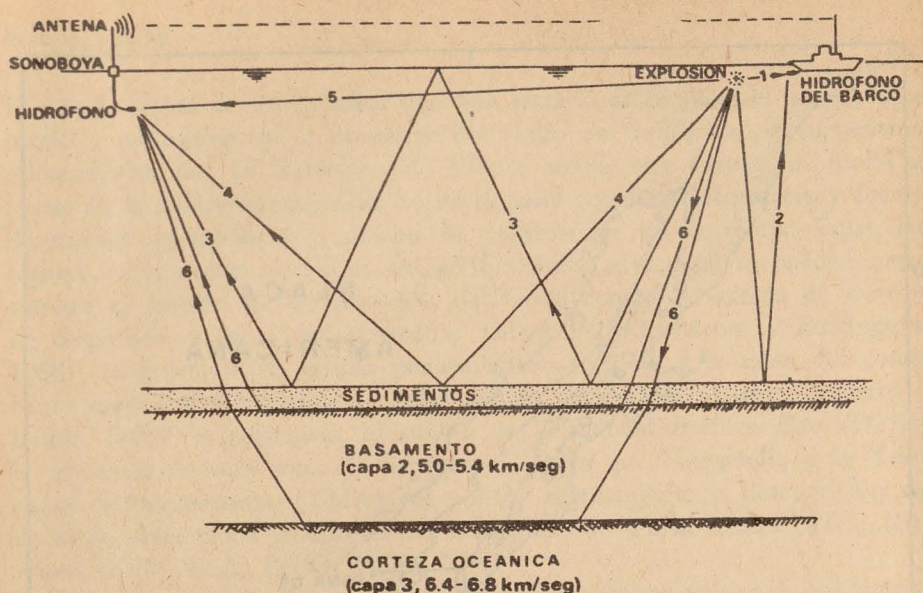
El levantamiento de refracción con sonoboyas se realizó a lo largo de 7 perfiles distribuidos de acuerdo a la figura 2.

Se utilizaron cuatro sonoboyas, de las cuales una permaneció anclada. Las cargas empleadas variaron de 2.5 a 360 Kg., aumentando a medida que la distancia punto de tiro-sonoboya era mayor. El intervalo de tiempo entre tiros fue de 5 a 10 minutos, lo que a una velocidad de 10 nudos equivale aproximadamente de 0.9 a 1.8 Km entre puntos de disparo (figura 3).

Las correcciones preliminares se efectuaron durante el crucero haciendo uso de una computadora IBM-1130 acoplada a una graficadora. Las correcciones y cálculos aplicados son:



1. Localización de la zona de estudio con los alineamientos tectónicos activos dentro del contexto de la Tectónica de Placas. PDE = Dorsal del Pacífico Este; zft, zfr y zfo = zonas de fractura Tamayo, Rivera y Orozco respectivamente. El signo de interrogación marca una posible continuación de la zona de fractura Tamayo como una zona de subducción (después de Atwater, 1970; Lomnitz *et al.*, 1970; Reichle, 1975).



3. Esquema de la distribución fuente-detector-barco en un trabajo de refracción sísmica marina con sonoboyas. Se aprecian trayectorias seguidas por algunos rayos, así como las capas por las cuales se propagan.

Trayectorias:

1. Directo punto de tiro-barco.
2. Reflexión al barco.
3. Reflexión múltiple a la boya.
4. Reflexión a la boya.
5. Directo a la boya.
6. Refracciones.

Tiempo de viaje de la onda directa del punto de tiro al barco.

Cálculo de la profundidad del punto de tiro.

Tiempo real de tiro suponiendo que la carga explotó en la superficie.

Tiempos de viaje de reflexión y refracción a la boya (t_{vr} , t_{VR})

Corrección por topografía marina.

Cálculo de la distancia boya-punto de tiro (Dpt-b).

Tiempos reducidos corregidos por topografía.

Esta última reducción es muy útil como recurso para la visualización de las diversas velocidades aparentes en una gráfica tiempo reducido-distancia,

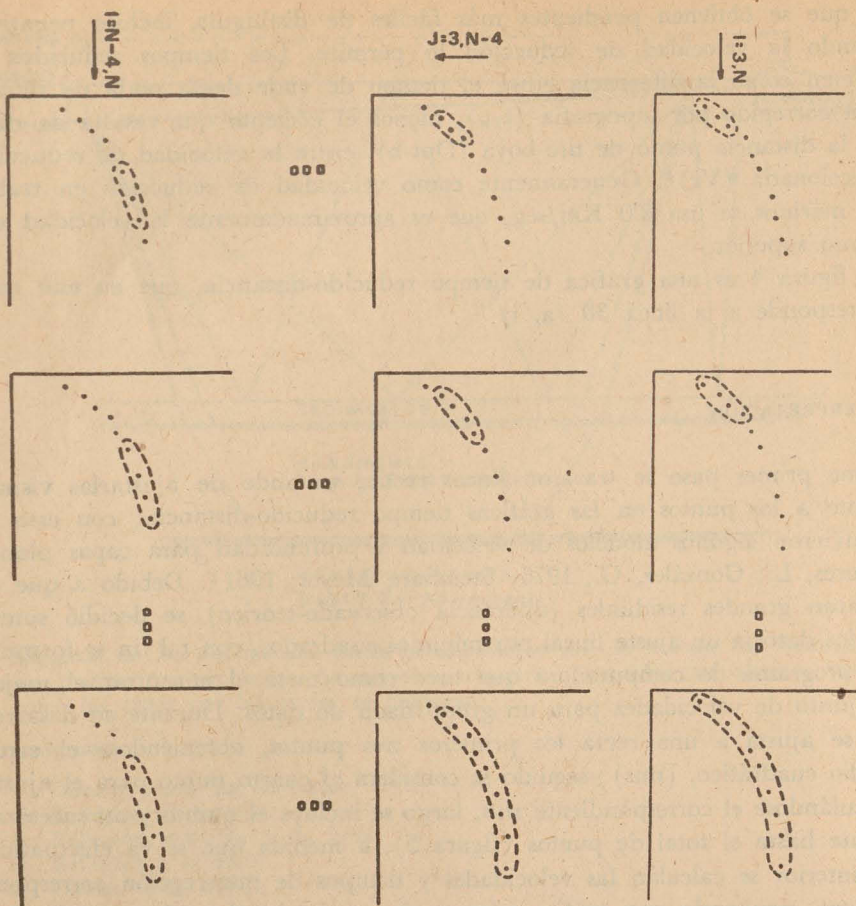
ya que se obtienen pendientes más fáciles de distinguir, incluso negativas cuando la velocidad de reducción lo permite. Los tiempos reducidos se definen como la diferencia entre el tiempo de viaje de la onda de refracción corregido por topografía (t_{VR}), menos el cociente que resulta de dividir la distancia punto de tiro-boya (Dpt-b), entre la velocidad de reducción seleccionada (V_r)*. Generalmente como velocidad de reducción en trabajos marinos se usa 8.0 Km/seg, que es aproximadamente la velocidad del manto superior.

La figura 4 es una gráfica de tiempo reducido-distancia, que en este caso corresponde a la línea 30 (a, i).

INTERPRETACIÓN

Como primer paso se trazaron líneas rectas, tratando de ajustarlas visualmente a los puntos en las gráficas tiempo reducido-distancia; con esto se obtuvieron algunos modelos de velocidad y profundidad para capas planas (Flores, L.; González, G., 1976; Steinhart, Meyer, 1961). Debido a que se notaron grandes residuales (diferencia observado-teórico) se decidió someter los datos a un ajuste lineal por mínimos cuadrados, con tal fin se formuló un programa de computadora que tuvo como meta el encontrar el mejor conjunto de velocidades para un grupo dado de datos. Durante su desarrollo se ajusta a una recta los primeros tres puntos, obteniéndose el error medio cuadrático, (rms); seguido se considera el cuarto punto para el ajuste calculándose el correspondiente rms, luego se incluye el quinto y así sucesivamente hasta el total de puntos (figura 5), a medida que se va efectuando lo anterior se calculan las velocidades y tiempos de intercepción correspondientes, resultando una gráfica número de puntos involucrados contra rms; el proceso se vuelve a repetir pero ahora sin considerar el primer punto, luego sin tomar en cuenta los dos primeros, y hasta que el proceso termina al considerar el ajuste desde el n-3 hasta el n punto. En la figura 6 se muestran tres salidas del programa, en la cual se observan algunos gradientes y mínimos relativos que se preservan a través de los diferentes ajustes y que pueden sugerir un contraste notable entre dos capas adyacentes. Partiendo de estos resultados se seleccionaron varios conjuntos de velocidades (de 2 a 4) para cada línea, tomando en cuenta en algunas ocasiones como criterio

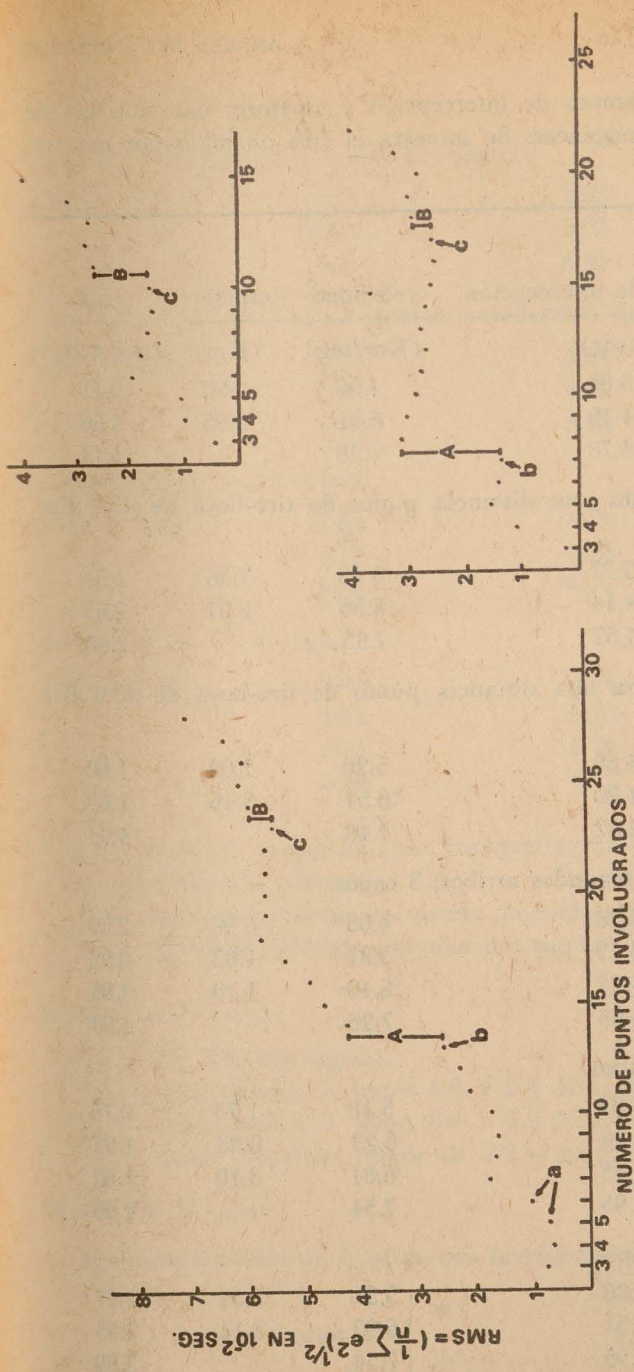
$$* t_R = t_{VR} - \frac{Dpt-b}{V_r}$$



5. Proceso iterativo de ajuste de puntos a líneas rectas.

de corte el gradiente, y en otras el rms mínimo de ajuste, observados de las gráficas "número de puntos involucrados contra rms".

Una vez que se seleccionaron conjuntos de velocidades con errores de rms entre 0.01 y 0.04 seg., buenos en general si se considera que la precisión de lectura en el sismograma es de 0.01 seg., se obtuvieron modelos de velocidad contra profundidad considerando capas planas horizontales homogéneas y de velocidad uniforme. Se consideró una velocidad para la columna de agua de 1.5 Km/seg y se despreció la contribución de la capa de sedimentos



6. Salidas del proceso de la figura 5 para la línea 30a que indican la presencia de saltos en velocidad (A y B), sugiriendo un contraste notable de velocidad entre dos capas adyacentes. Las letras minúsculas (a, b, c) indican estos cambios de velocidad.

Para un modelo de 3 capas:

distancia punto de tiro-boya (km)	tiempo de intercepción (seg)	velocidad (km/seg)	rms (seg × 10)
a entre 9.3 y 12.9	3.83	5.18	0.76
b entre 13.8 y 19.3	4.26	6.23	1.33
c entre 20.0 y 34.0	4.45	6.81	1.62
de 34.0 en adelante	4.95	7.54	3.89

TABLA I. Velocidades, tiempos de intercepción y espesores para modelos de capas horizontales y homogéneas. Se muestra el rms obtenido por mínimos cuadrados.

Línea 24,2 capas						
a_1	b_1	tiempo de intercepción	velocidad	espesor	rms	
(km)	(km)	(seg)	(Km/seg)	(Km)	(seg $\times 10^{-2}$)	
3.02	2.82	3.85	4.96	0.90	0.11	
		4.16	6.51	3.95	5.66	
		4.78	7.38		5.18	
Línea 26 (boya 4). Hasta una distancia punto de tiro-boya de 43.0 Km, 2 capas.						
2.94	2.80	3.77	5.43	1.56	1.51	
		4.14	6.56	2.91	2.65	
		4.62	7.33		2.98	
Línea 26 (boya 2). Hasta una distancia punto de tiro-boya de 43.0 Km, 2 capas.						
2.88	2.79	3.68	5.20	2.02	1.98	
		4.20	6.51	3.46	2.65	
		4.82	7.43		4.03	
Línea 30i (boya 1). Con segundos arribos, 3 capas.						
2.74	2.68	3.39	4.03*	0.90	2.00	
		3.79	5.31	1.83	0.93	
		4.27	6.40	1.70	3.85	
		4.66	7.26		4.93	
Línea 30a (boya 1), 3 capas.						
3.00	2.89	3.83	5.18	1.75	0.76	
		4.26	6.23	0.83	1.33	
		4.45	6.81	3.10	1.62	
		4.95	7.54		2.69	
Línea 30a (boya 1), 2 capas.						
3.03	2.89	3.88	5.31	2.34	1.07	
		4.51	6.90	3.11	2.55	
		4.95	7.54		3.89	

Tabla I. (Continuación)

Línea 45. No alcanza velocidad del manto.

2.92	2.80	3.72	5.03	1.28	4.46
		4.04	5.92	1.97	2.42
		4.50	6.95		4.47

Línea 47 (boya 1). Con un espesor considerable de sedimentos. 2 capas.

2.97	2.72	3.78	4.84	2.09	**
		4.48	6.83	5.32	2.97
		5.41	8.06		4.73

Línea 53 (boya 2), 2 capas.

3.02	2.86	3.84	4.94	3.04	1.14
		4.77	6.78	4.99	3.88
		5.74	8.12		2.12

Línea 53 (boya 2), 3 capas.

3.02	2.86	3.84	4.94	2.43	1.14
		4.51	6.23	1.18	1.81
		4.73	6.74	4.61	3.63
		5.74	8.12		2.12

 a_1 — nivel de corrección por topografía marina y sedimentos. b_1 — batimetría promedio.

* — zona posiblemente fracturada obtenida sólo con segundos arribos.

** — velocidad obtenida con sólo dos puntos, no confiable.

Modelos de 2 capas:

 V_1 — 1.5 Km/seg (agua). V_2 — capa sísmica 2, entre 4.8 y 5.4 Km/seg. V_3 — capa sísmica 3, entre 6.4 y 6.9 Km/seg. V_4 — manto superior, mayor de 7.2 y menor de 8.1 Km/seg.

Modelo de 3 capas:

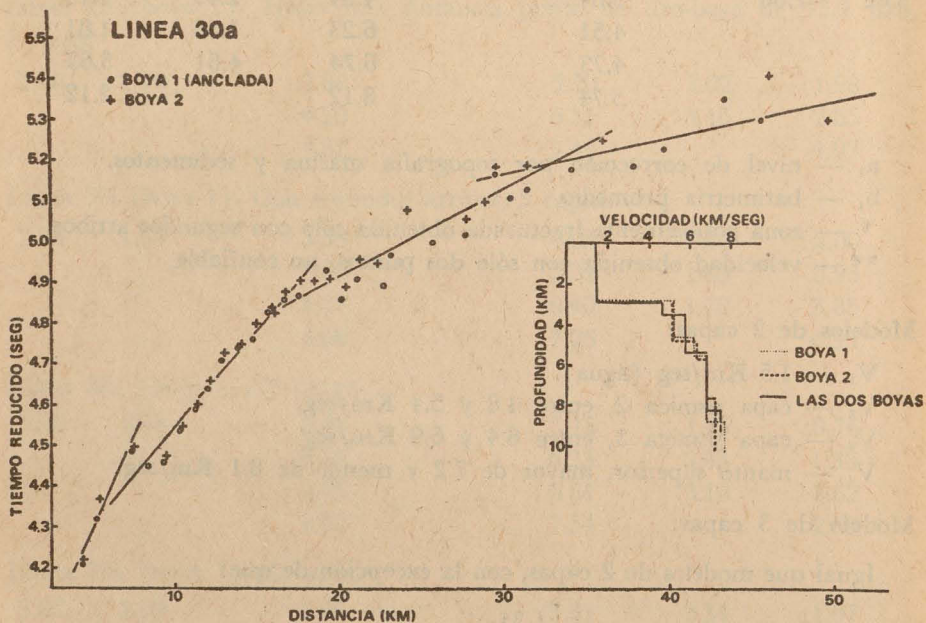
Igual que modelos de 2 capas, con la excepción de que:

$$\text{capa sísmica 3} \begin{cases} 3a \\ 3b \end{cases}$$

a los tiempos de arribo, en parte porque es imposible con los datos disponibles resolver para ella y porque en líneas como en la 30i no se observaron sedimentos en los registros de reflexión, o como en el caso de la 30a, en la que aunque se observa un espesor notable (hasta menos de 200 m) se considera que no influyen en demasía debido a que la corrección por topografía disminuye su efecto. Aquí la velocidad obtenida para sedimentos no consolidados es de 1.5 a 1.8 Km/seg; nótese que en un estudio similar en la fosa axial de la dorsal de Juan de Fuca sobre sedimentos no consolidados se estimó una velocidad de 1.7 Km/seg (Davis, Lister, Lewis, 1975).

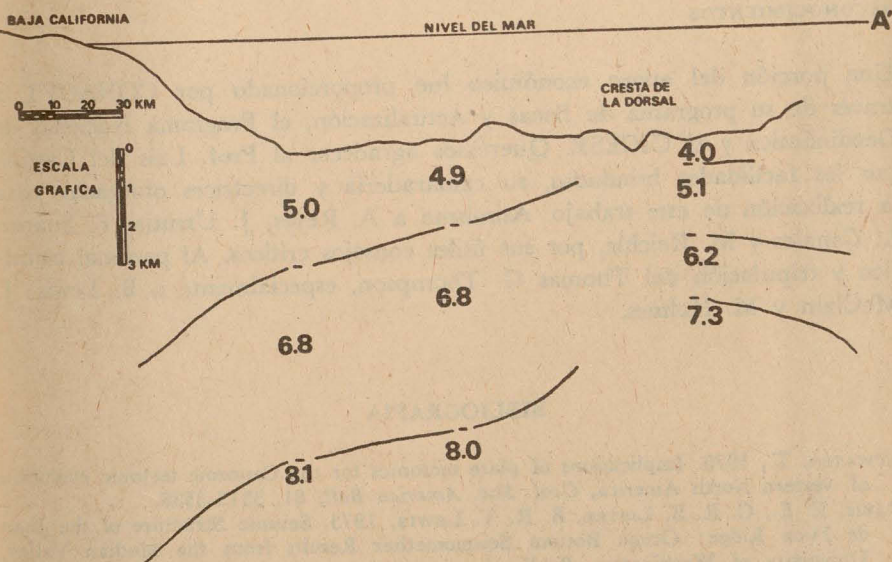
La Tabla I muestra modelos de capas planas para los cuales se observaron los menores rms. En la figura 7 se encuentran los modelos obtenidos del perfil 30a para dos boyas diferentes, separadas aproximadamente 2 Km, para el modelo regional se optó por considerar la estructura dada por la boya no.1

La Línea 30i (figura 4) presenta una anomalía en la zona de intersección de la zona de fractura Tamayo con la DPE, esta anomalía ha sido inter-



7. Gráfica tiempo reducido-distancia de la Línea 30a con arribos a dos boyas. Modelo de tres capas planas

pretada como causada por una zona de inyección de magma (McClain, Lewis, Snysman, Heitmann, Lister, Holmes, 1976). Como modelo regional preliminar, se ha seleccionado el siguiente (figura 8): el espesor cortical en la cercanía de la unión de la ZFT y la DPE es de 4.0 a 4.5 Km (Línea 30i) con una velocidad para el manto superior de 7.2 a 7.4 Km/seg. El espesor cortical tiende a aumentar hacia el sur del flanco oriental de la dorsal, oscilando entre 5.4 y 5.8 Km, con velocidad máxima de 7.54 Km/seg (Línea 30a). La Línea 47, que se encuentra localizada sobre corteza normal y tiene una dirección sensiblemente perpendicular al rumbo de la DPE, posee un espesor cortical de 7.3 Km y una velocidad para el manto superior de 8.0 Km/seg; sin embargo, este perfil (muy importante por su localización) se debe tomar con cierta reserva ya que la velocidad del basamento (capa sísmica II) ha sido obtenida con sólo dos puntos. Una línea paralela a la base de la pendiente continental de la península (Línea 53, figura 2) presenta un congruente aumento del espesor cortical en relación al anterior, obteniéndose un valor aproximado de 8.0 Km y una velocidad de 8.1 Km/seg bajo la interfase corteza oceánica-manto superior.



8. Sección sísmica AA' (figura 2) tomando como base las líneas 30i 47 y 53. Velocidades en km/seg.

La sección AA' de la figura 8 se muestra sobre el plano de perfiles de la figura 2. El ascenso de las interfases entre capas bajo la cresta de la DPE ratifica lo encontrado por Rosendahl (1975), quien en base a un estudio de refracción con sismómetros de fondo oceánico sobre la DPE determina que la cresta está sobreyaciendo a una zona cortical bien limitada de baja velocidad sísmica que contiene un 30% de fluidos

CONCLUSIONES

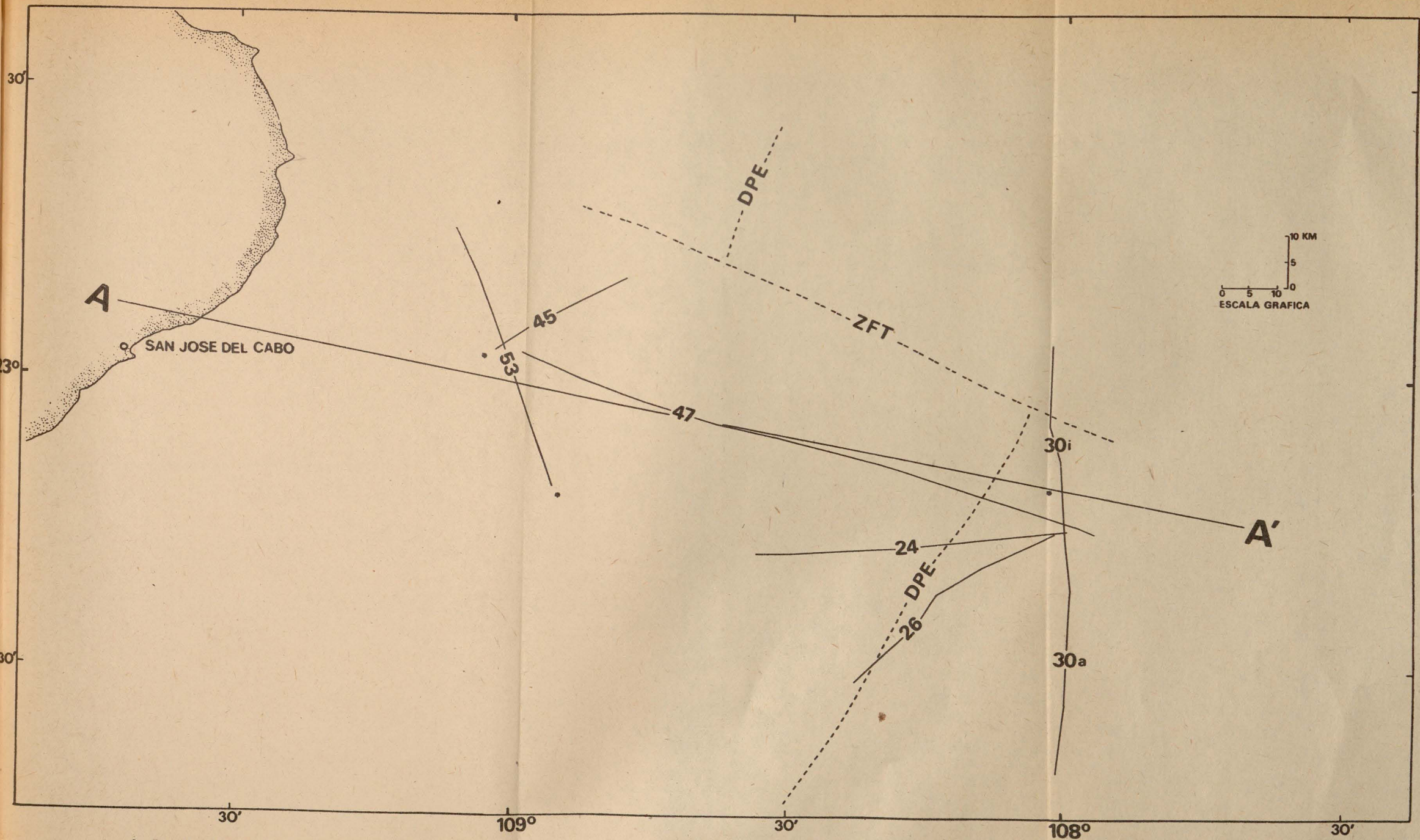
La interpretación de refracción aunada a otro tipo de evidencias (Flores, L. y González, G. (en preparación); Rosendahl, 1975) indican claramente la existencia de una zona de esparcimiento activo sobre la DPE, bajo la cual se presenta una corteza oceánica delgada del orden de 4 Km con un aumento gradual a medida que se incrementa la distancia a la dorsal. El espesor de la corteza en las cercanías de la pendiente continental es aún mayor y explicable como una compensación isostática, debido a la presencia de la península de Baja California.

RECONOCIMIENTOS

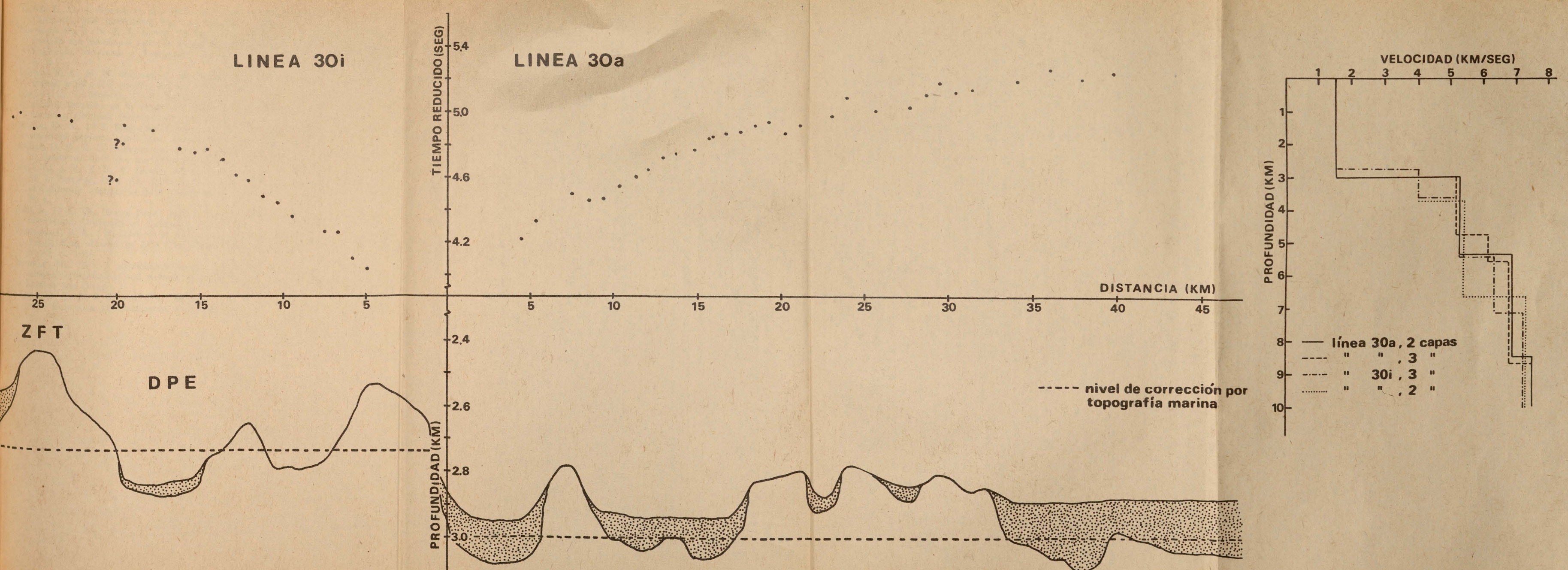
Una porción del apoyo económico fue proporcionado por CONACYT a través de su programa de Becas y Actualización, el Programa Nacional de Geodinámica y el CICESE. Queremos agradecer al Prof. Luis del Castillo por las facilidades brindadas, su camaradería y directrices otorgadas para la realización de este trabajo. Asimismo a A. Reyes, J. Urrutia, F. Suárez, L. Canales y M. Reichle, por sus útiles consejos críticos. Al personal científico y tripulación del Thomas G. Thompson, especialmente a B. Lewis, J. McClain y M. Holmes.

BIBLIOGRAFÍA

- ATWATER, T., 1970. Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America, *Geol. Soc. America Bull*, 81, 3513-3536.
- DAVIS, E. E., C. R. B. LISTER, B. R. T. LEWIS, 1975. Seismic Structure of the Juan de Fuca Ridge: Ocean Bottom Seismometer Results from the Median Valley, University of Washington, Publication.
- FLORES L., C., J. GONZÁLEZ G., A magnetic and seismic reflection survey over EPR between 22°08' — 23°38' North latitude: Preliminary results (in preparation).



2. Localización de los perfiles sísmicos de refracción. Se muestran las posiciones aproximadas de las sonoboyas(*) y la sección AA, (figura 8).



4. Perfil de las líneas 30i y 30a. Se muestran la batimetría, espesor de sedimentos y el nivel de corrección por topografía marina. Modelos de capas planas para las mismas líneas, considerando 2 y 3 capas homogéneas y con velocidad uniforme.

- FLORES L., C., J. GONZÁLEZ, G., 1976. Un estudio Geofísico en la Boca del Golfo de California, tesis profesional, Fac. de Ingeniería, UNAM.
- GONZÁLEZ G., J., B. R. T. LEWIS, C. FLORES L., 1976. Un estudio Sísmico de Refracción con Sonoboyas sobre la Dorsal del Pacífico Este en la Boca del Golfo de California. Programa y Resúmenes, Reunión Anual Unión Geofísica Mexicana, p. 52.
- LARSON, R. L., H. W. MENARD, S. M. SMITH, 1968. East Pacific Rise crest: a near bottom geophysical profile, *Science*, 163, 68-70.
- LOMNITZ C., F. MOOSER, C. R. ALLEN, J. N. BRUNE, W. THATCHER, 1970. Sísmicidad y tectónica en la región del Golfo de California, México: Resultados Preliminares, *Geofísica Internacional*, 10, 37-48.
- MOORE, D. G., 1973. Plate-edge deformation and crustal growth, Gulf of California structural province, *Geol. Soc. America Bull.*, 84, 1883-1906.
- MOORE, D. G., E. C. BUFFINGTON, 1968. Transform faulting and growth of the Gulf of California since the late Pliocene, *Science*, 161, 1238-1241.
- MCCLAIN, J. S., B. R. T. LEWIS, W. E. SNYDSMAN, C. HEITMANN, C. R. LISTER, M. L. HOLMES, 1976. An IPOD site Survey of the East Pacific Rise in the Gulf of California, abstract in EOS Transactions, *American Geophysical Union*, v. 57, N. 4.
- REID, I., 1976. The Rivera Plate: a study in seismology and Plate Tectonics, Ph. D. dissertation, University of California, San Diego.
- ROSENDAHL, B. R., 1975. Genesis of Axial Morphology and Crustal Layers at the East Pacific Rise, abstract in EOS Transactions, *American Geophysical Union*, v. 56, N. 12, p. 1064.
- REICHLER, M., 1975. A seismological study of the Gulf of California: sonobuoy and teleseismic observations and tectonic implications, Ph. D. Thesis, University of California, San Diego.
- STEINHART, J., R. P. MEYER, 1961. Explosión Studies of Continental Structure, Carnegie Institution of Washington, Pub. 622.