*EL MARCO GEOFISICO DEL GOLFO DE CALIFORNIA **

F. N. SPIESS **

El conocimiento Geofísico del Golfo de California comienza en la expedición al Mar Bermejo, efectuada durante 1959. Entre febrero y junio de ese año trabajaron en este problema, dos barcos de la Institución Scripps de Oceanografía. Esos barcos fueron el HORIZON y el BAIRD, navíos gemelos con 44 metros de eslora, desplazando 1000 toneladas y llevando aproximadamente 10 científicos. El trabajo geofísico hecho durante la primera porción consistió en un programa de gravimetría realizado por J. C. Harrison y el autor en el HORIZON, mientras los dos barcos navegaban independientemente hacia el norte. La segunda parte fue la exploración sísmica y de flujo térmico, en la cual los dos barcos trabajaron juntos hacia el sur bajo la responsabilidad de R. W. Taitt, G. G. Shor y R. P. von Herzen.

La investigación gravimétrica se hizo simultáneamente con el programa de muestreo de núcleos fungiendo G. Ruznak como líder de la expedición, en el HORIZON. El rumbo general seguido, entre uno y otro recorrido del Golfo fue, gradualmente, hacia el norte. El programa tenía dos propósitos: 1) conocer el nuevo gravímetro para navíos de superficie, desarrollado por LaCoste; y 2) de ser posible, mapear las variaciones en gravedad, con el mismo aparato.

La vaguedad en las observaciones de gravedad a bordo de un barco puede deberse a factores diversos: a) falta de precisión del aparato; b) errores en la medición; c) cálculo de la corrección para aceleración horizontal; y d) falta de conocimiento de la posición y velocidad de la embarcación. Las

* Este trabajo comprende los resultados de una investigación efectuada bajo contrato No. 2216 (05) de la Oficina de Investigación Naval. Preparado originalmente para presentarse en el Simposio de Estudios de Geología Marina y Oceanografía, organizado por el Instituto de Geología, U. N. A. M., en la Ciudad de México, noviembre 27-29 de 1962.

** Laboratorio de Física Marina, Institución Scripps de Oceanografía, Universidad de California, La Jolla, Calif. E. U. A.

dos primeras pueden comprobarse por comparación con las lecturas de fondo y las mediciones gravimétricas en la costa, cerca de los lugares donde puedan hacerse observaciones en el barco. Durante esa expedición se hicieron 30 comparaciones de ese tipo las que mostraron que las mediciones con el gravímetro de navío de superficie fueron usualmente menores que las otras, en uno o dos miligales, con una imprecisión de cerca de 2 miligales (Harrison y Spiess 1961).

Las estimaciones de error del gravímetro de navío de superficie fueron efectuadas observando la magnitud del término de corrección, causado por las condiciones del mar durante cualquier tiempo. Muchas veces, durante la mitad de la expedición, se encontraron tormentas, que dieron lugar a correcciones demasiado grandes para ser exactas, por lo cual no pudieron hacerse observaciones durante tales períodos. Las otras correcciones fueron basadas por simple enfilación de puntos a cada lado del Golfo, y la imprecisión de los datos varía de una sección a otra. La dispersión de las observaciones es notablemente diferente en aquellas secciones donde se hicieron paradas para sacar núcleos. En el último caso, el conocimiento de la velocidad de este-oeste, en cada observación, está mucho más sujeto a error. Los datos finales, alisados a lo largo de la ruta, tienen probablemente imprecisiones del orden de 5 miligales. El número total de observaciones gravimétricas hechas en la expedición fue de 2000 aproximadamente.

Todas las observaciones se calcularon desde una estación base en San Diego. Las anomalías parciales de aire libre al infinito (*slab*) de Bouguer se calcularon y están publicadas en un informe del Instituto de Geofísica y Física Planetaria de la Universidad de California, titulado: "Gravity Measurements in the Gulf of California", por J. C. Harrison y F. N. Spiess.

En la mitad sur del Golfo, el aspecto general, es el que muestra la figura 2. Las observaciones que se utilizaron para trazar las curvas de nivel fueron hechos en cada uno de los puntos pequeños. Las líneas punteadas muestran la ruta del barco. Las líneas con puntos ampliamente espaciados corresponden a las estaciones donde se tomaron núcleos, mientras en las líneas con puntos cercanos se navegó con rumbo y velocidad. Esta figura cubre el área entre Mazatlán (donde la costa toca más al sur la ruta, hacia el norte, justamente hasta una línea bajo Guaymas, Santa Rosalía y Bahía de Ballenas, en el Pacífico. Los contornos dan los valores de la anomalía de Bouguer, parcial al infinito. Esas se calcularon substrayendo la gravedad normal como función de la latitud, desde los valores observados, para obtener la anomalía de aire libre y añadiendo a ésta el efecto de una anomalía parcial infinita de densidad $(2.34-1.03) \text{ gm/cm}^3$ (2.67 usada en la parte sur) y espesor igual al

Fig. 1.

Fig. 2.

del agua en el punto de observación. Esta cantidad sería cercana a cero si el Golfo estuviera simplemente constituido por la excavación del material normal de la corteza, sin ninguna estructura profunda compensadora. Está claro que cerca de los bordes, donde la anomalía es cercana a cero, el terreno está sin alterar, mientras hacia el centro del Golfo, donde las anomalías son fuertemente positivas, hay abajo una masa adicional, al menos compensada parcialmente por la falta de masa en las cuencas llenas de agua.

Las anomalías observadas a lo largo del eje de la parte sur del Golfo, son aproximadamente las mismas que las notadas en las mismas profundidades en el Norte del Pacífico. Esta estructura parece entonces estar en equilibrio

isostático y sugiere inmediatamente el concepto que el material profundo más pesado del manto está aquí más cerca de la superficie, que bajo una estructura continental normal.

Al norte de la Cuenca de Guaymas, como se muestra en la figura 3, el carácter del campo de gravedad es notoriamente diferente. Las cuencas profundas han desaparecido y con ellas las grandes anomalías de Bouguer y el exceso compensador de masa profunda. En el norte, sólo hay rasgos de escala relativamente pequeña, con la mayor parte de las anomalías ligeramente negativas, a pesar de profundidades de agua de 500 m o más, que en estructuras bien compensadas deberían mostrar anomalías positivas de 20 o 30 miligales. La implicación directa de esto es que la región es deficiente en masa. En tales sitios, como justamente al oeste de la Isla Angel de la Guarda y el Delta del Río Sonora, puede pensarse que han existido gargantas profundas sin compensar, rellenas con sedimentos de densidad ligera, o que, por alguna otra razón, el sedimento se extiende a mayor profundidad que en la columna adyacente. Sin embargo, sobre la extensa área de la sección al norte, la rápida llegada de sedimento debería dar una anomalía positiva, o al menos de cero, si la cuenca rellena por el sedimento estuviera en equilibrio desde sus primeros tiempos. Se investigó la posibilidad de que esas anomalías negativas ampliamente distribuidas pudieran ser debidas a raíces ligeras distantes, bajo la península y el continente, lo cual no parece ser cierto. Esta región de anomalías negativas representa, por lo tanto, un rasgo inestable de la corteza. Aún están en estudio las implicaciones teóricas de esto.

La exploración sísmica de refracción fue efectuada durante la segunda mitad de la Expedición del Mar Bermejo. Los dos Barcos, HORIZON y BAIRD se encontraron en el extremo norte del Golfo y operaron desde ahí hacia el sur, bajo la dirección de R. W. Raitt y G. G. Shor. Las técnicas empleadas fueron aquellas desarrolladas en los últimos diez años, durante operaciones en el Pacífico (Raitt, 1956, p. 1963).

Para explorar adecuadamente el Golfo, los dos barcos tomaron rumbo sur, con líneas de refracción casi de extremo a extremo, a lo largo del eje. En adición a las líneas axiales también se hicieron algunas cercanas a la costa y pocas al sur de Baja California.

La sección axial (Fig. 4) empieza en el norte, en aguas someras con una gruesa capa intermedia de material, con velocidad de 5.3 km. por segundo, que sobreyace a una capa de 6.7 km por segundo, cuyo fondo no fue claramente penetrado, aunque hay algunas indicaciones de una velocidad mayor de 8 km-segundo en el extremo de las primeras líneas. La parte su-

Fig. 3.

Fig. 4.

perior de esta sección concuerda con líneas de disparos al norte, en tierra, por Kovach y otros, mencionados en el *Journal of Geophysical Research*, en agosto de 1962. A medida que se avanza al sur, la capa de 5.3 km/segundo parece adelgazarse hasta que la transición a 6.7 km se encuentra a profundidad menor de 5 km bajo la superficie. En el mismo lugar empieza a señalarse una capa adicional de mayor velocidad. Este material fue notado primeramente a una profundidad cercana a 12 km con una velocidad de 7.8 km/segundo, subiendo gradualmente hasta 10 km y decayendo hasta menos de 7.6 km/segundo. Esta condición se extiende al sur de Mazatlán y después parece buzar hacia el sur con aumento de velocidad. La capa de sedimento en el sur es aparentemente delgada, desde un máximo algo mayor de 1 km, hasta menos de la mitad de ese valor, en la boca del Golfo.

El espesor de la corteza es el típico de las cuencas oceánicas profundas en áreas sin disturbios. Sin embargo, en tales áreas, la velocidad del sonido, debajo de la capa, es de 8.0 a 8.2 km/segundo. Hablando técnicamente, la máxima velocidad ahí encontrada es demasiado baja para ser clasificada como perteneciente a la discontinuidad de Mohorovicic. En ninguna de las cuencas normales del Oceano Pacífico las velocidades encontradas llegan a variar de 7.3 a 7.8 km/segundo. Raitt (1956) ha resumido las velocidades encontradas en áreas normales del Pacífico, omitiendo estaciones en arcos de islas, en trincheras y el Alto del Pacífico Oriental "Eastern Pacific Rise". La frecuencia de puntos con velocidades observadas indica con claridad una capa prevalente de 6.5 a 6.7 km/segundo y una velocidad en la Moho de 8.0 a 8.2. Sin embargo, han sido encontradas velocidades profundas, como las encontradas en el Golfo bajo el Alto del Pacífico Oriental, en la Cordillera Meso-Atlántica "Mid-Atlantic Ridge" y en un caso al norte de la Escarpa Mendocina.

En el mismo viaje P. von Herzen, hizo observaciones de flujo térmico cuya técnica ha sido desarrollada principalmente por Maxwell (1956) y von Herzen (1959).

A lo largo del eje del Golfo de California, se hicieron observaciones en su mitad sur, en 5 localidades y cerca de su boca, en tres puntos más. Con excepción de un solo valor bajo, en la línea entre Cabo San Lucas y Mazatlán, el resto cambia desde 2.8 microcalorías por centímetro cuadrado/segundo hasta 6.15, con las 5 estaciones en el Golfo 2.80, 2.94, 2.95, 4.19 y 4.24 que son comparables con el promedio de aproximadamente 1.1, para continentes y océanos con muy poca variación. Esta región es, por lo tanto, un área de alto flujo térmico.

En síntesis los tres grupos de observaciones independientes coinciden con

el concepto de que bajo la corteza, es decir, por debajo de la mayor discontinuidad mostrada por el trabajo sísmico de refracción, el material del manto es más caliente y de una densidad menor que la encontrada normalmente bajo el piso del oceano abierto. Las observaciones gravimétricas y sismológicas concuerdan entre sí, si se acepta que el material del manto es 10% más ligero para una profundidad de 10 km bajo la discontinuidad de Mohorovicic, en relación a la estructura normal del fondo del mar. Combinando tal dato con el alto flujo térmico observado se tiene la evidencia convincente de que la porción sur del Golfo de California yace sobre la parte ascendente de una celda de convección en el manto y que este hecho es muy similar al del Alto del Pacífico Oriental, o quizá una extensión de ella. La posibilidad de que la totalidad del Alto sea una cresta de convección, ha sido postulada por numerosos investigadores, principalmente Vacquier y Menard (1960). Aquí, en el Golfo de California, la evidencia es mucho mayor, al cambiarse los detallados trabajos de gravimetría, sismología de refracción y flujo térmico en el área.

Los resultados geofísicos muestran claramente que el Golfo no pudo haberse formado como un graben, por hundimiento de un bloque de material continental. Es mucho más lógico pensar que Baja California es una pieza del continente, a la cual la célula de convección, ha separado lentamente desde su posición original.

BIBLIOGRAFIA CITADA

- BULLARD, E., MAXWELL, A. E. and REVELLE, R. (1956) *Heat Flow through the Deep-Sea Floor*. Adv. Physics, v. 3, p. 153.
- HARRISON, J. C. and SPIESS, F. N. (1961). *Gravity Measurements in the Gulf of California*. Interim. Rept. Univ. California Inst. Geophysics and Planetary Physics, Contract 233 (19).
- MENARD, H. W. (1960). *East Pacific Rise*. Science, v. 132, p. 1737-1740.
- RAITT, R. W. (1956). *Seismic Refraction Studies on the Pacific Ocean Basin. Part I. Crustal Thickness of the Central Equatorial Pacific*. Bull. Geol. Soc. America, v. 67, p. 1623.
- VON HERZEN, R. P. (1959). *Heat Flow Values from the Southwestern Pacific*. Nature, v. 183, p. 882.