



Batimetría y características hidrográficas (Mayo, 2007) en las Cuencas de Consag y Wagner, Norte del Golfo de California, México

Viridiana Vázquez-Figueroa^{1,2}, Carles Canet^{2,*}, Rosa María Prol-Ledesma², Alberto Sánchez³, Paul Dando^{4,5}, Antoni Camprubí⁶, Carlos J. Robinson⁷, Gerardo Hiriart Le Bert⁸

¹ Universidad del Mar, Campus Puerto Ángel, 70902 Oaxaca, México

² Departamento de Recursos Naturales, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, 04510 México D.F., México

³ Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional, Av. IPN s/n, Col. Playa Palo de Santa Rita, Apartado postal 592, 23096 La Paz, Baja California Sur, México

⁴ Marine Biological Association of the U.K., Citadel Hill, Plymouth, PL1 2PB, Reino Unido

⁵ School of Ocean Sciences, Bangor University, Menai Bridge, Anglesey, LL59 5AB, Reino Unido

⁶ Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, 04510 México D.F., México

⁷ Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, 04510 México D.F., México

⁸ Proyecto IMPULSA IV, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, 04510 México D.F., México

* E-mail: ccanet@geofisica.unam.mx

Resumen

La parte Norte del Golfo de California presenta una compleja actividad tectónica, además de ser una región sometida a diversos factores oceanográficos y climáticos que modifican constantemente la circulación y composición del agua y la dinámica de los sedimentos. Con el objeto de distinguir los principales rasgos hidrográficos para la columna de agua, así como su batimetría detallada, se analizaron datos de CTD y ecosonda tomados durante mayo de 2007 en las cuencas de Wagner y Consag. La batimetría de las cuencas sugiere una subsidencia ligada a extensión *pull-apart*. Los taludes que definen el borde oriental de las cuencas se corresponden con la falla lístrica de Wagner, con orientación NNW-SSE. Los resultados indicaron que la columna de agua se encontraba estratificada con una termoclina presente en los primeros 50 metros de profundidad y sólo el 32% de estaciones presentó una capa de mezcla. La temperatura de la columna varió entre 23° en la superficie hasta 15°C en el fondo de las cuencas. La salinidad osciló entre 35.2 en el fondo y 35.8 en la superficie, con ausencia de haloclina. Se identificó un domo de menor salinidad (35.32) que parece desplazarse de sur a norte, de 50 a 150 m de profundidad. El diagrama T-S muestra la presencia de Agua del Golfo de California.

Palabras clave: Masas de agua, termoclina, batimetría, cuenca de *pull-apart*, Falla de Wagner.

Abstract

The northern Gulf of California encompasses a complex tectonic setting characterized by several oceanographic and climatic factors that continuously change water circulation and composition as well as sediment dynamics. CTD and echosounder data, collected during May 2007 in the Wagner and Consag basins, are here presented and analyzed, with the aim of determining the principal hydrographic features of the water column and the detailed bathymetry of the basins. Bathymetry is in agreement with fault-bounded, subsiding, pull-apart basins. The slopes that outline the eastern border of both basins coincide with the NNW-striking listric Wagner Fault. CTD results indicate that during the sampling period the seawater column was distinctly stratified, with the thermocline located in the upper 50 m, and only 32% of the stations present a mixing layer. The water temperature ranged from 23°C at the surface to 15°C at the sea bottom. Salinity ranged between 35.8 at the surface and 35.2 at the bottom, and a halocline was not present. A low salinity (35.32) seawater mass was identified, entering the basins from south to north at depths from 50 to 150 m. In addition, the T-S plot indicates the presence of Gulf of California Water.

Keywords: Seawater masses, thermocline, bathymetry, pull-apart basin, Wagner Fault.

1. Introducción

Las regiones del Alto y Norte del Golfo de California se encuentran separadas por la isóbata de los 30 m (Lavín *et al.*, 1998), ambas regiones se caracterizan por ser plataformas relativamente someras con profundidades máximas de 200 m (Carriquiry *et al.*, 2001) y por la presencia de cuencas del tipo *pull-apart* (e. g., Cuenca Wagner). La región es geológicamente compleja, pues alberga la frontera tectónica entre las placas de Norteamérica y del Pacífico (Figura 1).

Los factores que afectan a la dinámica del Golfo de California (GC) son resultado de: (a) el viento (Parés-Sierra *et al.*, 2003); (b) las mareas (Alvarez-Borrego y Gaxiola-Castro, 1988); y (c) la radiación solar (evaporación) (Bray, 1988; Lavín y Organista, 1988). El GC es una región muy compleja que presenta una alta productividad (Alvarez-Borrego *et al.*, 1978; Alvarez-Borrego y Gaxiola-Castro, 1988). Particularmente en el Alto y Norte del Golfo de California se han registrado los efectos derivados de la descarga del Río Colorado (Carriquiry y Sánchez, 1999; Lavín y Sánchez, 1999) que han llevado a una nueva dinámica y relocalización del material sedimentario, de forma que los sedimentos son transportados y dispersados a lo largo del margen occidental (Carriquiry y Sánchez, 1999; Shumilin *et al.*, 2002) y finalmente depositados en la región profunda del Norte del Golfo (Carriquiry *et al.*, 2001; Daesslé *et al.*, 2004). Alvarez y Jones (2004) sugieren que las corrientes de gravedad, generadas en el Alto Golfo, son el mecanismo dominante que ocasiona la dispersión de sedimentos hacia las partes profundas del Norte del Golfo de California, al menos para las condiciones de verano.

El clima de la mayor parte del área del Norte del Golfo de California es subtropical árido y presenta dos temporadas claramente diferenciadas: (a) invierno, de octubre a mayo; y (b) verano, de junio a septiembre. La transición entre ambas temporadas es corta. La circulación de los vientos en el GC ocurre principalmente a lo largo del eje del Golfo, debido a la alta topografía que se encuentra a ambos lados de éste, la Sierra Madre Occidental en Sonora y Sinaloa y las sierras de San Pedro Mártir y La Giganta al norte y sur de la Península de Baja California, respectivamente, que la convierten en una cuenca semicerrada y con efecto de embudo (Pegau *et al.*, 2002; Parés-Sierra *et al.*, 2003). Los vientos fluyen del NW en el período invernal (velocidad promedio $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), y del SE en verano (velocidad promedio $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, Lavín *et al.*, 1997; Carriquiry y Sánchez, 1999). Estos vientos inducen una circulación superficial y a gran escala, observada como giros estacionales ciclónicos, de junio a noviembre (verano), y anticiclónicos, de noviembre a mayo (invierno), con velocidades promedio de $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Lavín *et al.*, 1997; Marinone, 2003). Carrillo *et al.* (2002) mencionan que, para el Norte del Golfo de California, durante sus periodos intensos, los giros cubren por entero la columna de agua, influyendo en la distribución de nutrientes y en las variables físicas.

Las corrientes de marea son una componente importante en el Norte del Golfo de California y en la región de las Grandes Islas. En el área del Norte del Golfo de California y el delta del Río Colorado, las mareas semidiurnas, con una amplitud de

$\sim 5 \text{ m}$, inducen corrientes con velocidades mayores a $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Debido a estos forzamientos por marea se produce una gran homogenización en la columna de agua (Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Lavín *et al.*, 1998).

La alta evaporación durante todo el año ($1 \text{ m}\cdot\text{año}^{-1}$) y el enfriamiento de las aguas superficiales en invierno producen fenómenos de inversión estuarina, induciendo corrientes de gravedad de $\sim 10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (Carriquiry *et al.*, 2001; Marinone, 2003), las cuales posteriormente se desplazan hacia el sur llenando a las partes profundas de las cuencas de Wagner, Delfín y Salsipuedes (Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Lavín *et al.*, 1998). Estas corrientes son moduladas por el forzamiento de marea; debido a este fenómeno se produce una ligera estratificación durante las mareas muertas (Lavín *et al.*, 1998).

Bray (1988) y Delgadillo-Hinojosa *et al.* (2006) indican que en la región del Norte del Golfo de California se encuentra caracterizada el Agua del Golfo de California, la cual es formada *in situ* como resultado de procesos de evaporación-enfriamiento en el Alto Golfo (Lavín *et al.*, 1998). La distribución de salinidad y temperatura del agua en el Norte del Golfo de California está determinada por la radiación y la humedad (Lavín *et al.*, 1997). Existe una gran variabilidad de temperatura en el Norte del Golfo de California, con valores mínimos de 8.25°C registrados en diciembre y máximos de 32.58°C registrados en agosto. La salinidad superficial mínima es de 35.28, registrada en octubre, y la máxima de 41.00, registrada en julio (Alvarez-Borrego *et al.*, 1975). No existe un aporte significativo de agua dulce del Río Colorado, con excepción de los días en los que se registran elevadas precipitaciones pluviales locales en la cuenca de dicho río (Lavín y Sánchez, 1999). El gradiente superficial de temperatura sufre inversiones a principios de primavera y de otoño, debido al ciclo anual de irradiación solar y de temperaturas atmosféricas. Sin embargo, la salinidad mantiene en general el mismo gradiente, con valores aumentando hacia el noroeste del Norte del Golfo de California (Lavín *et al.*, 1998).

Los objetivos de este trabajo son mostrar las características hidrográficas observadas durante mayo de 2007 en las cuencas de Wagner y Consag del Norte del Golfo de California y, a partir de datos de CTD, distinguir las principales masas de agua en la zona. Se presenta, además, una caracterización detallada de los rasgos batimétricos de ambas cuencas, los cuales se interpretan en el contexto de la tectónica regional.

2. Marco geotectónico

El GC constituye un *rift* oblicuo que en su extremo septentrional alberga una transición de régimen tectónico, entre (a) la expansión de los fondos oceánicos originada por la Dorsal del Este del Pacífico (EPR, por sus siglas en inglés), al sur; y (b) el límite transformante dextral correspondiente a las fallas de Cerro Prieto y San Andrés, al norte.

El origen del GC se remonta al Mioceno Medio (16-12 Ma), período que registró un cambio progresivo del régimen

tectónico, de subducción a *rifting* continental, que tuvo como consecuencia la incorporación de la Península de Baja California a la Placa Pacífico (Angelier *et al.*, 1981; Martín-Barajas y Delgado-Argote, 1995). Asu vez, el *rifting* evolucionó desde una extensión casi ortogonal hasta la extensión oblicua de dirección NE-SW que dio lugar al proto-golfo (Stock y Hodges, 1989). Entre el Mioceno Medio y el Plioceno Inferior (12 y 5.5 Ma), el movimiento entre las placas Pacífico y de Norteamérica se desarrolló esencialmente por medio del sistema de fallas transformantes de movimiento dextral de Tosco-Abreojos (Spencer y Normark, 1989; Michaud *et al.*, 2005, 2007). Posteriormente, desde 5 Ma, la EPR se propagó hacia el norte, adentrándose en el GC. En consecuencia, se formaron pequeñas cuencas del tipo *pull apart*, caracterizadas por ser cuencas sedimentarias subsidentes formadas por extensión cortical en corte continental situadas en un curva de distensión de una o varias fallas transformantes; entre ellas las relativamente recientes Cuencas de Wagner y Consag, interconectadas por fallas oblicuas de movimiento dextral cuya prolongación hacia el norte constituye el Sistema de Fallas de San Andrés (Figura 1; Lonsdale, 1989).

Entre las cuencas divergentes del norte del GC, la de Wagner y Consag son las más septentrionales y, con una profundidad de hasta ~215 m, son las más someras del sistema de cuencas del GC (Figura 1). Al norte, la Cuenca de Wagner limita con la región del Alto Golfo de California, mientras que al sur de la Cuenca de Consag se suceden las cuencas Delfín Superior e Inferior. La Falla de Wagner, de geometría lítrica con dirección NNW-SSE y echado hacia el W, conecta las cuencas de Wagner y Consag, las cuales son

de tipo *pull-apart* (Figura 1). Dicha falla deriva del sistema de fallas transformantes de Cerro Prieto y produce pliegues de propagación de falla en los sedimentos (Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007).

Los principales depocentros de sedimentos de la zona se localizan al sur de las cuencas de Wagner y Consag (Carriquiry *et al.*, 2001). En esta porción del GC, el espesor de sedimentos es mayor a 5 Km y la tasa de sedimentación es 3.3 mm/año (Pérez, 1980; Pérez-Cruz, 1982).

3. Metodología

El muestreo y la exploración batimétrica y geofísica de las cuencas de Consag y Wagner se realizaron durante la campaña "WAG-01", a bordo del B/O El Puma (UNAM), del 16 al 29 de mayo de 2007. Para adquirir los datos batimétricos se utilizaron dos ecosondas: una Simrad ES-60, a 18 KHz, y una Simrad EY-60, a 120 kHz. La batimetría de las cuencas Wagner y Consag se realizó por interpolación de 32 transectos que representan un recorrido de aproximadamente 505 Km. Un CTD *SeaBird* acoplado a una *rosette* fue utilizado para generar los perfiles de salinidad y temperatura, para el tratamiento de los datos se utilizaron las paqueterías proporcionadas por el fabricante del equipo a fin de obtener perfiles limpios. La toma de temperaturas superficiales fue realizada con un perfilador acústico de registro continuo. Se establecieron un total de 35 estaciones hidrográficas dentro de las cuencas, de las cuales 12 se ubicaron a modo de transecto, a lo largo de una línea de ~50 km de longitud, abarcando las cuencas de Wagner (estaciones

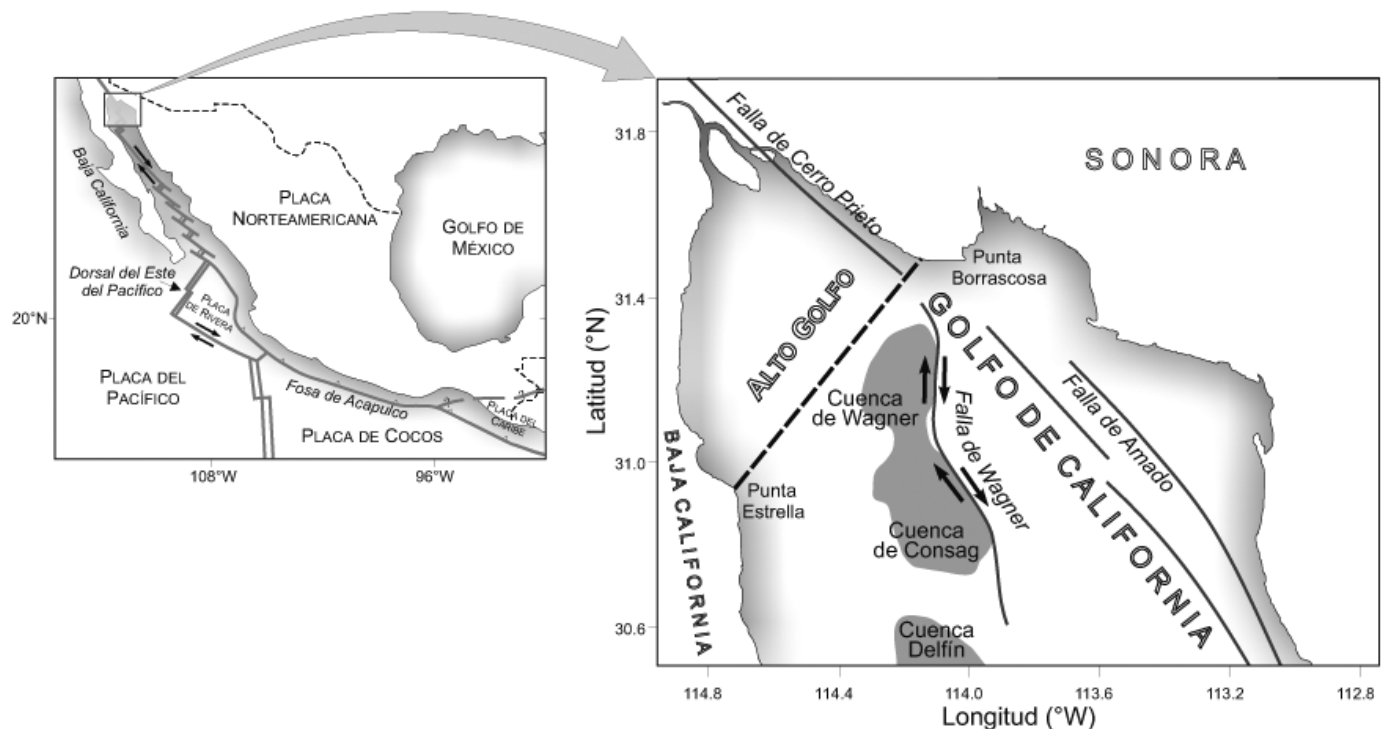


Figura 1. Localización del área de estudio. Mapa tectónico simplificado (a partir de Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007).

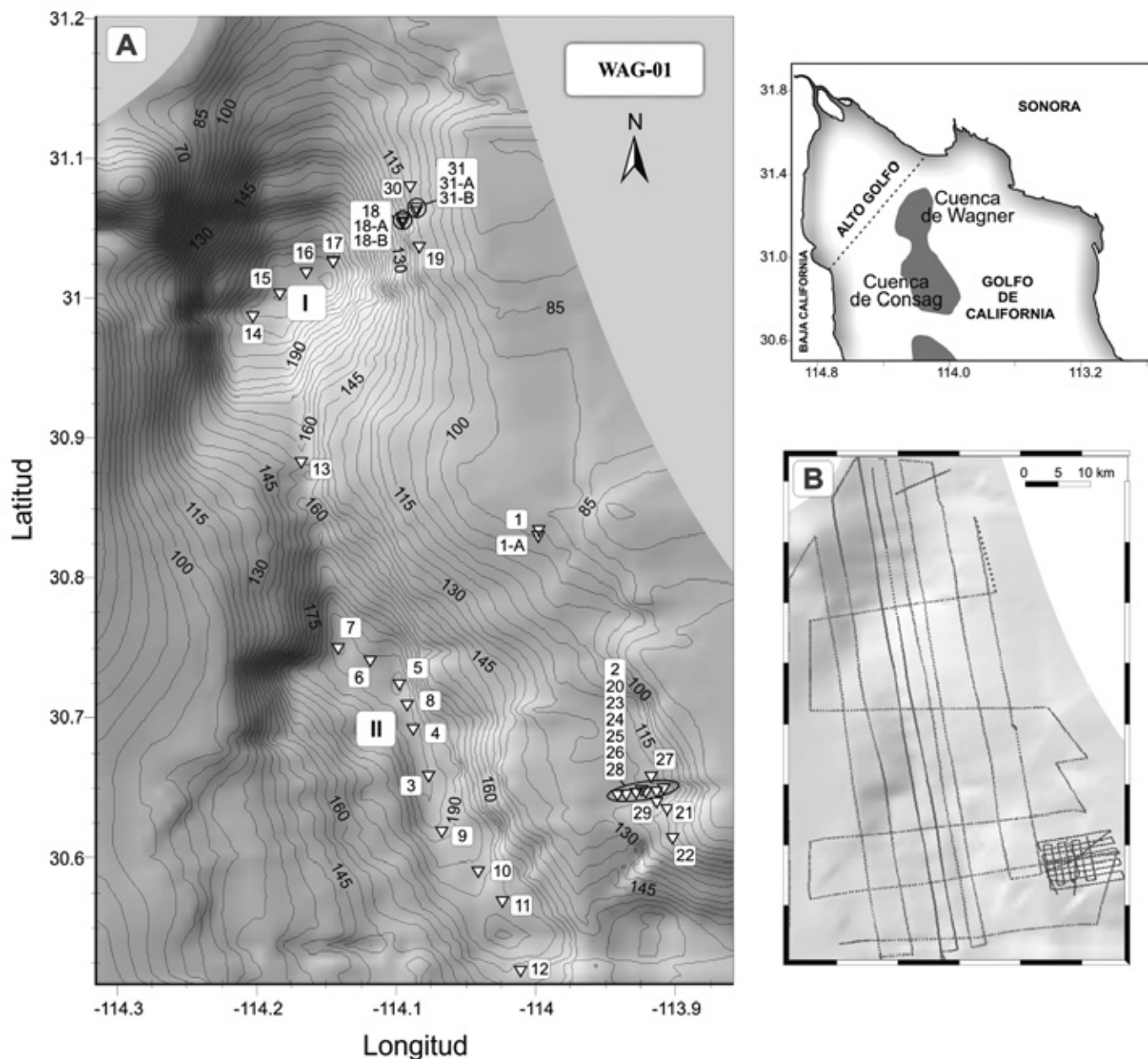


Figura 2. Batimetría de las cuencas de Wagner (I) y Consag (II), Norte del Golfo de California. Los números en el mapa (A) indican la posición de las estaciones muestreadas durante la campaña WAG-01. (B) Derrotero seguido para la obtención de los datos de batimetría.

WAG-13 y WAG-15) y Consag (estaciones WAG-7, WAG-6, WAG-5, WAG-8, WAG-4, WAG-3, WAG-9, WAG-10, WAG-11 y WAG-12), como se muestra en la Figura 2. El grupo de oceanografía física del CICESE ha realizado un buen número de cruceros en el Alto Golfo y Norte del Golfo de California. Sin embargo, el número de lances de CTD dentro de las cuencas de Wagner y Consag son relativamente pocos (17 lances, entre 1983 y 2002), respecto de la totalidad de lances en todo el Alto y Norte del Golfo de California (en el orden de varios centenares). De esta forma, los lances de CTD realizados en el presente estudio son relevantes, pues cubren ambas cuencas con un número de lances mayor a los realizados anteriormente (*i. e.*, Carrillo *et al.*, 2002).

4. Resultados

4.1. Batimetría

El mapa batimétrico de las cuencas Wagner y Consag se muestra en la Figura 2. En conjunto, estas dos cuencas se disponen en dirección NNW-SSE y ocupan un área de aproximadamente 75 Km de longitud por 35 Km de anchura. La Cuenca Wagner, la más septentrional, tiene una morfología aproximadamente elíptica, con el eje mayor orientado en dirección NNE. Con ~10 Km de longitud, el fondo de la cuenca es casi plano, si bien está suavemente inclinado al NE, donde alcanza una profundidad máxima reconocida de 216 mbnm.

Los márgenes de la cuenca no son uniformes; mientras que el septentrional y el meridional definen rampas extremadamente suaves ($\sim 0.4^\circ$ de pendiente), los márgenes occidental y oriental son más pronunciados ($\sim 0.9^\circ$ de pendiente) y definen sendos taludes de dirección aproximada N-S.

Al Sur, la Cuenca Consag está separada de la Cuenca Wagner por un collado submarino cuya profundidad mínima es 154 mbnm. La Cuenca de Consag es alargada y se orienta en dirección NNW-SSE. El fondo de la cuenca define un valle estrecho y alargado de 16×2.5 Km, casi plano, que alcanza 204 mbnm en su parte central. Los márgenes occidental y oriental son casi simétricos, con pendientes más pronunciadas ($\sim 0.8^\circ$ de pendiente) hacia el límite N de la cuenca. Hacia el sur, el fondo marino muestra una morfología suavemente escalonada, que se distingue por la sucesión de taludes suaves subparalelos (dirección NNW-SSE) surcados por zanjas erosivas (*furrows*; Figura 3).

4.2. Hidrografía

Los perfiles de temperatura y salinidad obtenidos en este estudio se presentan en la Figura 4. Los perfiles de temperatura muestran un decremento monótono con la profundidad, desde $22\text{--}23^\circ\text{C}$ en la superficie hasta 15°C en el fondo de las cuencas.

De las 35 estaciones hidrográficas establecidas sólo el 32% presentó una capa de mezcla que en algunos casos alcanzó hasta los 30 m de profundidad, para el resto de las estaciones destacó la ausencia de la capa de mezcla y la presencia de una termoclina conspicua desde la superficie hasta los 50 m de profundidad. Por debajo de los 50 m, la columna de agua presentó una temperatura homogénea (Figuras 4a,b). La salinidad varió entre 35.2 en el fondo y 35.8 en la superficie (Figuras 4c,d). La salinidad superficial varió entre 35.4 y 35.8. El perfil de salinidad describe una disminución de la salinidad de 0 a 100 m de profundidad, volviendo a aumentar conforme la profundidad y alcanzando valores de 35.44 cerca del fondo marino (Figuras 4c,d).

La temperatura superficial del océano varió entre 20.0 y 22.6°C , con un promedio de 21.9°C . El valor mínimo en la temperatura superficial correspondió a la estación WAG-5 y el máximo a la estación WAG-15.

Los transectos de temperatura y salinidad para las cuencas se muestran en la Figura 5. La distribución de la temperatura define una clara estratificación para todo el período de muestreo (Figura 5a). Por otro lado, el transecto de salinidad sugiere la introducción de un lengua de agua de menor salinidad de 50 a 100 m (Figura 5b) que pudiera estar relacionada con la formación del Agua del Golfo de California, la cual se ha detectado en esta región (Figura 6).

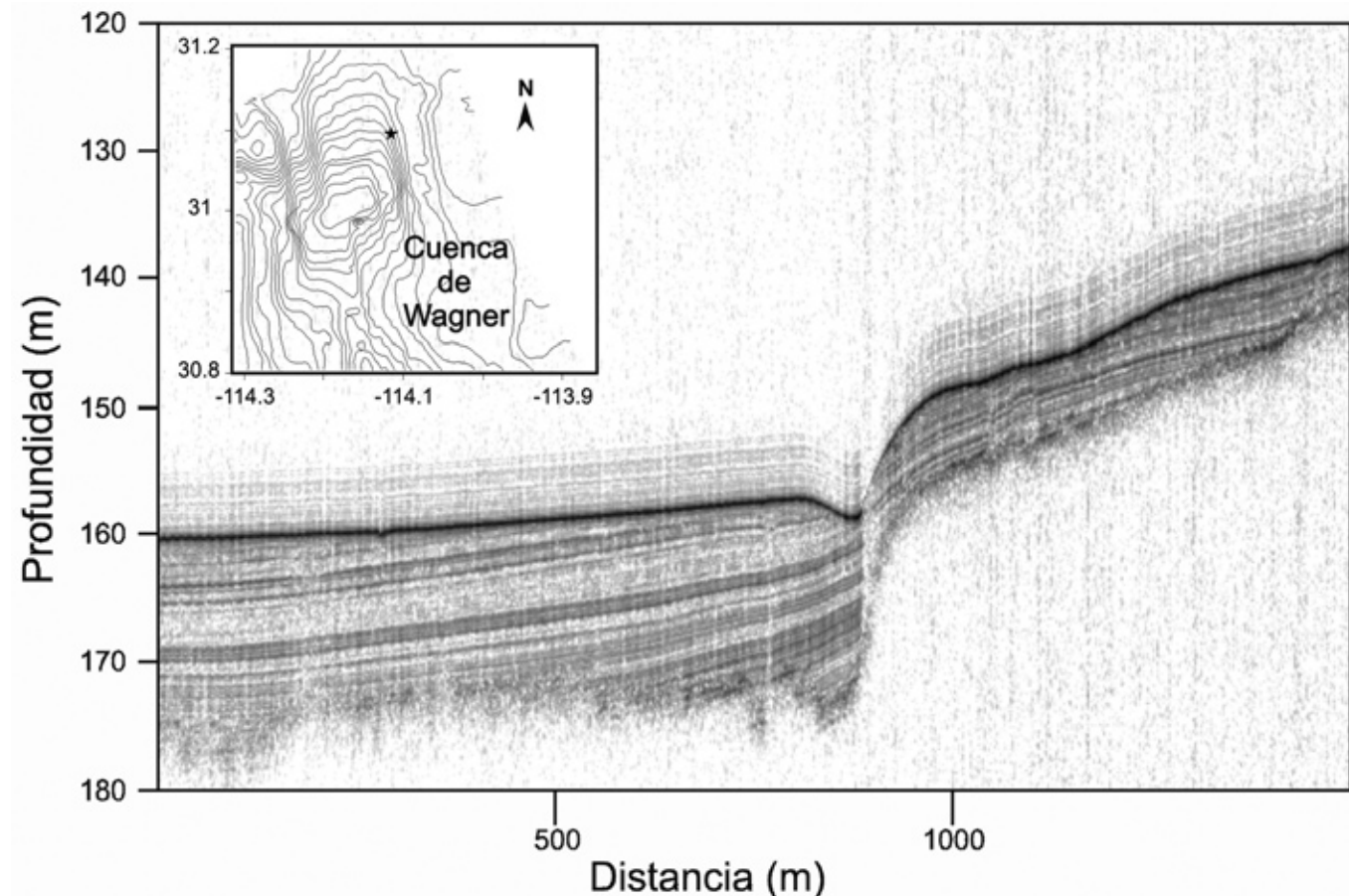


Figura 3. Imagen de furrows observada durante la recolección de datos para la batimetría, delimitando la sucesión de taludes suaves subparalelos.

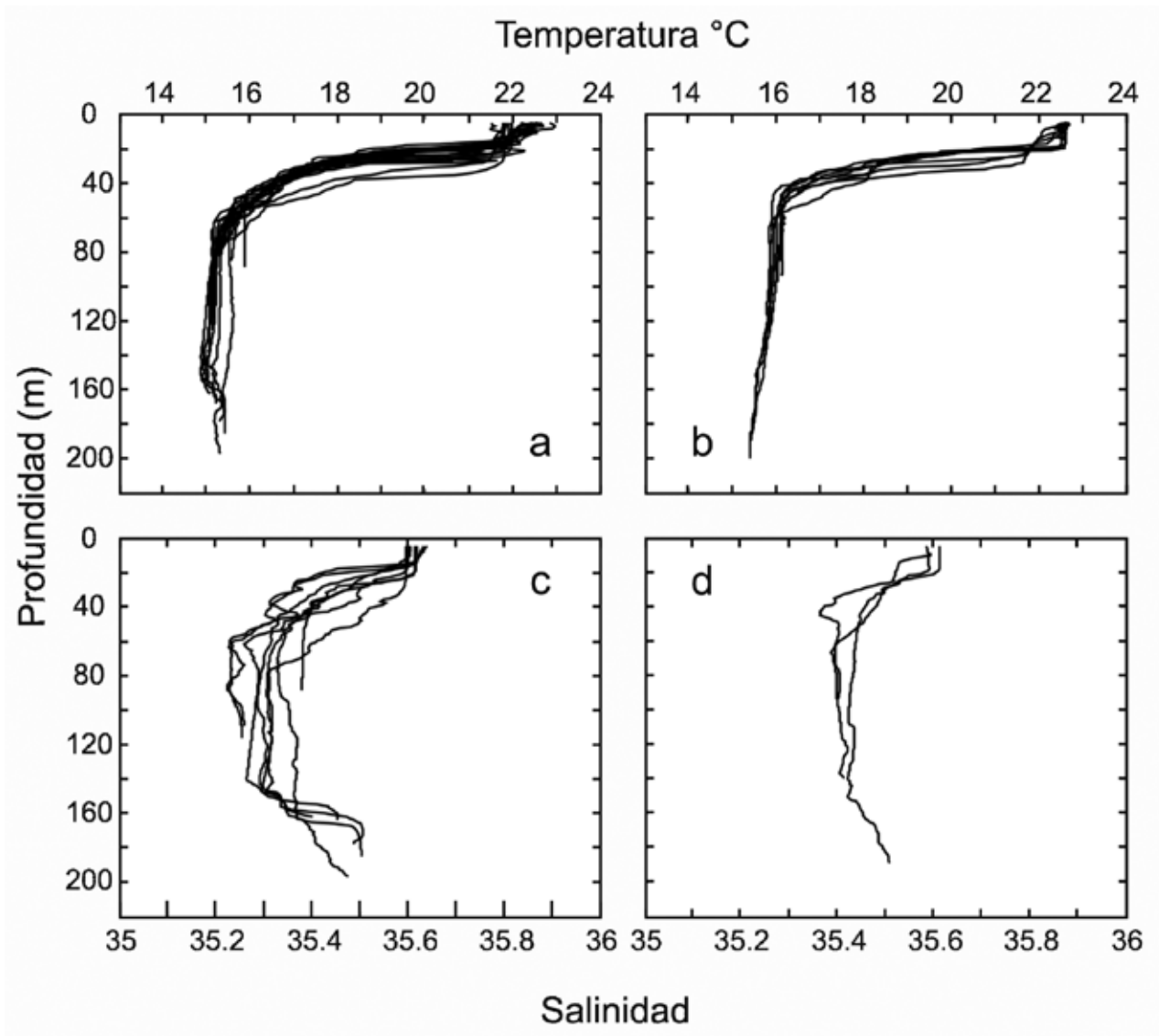


Figura 4. Perfiles de temperatura y salinidad para las cuencas de Wagner (a,c) y Consag (b y d), obtenidos del 20-25 de mayo de 2007.

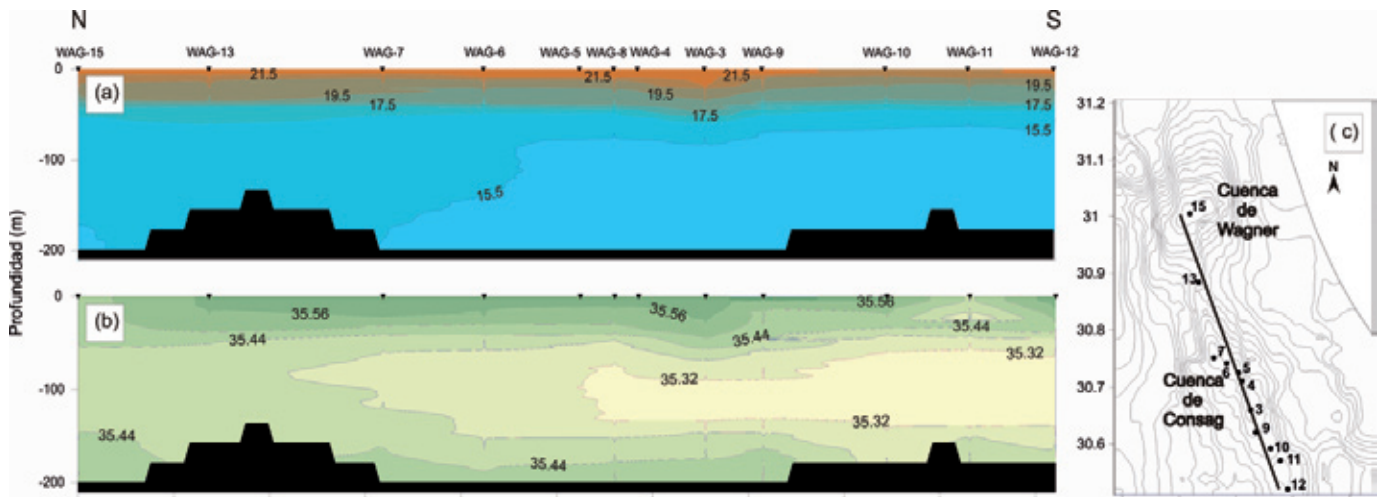


Figura 5. Transectos de (a) temperatura y (b) salinidad para las cuencas de Wagner y Consag (20-25 de mayo de 2007). En ambas figuras se muestra en forma esquemática la batimetría de la zona. La figura (c) indica la ubicación del transecto.

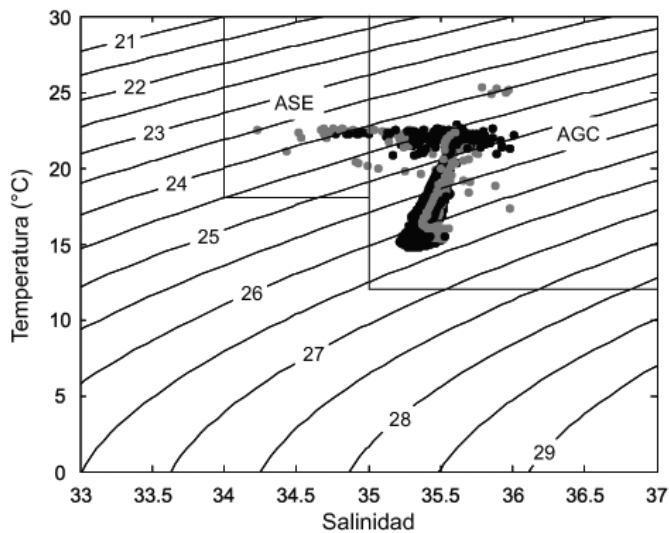


Figura 6. Diagrama T-S (20-25 de mayo de 2007). ASE = Agua Superficial Ecuatorial, AGC = Agua del Golfo de California. Los puntos oscuros corresponden a la Cuenca de Consag, y los puntos grises a la Cuenca de Wagner.

5. Discusión y conclusiones

5.1. Batimetría y contexto tectónico

La geometría y la batimetría de las cuencas de Wagner y Consag, que presentan márgenes asimétricos y una orientación ligeramente oblicua entre sí, sugieren una subsidencia ligada a una extensión *pull-apart*. Así, una distensión local (*releasing bend*) en un contexto dominado por fallas de dirección NNW-SSE habría originado ambas cuencas, en concordancia con las condiciones tectónicas recientes en la región (Lonsdale, 1989). Los taludes ligeramente pronunciados que definen el borde oriental de ambas cuencas pueden indicar el trazado curvilíneo de la Falla de Wagner, correspondiente a una geometría lítrica con dirección NNW y echado hacia el W (Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007).

5.2. Hidrografía

Los valores de temperatura y salinidad de la columna de agua son similares a los reportados por Alvarez-Borrego *et al.* (1975), Bray (1988), Lavín *et al.* (1995) y Lavín y Sánchez (1999). Estos valores son consistentes con las características descritas para la masa de Agua del Golfo de California (AGC), la cual originalmente es Agua Superficial Ecuatorial (ASE) concentrada en la superficie por evaporación (Lavín *et al.*, 1995). El AGC se distingue por altas salinidades >35.0 y por una temperatura promedio por debajo de los 50 m de $\sim 15^{\circ}\text{C}$ (Figuras 5 y 6; Lavín *et al.*, 1995). El AGC es una de las dos masas de agua superficiales reportadas para el Golfo de California (junto con el ASE) y sus límites alcanzan la Cuenca de Carmen (Delgadillo-Hinojosa *et al.*, 2006). Los fuertes efectos de evaporación y enfriamiento en la parte septentrional del Norte del Golfo de California son la principal causa de

formación de la masa de agua reportada como AGC y su distribución a lo largo del Golfo está determinada por mareas, viento y geostrofia (densidad), principalmente (Lavín *et al.*, 1998).

La estratificación observada en la temperatura y salinidad en ambos transectos de muestreo, confirma que la parte norte de la Cuenca Wagner es el límite hidrográfico natural entre las regiones del Alto Golfo y el Norte del Golfo de California, en concordancia con las observaciones de Lavín *et al.* (1998). La columna de agua de la región del Alto Golfo de California se caracteriza por estar bien mezclada debido a efectos de la marea, principalmente (Lavín *et al.*, 1998; Carriquiry *et al.*, 2001; Marinone, 2003). Conforme se aleja hacia el sur, ya en la región de la Cuenca Wagner, se estratifica notablemente debido a la batimetría (profundidad) y posiblemente a otros procesos físicos que separan agua bien mezclada (*e. g.*, mezcla por marea) de agua estratificada (*e. g.*, balance

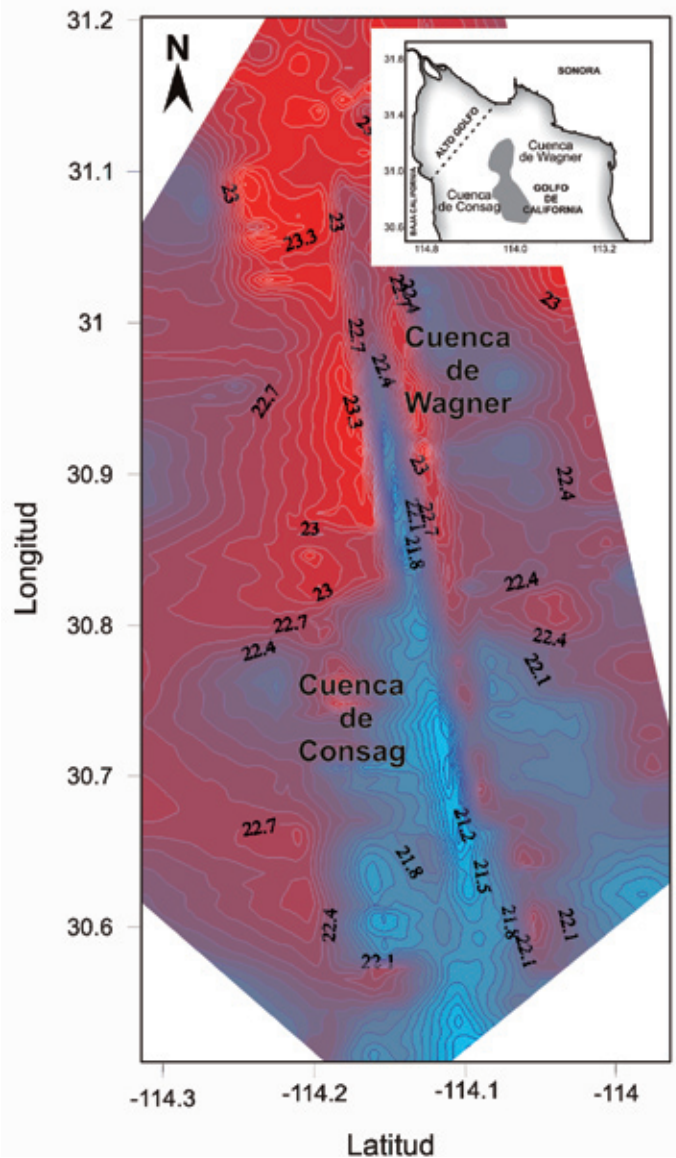


Figura 7. Distribución de temperatura superficial en las cuencas de Wagner y Consag (20-25 de mayo de 2007).

precipitación- evaporación) en regiones del Norte del Golfo de California (Argote *et al.*, 1995; Lavín *et al.*, 1997). De hecho, las grandes diferencias geomorfológicas de la región centro y sur del Golfo (Alvarez-Borrego *et al.*, 1975) influyen en la distribución de las masas de agua que ingresan al Golfo. En la distribución de temperatura superficial (Figura 7), se observa claramente el aumento de los valores conforme avanzan hacia el Norte del Golfo de California. Mientras que, la distribución de las isotermas a profundidad (Figura 4a) define una región fría de geometría angosta y dirección NNW, la cual sugiere que la estratificación de la columna de agua (temperatura y salinidad) está condicionada por la morfología de las cuencas, donde la ausencia de umbrales evita los procesos de intensa mezcla como los que ocurren en la región sur de las grandes islas, en la frontera del Norte del Golfo de California y en la parte central del Golfo (Alvarez-Borrego *et al.*, 1975; Argote *et al.*, 1995; Marinone y Lavin, 2003).

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por los proyectos IN-106907 (PAPIIT, UNAM) y “Desalación de agua de mar con energías renovables” (IMPULSA IV, UNAM). Agradecemos a la Comisión Académica de Buques Oceanográficos (CABO, UNAM) el haber respaldado la campaña oceanográfica “WAG-01”. Deseamos expresar nuestro agradecimiento a la tripulación del B/O El Puma, en especial a los capitanes Héctor U. Gutiérrez Granja y Adrián Cantú Alvarado. Expresamos nuestro agradecimiento también, por su apoyo durante la campaña, a Evgueni Shumilin, Abigail López Sánchez, Elisabet Birosta Massoni, Catalina Ángeles, Alejandro Estradas, Griselda Rodríguez Figueroa, Juan A. Romero Guadarrama, Lilia I. Sánchez Vargas, Carlos Gómez de Orozco, B. Estela López Ortiz, Erika Pineda y Laura Rodríguez Juárez.

Referencias bibliográficas

- Alvarez, L. G., Jones, S. E., 2004. Short-term observations of suspended particulate matter in a macro-tidal inverse estuary: The Upper Gulf of California: *Journal of Coastal Research*, 20, 645–654.
- Alvarez-Borrego, S., Flores-Báez, B. P., Galindo-Bect, L. A., 1975. Hidrología del Alto Golfo de California II. Condiciones durante Invierno, Primavera y Verano: *Ciencias Marinas*, 2, 21–36.
- Alvarez-Borrego, S., Schwartzlose, R. A., 1979. Masas de agua del Golfo de California: *Ciencias Marinas*, 6, 43–61.
- Alvarez-Borrego, S., Alberto-Rivera, J. A., Gaxiola-Castro, G., Acosta-Ruiz, M. J., Schwartzlose, R. A. 1978. Nutrientes en el Golfo de California: *Ciencias Marinas*, 5, 53–71.
- Alvarez-Borrego, S., Gaxiola-Castro, G., 1988. Photosynthetic parameters of northern Gulf of California phytoplankton: *Continental Shelf Research*, 8, 37–47.
- Álvarez-Borrego, S., Lara-Lara, J. R., 1991. The Physical Environment and Primary Productivity of the Gulf of California, en Dauphin, J. P., Simoneit, B. R. (eds.), *The Gulf and Peninsular Province of the Californias: Gulf and Peninsular Province of the Californias AAPG Memoir*, 47, 555–567.
- Angelier, J., Colletta, B., Chorowicz, J., Ortlieb, L., Rangin, C., 1981. Fault tectonics of the Baja California Peninsula and the opening of the Sea of Cortez, Mexico: *Journal of Structural Geology*, 3, 347–357.
- Aragón-Arreola, M., Martín-Barajas, A., 2007. Westward migration of extension in the northern Gulf of California, Mexico: *Geology*, 35, 571–574.
- Argote, M. L., Amador, A., Lavín, M. F., Hunter, J. R., 1995. Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California: *Journal of Geophysical Research*, 100, 16103–16118.
- Bray, N. A., 1988. Water Mass Formation in the Gulf of California: *Journal of Geophysical Research*, 93, 9223–9240.
- Carrillo, L., Lavín, M. F., Palacios-Hernández, E., 2002. Seasonal Evolution of the Geostrophic Circulation in the Northern Gulf of California: *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 54, 157–173.
- Carriquiry, J. D., Sánchez, A., 1999. Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss: *Marine Geology*, 158, 125–145.
- Carriquiry, J. D., Sánchez, A., Camacho-Ibar, V. F., 2001. Sedimentation in the northern Gulf of California after cessation of the Colorado River discharge: *Sedimentary Geology*, 144, 37–62.
- Daesslé, L. W., Camacho-Ibar, V. F., Carriquiry, J. D., Ortiz-Hernández, M. C., 2004. The geochemistry and sources of metals and phosphorus in the recent sediments from the Northern Gulf of California: *Continental Shelf Research*, 24, 2093–2106.
- Delgadillo-Hinojosa, F., Segovia-Zavala, J. A., Huerta-Díaz, M. A., Atilano-Silva, H., 2006. Influence of geochemical and physical processes on the vertical distribution of manganese in Gulf of California waters: Deep-Sea Research Part I: *Oceanographic Research Papers*, 53, 1301–1319.
- Lavín, M. F., Gaxiola-Castro, G., Robles, J. M., Richter, K., 1995. Winter water masses and nutrients in the northern Gulf of California: *Journal of Geophysical Research*, 100, 8587–8605.
- Lavín, M. F., Durazo, R., Palacios, E., Argote, M. L., Carrillo, L., 1997. Lagrangian observations of the circulation in the northern Gulf of California: *Journal of Physical Oceanography*, 27, 2298–2305.
- Lavín, M. F., Godínez, V. M., Álvarez, G. L., 1998. Inverse-estuarine Features of Upper Gulf of California: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47, 769–795.
- Lavín, M. F., Organista, S. 1988. Surface heat flux in the Northern Gulf of California, *Journal of Geophysical Research*, 93, 14033–14038.
- Lavín, M. F., Sánchez, S., 1999. On how the Colorado river affected the hydrography of the upper Gulf of California: *Continental Shelf Research*, 19, 1545–1560.

- Lonsdale, P., 1989. Geology and tectonic history of the Gulf of California, in Winterer, E. L., Hussong, D. M., Decker, R. W. (eds.), *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii*: Boulder, Colorado, EUA, Geological Society of America, 499–521.
- Marinone, S. G., 2003. A three-dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California: *Journal of Geophysical Research*, 108, 1–27.
- Marinone, S. G., Lavín, M. F., 2003. Residual flux and mixing in the large islands region of the central gulf of California, in Velasco-Fuentes, O. U., *et al.* (eds.), *Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics*: Países Bajos, Kluwer Academic Publisher, 213–236.
- Martín-Barajas, A., Delgado-Argote, L. A., 1995. *Monografía Geológico-Minera de Baja California*: Secretaría de Desarrollo del Gobierno del Estado de Baja California, Mexicali, Baja California, México, 112 p.
- Michaud, F., Calmus, T., Sosson, M., Royer, J. Y., Bourgois, J., Chabert, A., Bigot-Cormier, F., Bandy, B., Mortera-Gutiérrez, C., Dymont, J., 2005. La zona de falla Tosco-Abrejos: un sistema lateral derecho activo entre la placa Pacífico y la península de Baja California: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57, 53–63.
- Michaud, F., Calmus, T., Royer, J. Y., Sosson, M., Bandy, B., Mortera-Gutiérrez, C., Dymont, J., Bigot-Cormier, F., Chabert, A., Bourgois, J., 2007. Right-lateral active faulting between southern Baja California and the Pacific plate: The Tosco-Abrejos fault, in Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, Á. F. (eds.), *Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México*: Geological Society of America Special Paper, 422, 287–300.
- Parés-Sierra, A., Mascarenhas, A., Marinone, S. G., Castro, R., 2003. Temporal and spatial variation of the surface winds in the Gulf of California: *Geophysical Research Letters*, 30, 1–4.
- Pegau, W. S., Boss, E., Martínez, A., 2002. Ocean color observations of eddies during the summer in the Gulf of California: *Geophysical Research Letters*, 29, 1295–1297.
- Pérez, G. A., 1980. Exploración petrolera de la porción noroccidental del Golfo de California: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración*, 21, 81–128.
- Pérez-Cruz, G., 1982. Algunos resultados de la investigación geológico-geofísica en la porción noroccidental del Golfo de California: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 34, 71–77.
- Shumilin, E. N., Carriquiry, J. D., Camacho-Ibar, V. F., Sapozhnikov, D., Kalmykov, S., Sánchez, A., Aguíñiga-García, S., Sapozhnikov, Y. A., 2002. Spatial and vertical distributions of elements in sediments of the Colorado River delta and Upper Gulf of California: *Marine Chemistry*, 79, 113–131.
- Spencer, J. E., Normark, W. R., 1989. Neogene plate-tectonic evolution of the Baja California Sur continental margin and the southern Gulf of California, Mexico, in Winterer, E. L., Hussong, D. M., Decker, R. W. (eds.), *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii*: Boulder, Colorado, EUA, Geological Society of America, 489–497.
- Stock, J. M., Hodges, K. V., 1989. Pre-Pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific Plate: *Tectonics*, 8, 99–115.

Manuscrito recibido: 23/06/2008

Manuscrito corregido recibido: 22/09/2008

Manuscrito aceptado: 08/10/2008