

GEOMETRÍA DE LA CUENCA WAGNER, GOLFO DE CALIFORNIA, A PARTIR DE SÍSMICA DE REFLEXIÓN

César Aguilar Campos, Mario González Escobar y J. Arturo Martín-Barajas

CICESE-Ciencias de la Tierra Km 107 Carr. Tijuana-Ensenada, C.P. 22860

Apdo. Postal 2732, Ensenada, B.C. México.

RESUMEN

Datos sísmicos de reflexión 2D multicanal, fueron procesados e interpretados con la finalidad de estudiar la geometría de la cuenca Wagner, localizada en el norte del Golfo de California. Los datos propiedad de Petróleos Mexicanos se colectaron entre 1979 – 1980. Se interpretaron las fallas Consag, Wagner y Cerro Prieto. La falla Consag (nombre informal), la cual es reportada por primera vez, limita la cuenca Wagner al oeste, mientras que al este y al nor-noreste está limitada por las fallas Wagner y Cerro Prieto, respectivamente. La falla Wagner intersecta con la falla Cerro Prieto en un ángulo de 130° , por lo que el depocentro dobla al NW adyacente a la zona de falla de Cerro Prieto, mientras que el segmento más al norte de la falla Consag, se flexiona 25° al NE e intersecta la zona de falla de Cerro Prieto en un ángulo de 110° . Asociada a esta estructura se observa la mayor subsidencia de la cuenca, que es de hasta ~ 300 m y presenta un salto de falla de ~ 400 m en el extremo norte. Considerando que tanto la fallas Consag como la falla Wagner intersectan oblicuamente a la falla Cerro Prieto, es posible que aquellas, que son principalmente normales, tengan componente lateral, que es lo que genera un movimiento vertical oblicuo, en el cual domina el movimiento vertical sobre el horizontal. Si estas fallas fueran perpendiculares a Cerro Prieto la extensión sería completa, como es el caso de la cuenca Delfín, ubicada al SW del área de estudio, en donde las fallas normales son perpendiculares a la falla transforme Ballenas. El área y perímetro de la cuenca es de ~ 1330 km² y 158 km., respectivamente.

Palabras clave: cuenca Wagner, Golfo de California, sísmica de reflexión 2D

INTRODUCCIÓN

La cuenca Wagner se ubica en un segmento de límite de placas tectónicas, localizado en la parte más al norte del Golfo de California (Fig. 1). Dicha cuenca se considera un incipiente centro de dispersión (Persaud et al., 2003); se ha desarrollado entre dos fallas mayores, la falla Cerro Prieto, que es transforme lateral derecha con componente normal y limita al norte-noreste a la cuenca y la falla Wagner, que es la frontera este-sureste de dicha cuenca. Al sur, la cuenca Wagner se conecta con la cuenca Consag; la frontera entre ambas no está bien definida (Persaud et al., 2003), mientras que al oeste se ignoran por completo sus características geométricas. A diferencia de la boca del golfo, donde la formación de corteza oceánica inició alrededor de los 3.5 Ma (Persaud, 2003), el norte

del golfo, donde se localiza la cuenca Wagner, este tipo de corteza no se ha identificado ya que no presenta anomalías magnéticas simétricas; además, contiene zonas anchas de deformación difusa semejantes a las que se presentan en la región de los valles de Mexicali e Imperial. El conocimiento actual acerca de la estructura geológica de la cuenca proviene de estudios de sismología de terremotos, de sísmica de reflexión y de mapas magnéticos y gravimétricos (Phillips, 1964; Lomnitz et al., 1970; Nelly y Bischoff, 1973; Pérez-Cruz, 1982; Persaud et al., 2003; Aragón-Arreola, 2006; Martín-Barajas et al., 2006; García-Abdeslem, 2006; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007, entre otros), sin embargo, la alta razón de sedimentación y la poca y baja magnitud de la actividad sísmica

(Castro et al., 2007), impiden ubicar estructuras geológicas en gran parte de esta región. De 1978 a 1980, como parte del Prospecto San Felipe-Tiburón (Pérez-Cruz, 1982), Petróleos Mexicanos (PEMEX) colectó datos de sísmica de reflexión en la región de la Tiburón (Pérez-Cruz, 1982), Petróleos Mexicanos (PEMEX) colectó datos de sísmica de reflexión en la región de la cuenca. Por medio del procesado e interpretación de estos datos, se configura su geometría, haciendo énfasis en su sector oeste, hasta ahora desconocido.

MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICA REGIONAL

El Golfo de California en general es un sistema de rift oceánico extensional oblicuo; sin embargo, en la región norte se observa una transición de un ambiente tectónico oceánico a uno continental en el límite entre las placas del Pacífico y de Norteamérica (Nagy y Stock, 2000). El Golfo de California varía morfológica y estructuralmente de norte a sur; en él se localizan cuencas extensionales conectadas por fallas transformes de rumbo lateral derecho (Figura 1).

Las cuencas son más someras en el norte, mientras que las del centro y sur son más profundas y se les considera centros de dispersión nacientes (Curry et al., 1982; Lonsdale, 1989; Persaud et al., 2003). Estas cuencas son producidas por un sistema extensional oblicuo en el cual la deformación se acomoda en fallas transformes en el sur y en fallas oblicuas en el norte (Fenby y Gastil, 1991; Nagy y Stock, 2000).

Al sur del golfo y en su parte central, la frontera entre la placa Pacífico-Norteamérica muestra zonas de deformación bien delimitadas o definidas, por ejemplo: la cuenca de Guaymas y la zona de falla del Canal de Ballenas (Figura 1). En el norte, en contraste, existen zonas anchas de deformación difusa semejantes a las que hay en el continente, como en la región de la Provincia del Salton. Debido a la alta razón de sedimentación y la falta de evidencia de formación del piso oceánico, se considera que la corteza del norte del Golfo puede ser similar a una corteza transicional (Persaud, 2003).

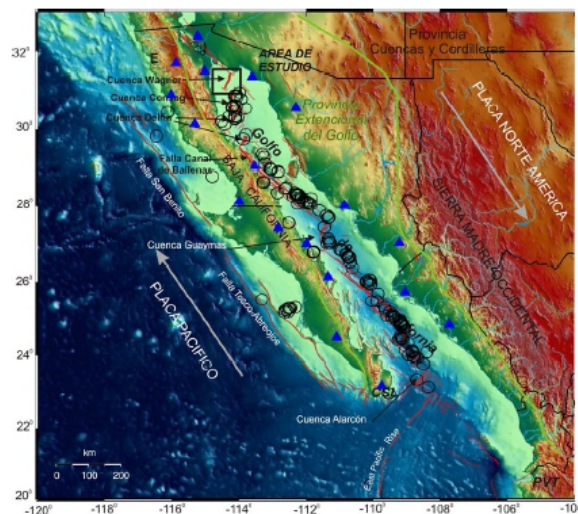


Figura 1. Mapa estructural del Golfo de California. Se muestra el área de estudio con rectángulo negro y el sistema de fallas con líneas rojas en la Provincia Extensional del Golfo y sureste de la Provincia de Cuencas y Cordilleras (Basin and Range) y áreas adyacentes. Las principales estructuras en el Norte del golfo son las cuencas Wagner y Consag; FCP = Falla Cerro Prieto. E = Ensenada, CSL = Cabo San Lucas, PVT = Puerto Vallarta. Los triángulos azules son las estaciones de la red sísmica NARS ubicadas alrededor del golfo y los círculos en negro son los eventos registrados por dicha red del 2004 al 2006 (Castro et al., 2007).

La cuenca Wagner es la depresión más septentrional del Golfo de California, tiene forma alargada y se orienta N-S (Figura 1). Se conecta al sur con la cuenca Consag y su geometría no esta bien definida (Persaud et al., 2003). Fenby y Gastil (1991), infirieron, con exploración sísmica y anomalías magnéticas, que es un centro de dispersión incipiente limitado al norte por la falla Cerro Prieto y al sur por un sistema de fallas de rumbo a lo largo de la cuenca Consag (Figura 1). En el borde occidental de la cuenca aflora un intrusivo dacítico conocido como Roca Consag, que probablemente es producto de actividad volcánica menor a 1 Ma (A. Martín-Barajas y M. López, comunicación personal, 2008). Sin embargo, en la cuenca no hay indicios de actividad volcánica reciente, pero sí la presencia de baja actividad sísmica y alto flujo de calor (Frez y González, 1991; Castro et al., 2007). En este sector occidental, exceptuando Roca Consag, se desconoce la o las estructuras que delimiten su frontera.

Hasta la década de los setenta, la interpretación más detallada de la tectónica del norte del Golfo

se logró a partir de datos obtenidos de sismica de reflexión monocanal colectados en 1970 (Henyey y Bischoff, 1973). A partir de estos datos se elaboró un mapa de fallas, marcado por limitaciones debidas a la gran cantidad de múltiples reflexiones generadas por las estructuras y las reverberaciones derivadas de la señal de la fuente. Anteriormente, Phillips (1964), había estimado que la parte superficial de esta región está formada por tres capas en los primeros 25 km, mientras que Couch et al. (1991), estimaron un espesor de corteza de aproximadamente 13 km para la zona norte.

Pérez-Cruz (1982), definió en lo general las cuencas Wagner y Consag, localizadas en el norte del Golfo de California. Hurtado-Artunduaga (2002), analizando líneas sísmicas en la región, reportó que el margen este-sureste de la cuenca Wagner está delimitado por una caída de basamento de cerca de 3 km; probablemente esta estructura es la prolongación hacia el sur de la falla Cerro Prieto. El mismo autor menciona que se desconoce la conexión entre la cuenca Wagner y la zona de falla de Cerro Prieto y propuso que ésta se efectúa mediante una zona

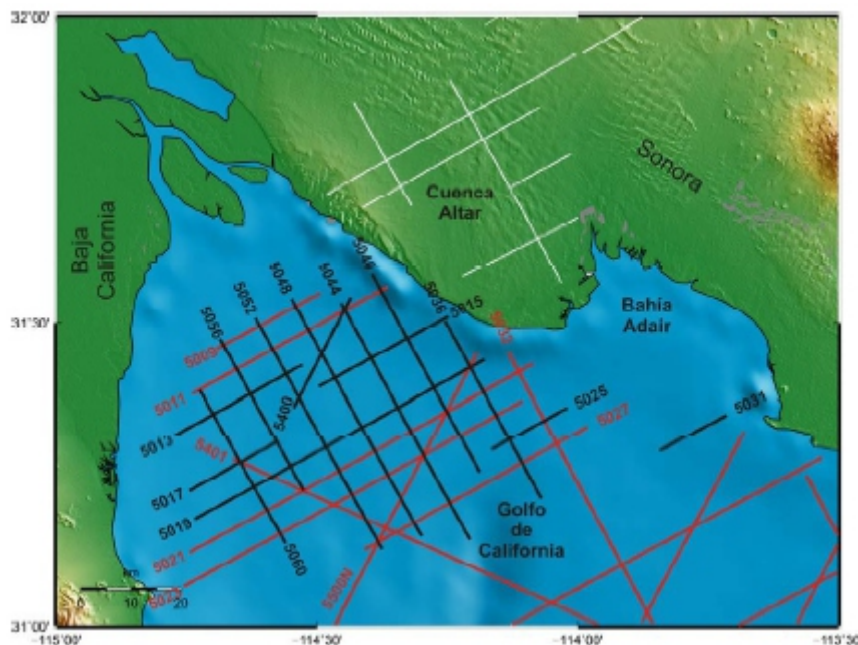


Figura 2. Las líneas negras, representan la sismica procesada en el presente trabajo; en rojo, las líneas interpretadas por González-Escobar et al. (2006). Todas las líneas fueron utilizadas para la interpretación. En Sonora, las líneas localizadas en la Cuenca Altar, fueron tomadas de Pérez-Tinajero (2007). Los números a los lados de las líneas indican su identificación.

de transferencia, constituida por un arreglo de fallas distribuidas en escalón que transfiere el movimiento entre la cuenca Wagner y la zona de falla Cerro Prieto al norte. Persaud et al. (2003), a partir de la interpretación de datos sísmicos de alta resolución colectados en 1999, con una resolución de metros hasta 2 km por debajo del fondo marino, reportaron estructuras en el sector sur de la cuenca Wagner y en la cuenca Consag (figuras 1 y 2), así como algunas características de los epicentros en dichas cuencas; sin embargo,

los datos no permiten ver las estructuras profundas (mayores a 2 km). En el trabajo de Persaud et al. (2003) no se cubrió la parte norte de la Cuenca Wagner. Aragón-Arreola (2006) realizó una primera interpretación a partir de datos sísmicos propiedad de PEMEX. En esa interpretación se puede observar que no se cubrió la parte más al norte del Golfo, debido posiblemente por la poca cobertura de las líneas sísmicas de que se disponía.

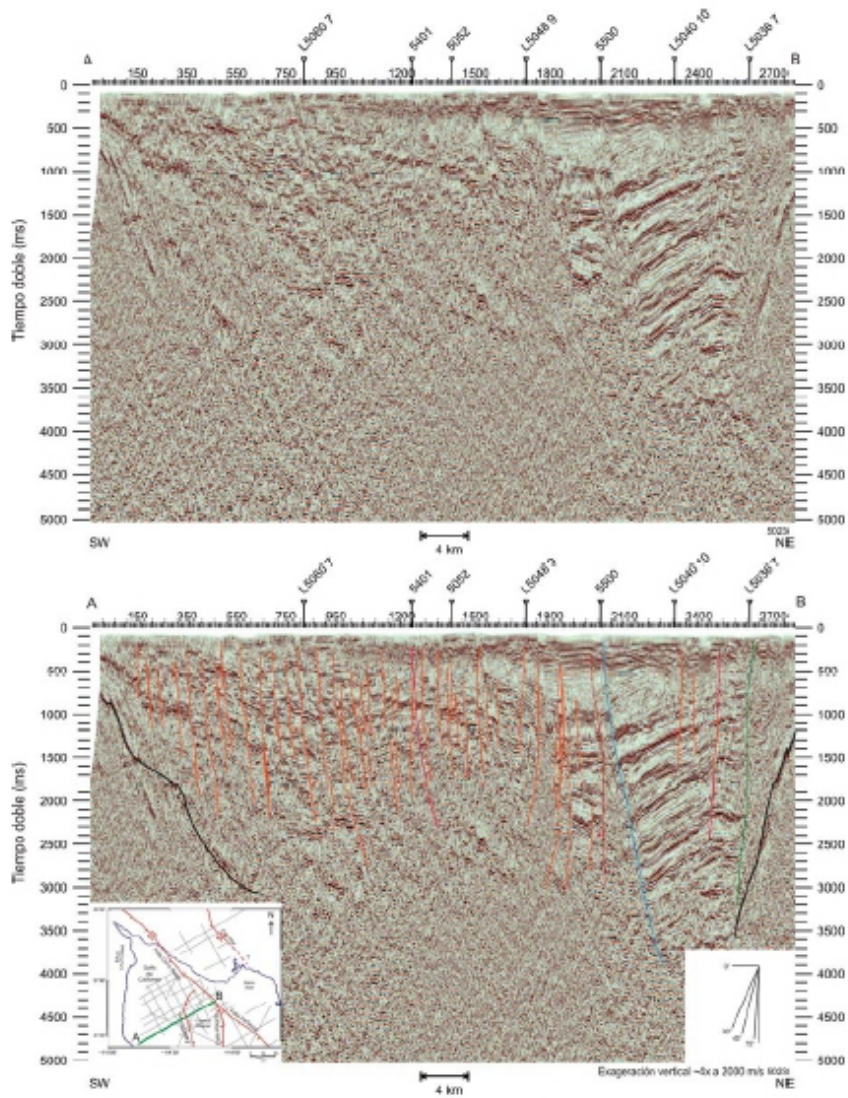


Figura 3. Sección 5023 localizada en el extremo sur del área de estudio. Se observa claramente la cuenca Wagner limitada por fallas (sector derecho de la figura). Es característico que dentro de la cuenca se tiene un paquete de reflectores de 5 km de largo por 5 km de espesor sin que muestren deformación importante; la mayor subsidencia de la cuenca se localiza al oeste. Las líneas rojas son fallas. El perfil A-B de la figura en el recuadro inferior izquierdo representa la sección sísmica y el recuadro de la derecha indica el ángulo de buzamiento.

DATOS Y ANÁLISIS

Los datos sísmicos de reflexión para el presente trabajo fueron obtenidos por PEMEX entre los años 1978 y 1980 como parte del Prospecto San Felipe–Tiburón (Pérez-Cruz, 1982). La información sísmica es 2D, marina multicanal que se obtuvo usando un arreglo de 48 canales espaciados cada 50 m, utilizando como fuente sísmica cañones de aire (161 pulgadas cúbicas). El tiempo de grabación fue de 6.144 s y el intervalo de muestreo fue de 2 ms, con una redundancia de 4800 %. El procesamiento de los datos fue generalmente bajo los estándares de la industria petrolera. La secuencia de proceso de los datos de reflexión fue la siguiente: edición de trazas, filtrado, divergencia esférica, deconvolución, análisis de velocidad basado en coeficientes de semblanza, corrección por normal moveout (NMO), apilamiento, corrección por divergencia esférica, filtrado variante en tiempo y migración (Yilmaz, 1987). Para la interpretación de los datos se usaron las técnicas descritas por Badley (1985). Tanto para el proceso como para la interpretación se utilizaron los programas ProMaxtm y LandMarktm de Halliburtontm. Se procesaron e interpretaron

14 líneas sísmicas, las cuales suman ~490 km lineales (Aguilar, 2007). Estas tienen una orientación S60°W y N30°W, excepto una de ellas que es oblicua a las anteriores (Figura 2).

INTERPRETACIÓN

Uno de los rasgos estructurales más notorios de la información procesada es la abundancia de fallas. Muchas de éstas se presentan en zonas no trabajadas con anterioridad y, por lo mismo, no se conoce cuál es su papel tectónico en el marco regional; por ejemplo, la región al oeste del área de estudio (Figura 2). Estas estructuras se presentan con cierto arreglo subparalelo de fallas normales con ángulos de echado mayor a 40° y con un promedio de una falla por kilómetro. Las fallas son normales y casi todas buzcan hacia el NE. En la Figura 3 se observa que la densidad de las fallas es mayor que la mostrada en las figuras 4 y 5. En general, muchas de éstas no se manifiestan superficialmente en el piso oceánico por la cobertura sedimentaria. Se observa que, salvo las estructuras más prominentes, la mayoría de las fallas no perturban los estratos más profundos, y a

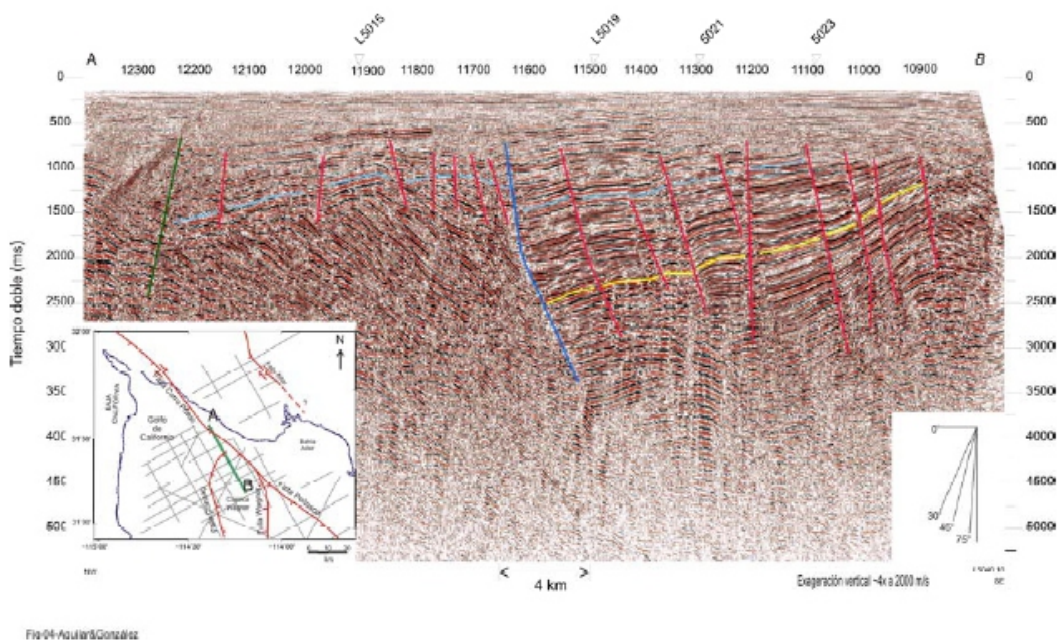


Figura 4. Perfil que corta la cuenca Wagner de norte a sur (5040). Se observa claramente el límite norte de la cuenca que corresponde a la falla Consag. El color azul marino representa un horizonte sísmico de referencia.

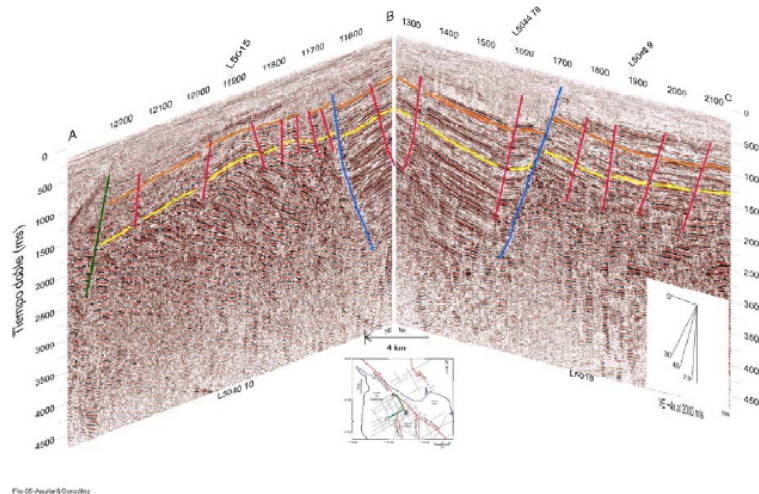


Figura 5. Secciones sísmicas en zig-zag. Los números en el eje horizontal se refiere a los puntos de tiro. En la figura inferior se muestra la localización y el trazo de las secciones. El recuadro de la parte inferior derecha indica el ángulo de buzamiento. La línea azul marino corresponde a la misma estructura en los dos sectores, en este caso, la falla Consag. Los horizontes en cada una de los sectores es el mismo para ambas y están representadas por los colores amarillo y naranja.

tiempos mayores de ~4 s de tiempo doble (TD) de viaje las imágenes sísmicas no tienen una buena definición.

La Figura 3 muestra una sección sísmica que se localiza en la parte sur del área en donde se observa la frontera norte de la cuenca Wagner y las fallas sintéticas asociadas. En dicha sección se muestra un reflector, tanto al este como al oeste, pero no se observa en la parte central; éste es interpretado como el basamento acústico (líneas negras en la Figura 3). Llama la atención el gran espesor de sedimentos en la Cuenca Wagner, los cuales están ligeramente basculados al oeste, hacia la falla Consag (línea azul, Figura 3) y su deformación es casi nula. Un comportamiento similar se presenta en varias secciones sísmicas, por lo que se puede decir que la subsidencia es mayor en el sector de la falla Consag y no en la falla Wagner, como también puntualizó Aragón-Arreola (2006).

La sección mostrada en la Figura 4, en su parte norte, presenta una zona donde los reflectores son difíciles de seguir lateralmente, así como múltiples difracciones, las cuales son características de una zona de falla de rumbo (Yilmaiz, 1987). Esta sección presenta la estructura que delimita en su parte noroeste la cuenca Wagner, aquí nombrada informalmente

falla Consag, por ser descrita por primera vez. La Figura 5, muestra una sección sísmica con arreglo ortogonal en zig-zag, en la que podemos observar claramente la falla Consag que delimita la frontera al oeste de la cuenca Wagner. También se muestran dos horizontes sísmicos (colores amarillo y naranja) con la finalidad de enmarcar más claramente la presencia de dicha falla.

INTERPRETACIÓN

La Figura 6 muestra los resultados de la interpretación. Se indican las fallas Cerro Prieto y Wagner que, aunque conocidas, no habían sido definidas con información de sísmica de reflexión; además, la falla Consag que aquí se reporta por vez primera.

Una de las principales estructuras es la falla Cerro Prieto que se extiende desde la región del valle de Mexicali en dirección al golfo con un rumbo N43°W y echado de ~85° al oeste (Figura 6). El límite SE se conecta con las fallas Wagner y Peñasco (González-Escobar et al., 2006). En el área de estudio se extiende a lo largo de ~32 km, es lateral derecha (Pacheco-Romero et al., 2006), lo cual es evidenciado por los reflectores

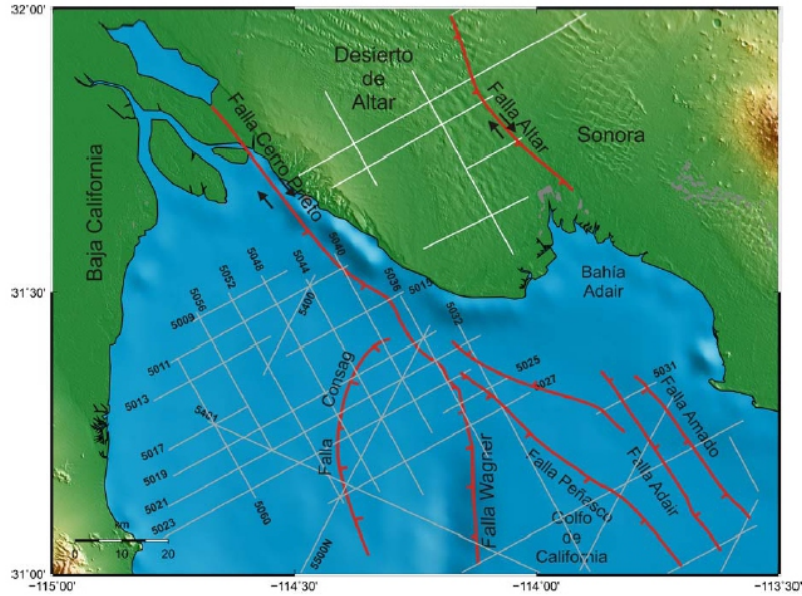


Figura 6. Principales estructuras interpretadas en este trabajo: fallas Cerro Prieto, Wagner y Consag. Las demás estructuras localizadas en el golfo, son tomadas de González-Escobar et al. (2006). Líneas rectas en el desierto de Altar, así como la falla Altar, corresponden a secciones sísmicas interpretadas por Pérez-Tinajero (2007). En las líneas sísmicas, los números corresponden a su etiqueta en la toma de datos.

difusos que no presentan continuidad lateral ubicados en el margen oriental de la falla. La falla Wagner, por sus dimensiones, también es una de las principales estructuras en la región y marca el límite oriental de la Cuenca Wagner con una longitud de ~38 km (Figura 6). La traza de la falla tiene una orientación N10°W y un echado de 55° hacia el oeste con desplazamiento de reflectores de hasta 1 km. La terminación de los estratos hacia la falla es en forma discordante hacia arriba (onlap), es decir, los reflectores tienden a comprimirse hacia arriba a lo largo del plano de la falla. La falla Wagner intersecta con la falla Cerro Prieto en un ángulo de 130° (Figura 6), por lo que el depocentro de la cuenca Wagner dobla al NW adyacente a la zona de falla de Cerro Prieto. La falla Consag se localiza al oeste de la falla Wagner (Figura 6) y limita en dicho sector a la cuenca Wagner; hacia el sur del área de estudio es casi paralela a la falla Wagner con un rumbo variable NE-SW, una longitud aproximada de 90 km y un echado promedio de 50° hacia el este y es de tipo normal. El segmento más al norte de la falla, se curva 25° hacia el NE e intersecta la zona de falla

de Cerro Prieto en un ángulo de 110° (Figura 6). Asociada a esta estructura se observa la mayor subsidencia de la cuenca que puede ser hasta de 300 m y presenta un salto de falla de ~400 m. (Figura 3).

GEOMETRÍA DE LA CUENCA WAGNER

La correlación de las estructuras permitió definir la zona norte de la cuenca Wagner. La Figura 7 muestra las dimensiones de la cuenca. El área configurada tiene un área de 1330 km² y un perímetro de 158 km. La longitud de la frontera de la cuenca a lo largo de la falla Cerro Prieto es de 18 km, en Consag de 68 km y, en Wagner, es de 42 km. Este sector norte es una cuenca asimétrica delimitada en la parte oriental por las fallas Wagner y Cerro Prieto. La cuenca tiene una deflexión hacia al noroeste adyacente a la zona de falla Cerro Prieto (Figura 7). El límite oeste de la cuenca o depocentro es contiguo a la falla Consag, la cual se extiende por más de 90 km en una dirección N-S con un echado de ~50° al E. El largo de la cuenca es de unos 60 km y el ancho de cerca de 27 km.

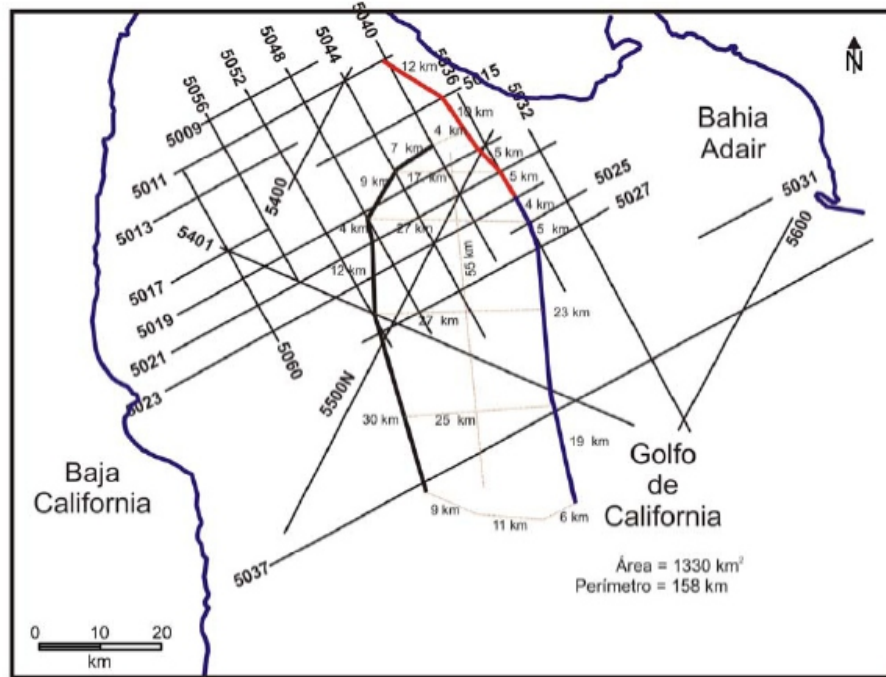


Figura 7. Configuración del depocentro de la cuenca Wagner. Profundidad en tiempo doble (ms). Las líneas gruesas corresponden a las estructuras que limitan la cuenca. Las longitudes en km indican distancias entre estructuras.

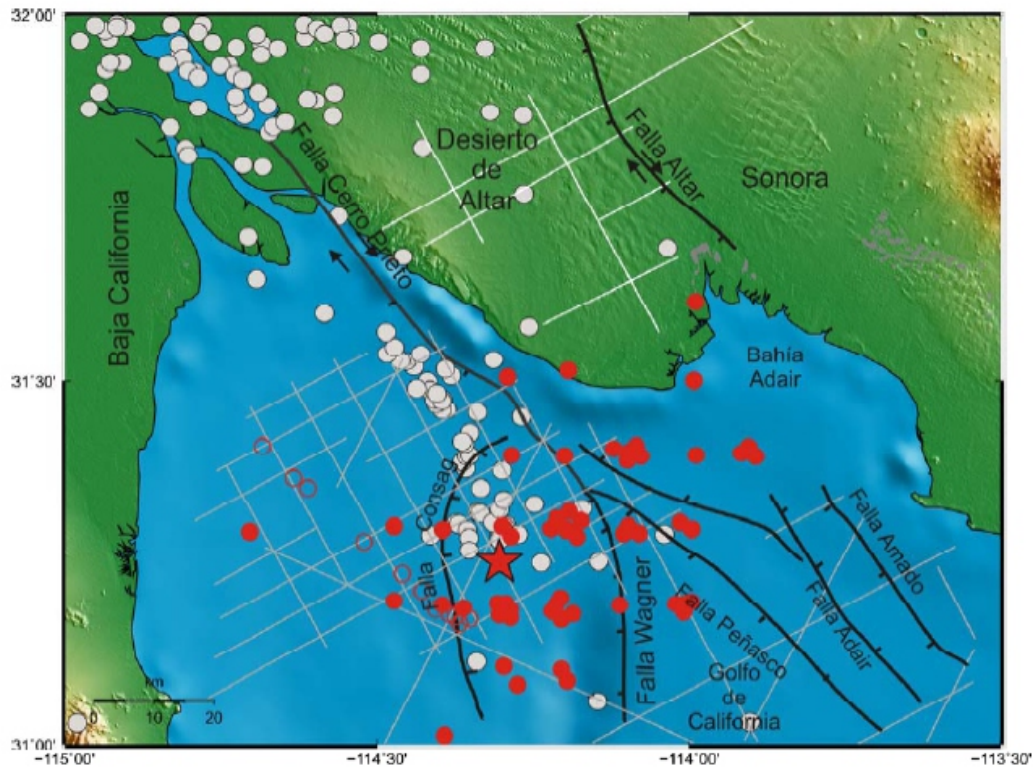


Figura 8. Actividad sísmica tomada de la base de datos de RESNOM para el periodo 1979-2007 (círculos blancos). Los círculos oscuros rellenos muestran enjambres sísmicos reportados por Thatcher y Brune (1971); círculos oscuros vacíos en la cuenca también corresponden al enjambre, pero localizados utilizando diferencias de tiempo entre las ondas P y S. La estrella roja corresponde a uno de los eventos mayores que fue registrado por una red sísmica local. El rango de magnitudes está entre 5 y 3.5.

SISMICIDAD

Con el propósito de correlacionar las estructuras interpretadas con la escasa actividad sísmica reportada, se recurrió a los catálogos de datos sísmicos para la región de estudio provenientes de la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM) para el periodo de 1976-2007; también, se consultaron los catálogos de Southern California Earthquake Data Center (SCEDC), USGS-Earthquake Center, Preliminar Determination Epicenter (PDE), entre otros. Ya que no se observaron diferencias significativas en la localización de los epicentros de las distintas fuentes, se decidió utilizar la base de RESNOM, por ser la más confiable por tener estaciones más cercanas a los eventos sísmicos.

La Figura 8 muestra los epicentros que se localizan principalmente al oeste de la falla Cerro Prieto y en la región de la falla Consag. El total de eventos extraídos de la base de datos son 144 y oscilan entre 1.7 y 4.4 M_w encontrándose algunos eventos sin magnitud. La mayoría de las profundidades de los eventos reportados en el catálogo es superior a los 30 km, por lo que se decidió no mostrar un perfil de éstas. Lo anterior es en virtud de que se considera que la corteza en esta zona no debería ser tan profunda y, además, algunos de los hipocentros tienen errores significativos en sus localizaciones. La actividad sísmica es relativamente baja en comparación con la que ocurre en el Valle de Mexicali, al norte de la zona de estudio. En la misma Figura 8, en círculos rojos, se incluyen los epicentros reportados por Thatcher y Brune (1971) para un enjambre sísmico ocurrido en la zona en Marzo de 1969. Estos investigadores reportaron alrededor de 70 eventos con magnitudes entre 4 y 5.5, ocurridos en dos semanas. No reportan hipocentros, pero argumentan que están por debajo de los 40 km. EL mecanismo focal reportado para uno de los eventos fuertes (estrella en la Figura 8) es de falla normal, con azimut 50° y echado de 60° W.

Tomando en cuenta el lugar del epicentro, esta información se asocia a la falla Consag.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Un rasgo característico en todas las imágenes sísmicas es la gran cantidad de fallas. En su mayoría son de tipo normal; hay en promedio, una falla por km. Se caracterizan por un marcado paralelismo entre ellas, en su mayoría con ángulos de echado mayores a los 45° y generalmente afectan sólo las secuencias sedimentarias y no alcanzan el piso oceánico. Muchas de estas fallas no pudieron correlacionarse en las secciones sísmicas vecinas.

La falla Cerro Prieto es una de las principales estructuras del norte del Golfo de California y Provincia del Salton Sea donde se manifiesta el movimiento entre las placas Norteamérica y Pacífico. Esta falla es de tipo dextral; se extiende a lo largo de 80 km desde el centro de dispersión Cerro Prieto hasta la Cuenca Wagner. El trazo de la falla es visible únicamente en su sector sur y su continuidad hacia el norte ha sido determinada por mecanismos focales y métodos geofísicos (Frez y González, 1991; Pacheco et al., 2006). De acuerdo con nuestros resultados, esta falla se encuentra en las secciones sísmicas en una zona difusa de reflexiones (zona de trituración-sector B del perfil; Figura 3). Esta falla se conecta en su parte sur con las fallas Wagner y Consag las cuales forman parte de los límites este y oeste de la cuenca. Finalmente, la falla Consag se localiza al oeste de la falla Wagner (Figura 6) y limita en dicho sector a la cuenca Wagner. Hacia el sur del área de estudio esta estructura es casi paralela a la falla Wagner.

Considerando que tanto las fallas Consag y Wagner intersectan oblicuamente a la falla Cerro Prieto es posible que ambas fallas (que son principalmente normales) tengan componente lateral lo que genera un movimiento vertical oblicuo, predominantemente vertical.

Si estas fallas fueran perpendiculares a Cerro Prieto la extensión produciría una cuenca similar a las de Delfín Superior y Delfín Inferior ubicadas al SW del área de estudio en donde las fallas normales de estas cuencas son perpendiculares a la falla transforme Ballenas (Persaud et al., 2003). Si comparamos nuestros resultados con un modelo ideal de una cuenca de tipo pull apart (Busby e Ingersoll, 1995), se puede observar que la diferencia radica en que el modelo ideal cuenta con dos fallas de rumbo que controlan e inducen movimientos de deformación a la cuenca, mientras que en nuestros resultados solo se tiene una falla maestra, que es la falla Cerro Prieto.

Con todo lo anterior, podemos resumir que la falla Consag, junto con las fallas Wagner y Cerro Prieto, conforman la geometría de la cuenca Wagner, en los sectores norte, este y oeste, mientras que al sur se conecta con la cuenca Consag. El área y perímetro de la cuenca son de . aproximadamente 1330 km y 158 km, respectivamente. La cuenca se considera de tipo "pull apart" inmadura. Posiblemente las fallas Wagner y Consag adquieran en el futuro, una posición perpendicular a la falla Cerro Prieto permitiendo una extensión completa.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACyT por el apoyo de beca para realizar estudios de maestría (C. Aguilar-Campos), a Petróleos Mexicanos por permitir el uso de la información y a Halliburton Drilling Evaluation & Digital Solutions de México, por el uso del software vía el Gran Universitario que se tiene con CICESE. Agradecemos también a los árbitros Felipe de Jesús Escalona Alcázar y un anónimo, por sus atinadas observaciones y su generosa revisión.

REFERENCIAS

- Aguilar, C., 2007. Sísmica de Reflexión en el Alto Golfo de California. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C., 82pp.
- Aragón-Arreola, M., 2006. Structural evolution of basins in the Northern and Central Gulf of California. Implications for rift kinematics and strain accommodation. Tesis de Doctorado. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C., 146pp.
- Aragón-Arreola, M. and Martín-Barajas, A., 2007. Westward migration of extension in the northern Gulf of California, México. *Geology*, 35-6, 571-574.
- Badley, M. E., 1985. *Practical Seismic Interpretation*, Int. Human Resour. Dev. Corp., Boston, Mass.
- Busby, C.J. and R. V. Ingersoll, 1995. *Tectonics of Sedimentary Basins*. Blackwell Science, 579pp.
- Castro, R. R., Méndez, O., Pérez-Vertti, A., Mendoza, A., and Inzunza, L., 2007. Seismicity in the Gulf of California Region Recorded by the NARS-Baja Array: Preliminary Results. American Geophysical Union (AGU) Joint Assembly, Acapulco, México, 22-25th May 2007.
- Curray, J. R., Moore, D. G., Kelts, K., and Einsele, G., 1982. Tectonics and geological history of the passive continental margin at the tip of Baja California. Initial reports of the Deep Sea Drilling Project. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C. 64:1089-1116.
- Fenby, S. and Sand Gastil, R. G., 1991. Geologic-Tectonic Map of the Gulf of California and Surrounding Areas. En: *The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias*, AAPG Bulletin. Memoir 47:79-83.
- Frez, J., and González, J. J., 1991. Crustal Structure and Seismotectonics of Northern Baja. En: Dauphin, J. P. y Simoneit, B. R. T. (eds.). *The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias*. American Association of Petroleum Geologists. 47:261-283.
- García-Abdeslem, J., 2006. Evolución Tectonoestratigráfica de las Cuencas del Norte del Golfo de California. Volumen 2 – Métodos Potenciales, Reporte técnico No. 80303843, PEMEX. 48pp.
- González-Escobar, M., Martín-Barajas, A., Abdeslem-García, J., y Aragón-Arreola, M., 2006. Evolución Tectonoestratigráfica de las Cuencas del Norte del Golfo de California, Volumen 2 - Procesamiento e interpretación de datos de sísmica de reflexión. Reporte técnico No. 80303843, PEMEX. 23p.

- Heney, T. L. and Bischoff, J. L., 1973. Tectonic elements of the Northern part of the Gulf of California. Geological Society of America Bulletin. 84:315-330.
- Hurtado-Artunduaga, A. D., 2002. Modelo estructural de la cuenca de Wagner en el Golfo de California basado en sísmica de reflexión multicanal (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. 109pp.
- Lomnitz, C., Allen, C., Brune, J., and Thatcher, W., 1970. Sísmica y tectónica de la región norte del Golfo de California, México, resultados preliminares. Geof. Int., vol. 10, 37-48.
- Lonsdale, P., 1989. Geology and tectonic history of the Gulf of California. En: Winterer, D. and Hussong, M. (eds.). The Eastern Pacific Ocean and Hawaii. The Geology of North America Geological Society of America, Boulder, CO. 499-521.
- Martín-Barajas, A., Abdeslem-García, J., Helenes Escamilla, J., González-Escobar M., Aragón-Arreola, M., y M. Pacheco-Romero, M., 2006. Evolución Tectonoestratigráfica de las Cuencas del Norte del Golfo de California. Volumen 1 – Integración de resultados. Reporte técnico No. 80303843, PEMEX. 63pp.
- Nagy, E. A. and Stock, J. M., 2000. Structural controls on the continent-ocean transition in the northern Gulf of California. Journal of Geophysical Research. 105(B7): 16,251-16,269.
- Pacheco-Romero, M. F., Martín-Barajas, A., Elders, W.A., Espinosa-Cardena, J. M., Helenes, J., and Segura, A., 2006. Stratigraphy and structure of the Altar basin of NW Sonora: Implications for the history of the Colorado River delta and the Salton trough. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 23(1):1-22.
- Pérez-Cruz, G., 1982. Algunos resultados de la Investigación geológico-geofísica en la porción noroccidental del Golfo de California. Boletín de la Sociedad Mexicana de Geólogos Petroleros. 6:71-77.
- Pérez-Tinajero, C., 2007. Sísmica de Reflexión en el Desierto de Altar, Sonora México. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada. 101pp.
- Persaud, P., 2003. Images of Early Continental Breakup in and around the Gulf of California and the Role of Basal Shear in Producing Wide Plate Boundaries. Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, 144pp.
- Persaud, P., Stock, J. M., Steckler, M., Martín-Barajas, A., Diebold, J. B., Gonzalez-Fernandez, A., and Mountain, G., 2003. Active deformation and shallow structure of the Wagner, Consag and Delfin Basins, Northern Gulf of California, Mexico. Journal of Geophysical Research. 108(7).
- Phillips, R. P., 1964. Seismic refraction studies in Gulf of California, in Marine Geology of the Gulf of California, T.H. Van Andel and G.G. Shor, Eds, Amer. Assoc. Petrol. Geologists, Tulsa, Oklahoma.
- Thatcher, W. and Brune, J. N., 1971. Seismic Study of an Oceanic Ridge Earthquake Swarm in the Gulf of California. Geophys. J. R. Astr. Soc. 473-489.
- Yilmaz, O., 1987. Seismic Data Processing. Investigations in Geophysics, Society of Exploration Geophysicists. Second Edition. Tulsa, Okla, 526pp.

Recepción del manuscrito: 7 de noviembre de 2007

Aceptación del manuscrito: 1 de septiembre de 2008