

Análisis de la Tectónica y Sedimentación en Cuencas Transtensionales del Límite entre las Placas Pacífico y Norteamérica: Estudio Sísmico de Reflexión en el Norte del Golfo de California

Mario González-Escobar*, Cristian Alejandro Gallegos-Castillo, Sergio Manuel Arregui-Ojeda, Edgar Agustín Mastache-Román y Carlos Simón Reyes Martínez
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
*e-mail: mgonzale@cicese.mx

Resumen

El Golfo de California representa un entorno natural ideal para estudiar y comprender varios procesos geológicos responsables de la transformación y formación de nuestro planeta. Perfiles sísmicos de reflexión en dos dimensiones revelan un espesor de sedimentos de 7 a más de 10 kilómetros, provenientes principalmente del Río Colorado. Estos han rellenado cuencas como Wagner, Consag y Delfín, delimitadas por fallas activas. La Cuenca Wagner, formada por dos subcuencas asimétricas, está influenciada por una falla de bajo ángulo al norte y fallas oblicuas al sur, convergiendo en la Falla Wagner, que conecta con la falla transformante Cerro Prieto en el delta del Río Colorado. Las cuencas del norte del golfo destacan por su geometría compleja, están caracterizadas por subcuencas extensionales con dirección norte-sur vinculadas por fallas transformantes, como el Canal de Ballenas en el sur y Cerro Prieto en el norte. Fallas activas al oeste de la Falla Tepoca marcan el límite oriental del rift, mientras que en zonas como la Isla Tiburón, hay cuencas marginales con basamento acústico frágil, indicando corteza continental bajo gruesos sedimentos. Cuencas abandonadas, como Tepoca y Peñasco, separadas por estructuras elevadas tipo *horst*, completan este dinámico paisaje tectónico. Los esfuerzos tectónicos transversales generan amplias zonas de deformación a lo largo de la región. En conjunto, estos procesos brindan una visión crucial para comprender la dinámica de la tectónica de placas y la evolución geológica de la región.

Palabras clave: Golfo de California, sísmica de reflexión, cuencas sedimentarias, tectónica.

The Gulf of California is a unique natural environment, ideal for studying and understanding the geological processes responsible for the transformation and formation of our planet. In its northern sector, tectonic and sedimentary features provide key insights into its evolution. Two-dimensional reflection seismic profiles reveal a sedimentary thickness of 7 to more than 10 kilometers, primarily composed of sediments from the Colorado River. These have filled basins such as Wagner, Consag, and Delfín, bounded by active faults. The Wagner Basin, consisting of two asymmetrical sub-basins, is influenced by a low-angle fault in the north and oblique faults in the south, converging at the Wagner Fault, which connects to the Cerro Prieto transform fault. The northern Gulf basins stand out for their complex geometry, with north-south extensional sub-basins linked by transform faults, such as the Ballenas Channel and Cerro Prieto. Transverse tectonic stresses generate distributed deformations throughout the region. Active faults west of the Tepoca Fault mark the eastern boundary of the rift. At the same time, areas like Tiburón Island contain marginal basins with weak acoustic basement, indicating continental crust beneath thick sediment deposits. Abandoned basins, such as Tepoca and Peñasco, separated by elevated structures, complete this dynamic tectonic landscape.

Keywords: Gulf of California, reflection seismic, sedimentary basins, tectonics

Introducción

El Golfo de California y la Depresión Salton (Figura 1) ofrecen un entorno ideal para estudiar el desarrollo de cuencas a lo largo de un límite de placas oblicuo-divergente (Dorsey y Umhoefer, 2012). Durante el Cenozoico Tardío, se formaron cuencas transtensionales en el límite de las placas Pacífico y Norteamérica, con un cinturón a lo largo del golfo de 50-60 km de ancho que cambia, de cuencas de expansión de tipo oceánica en el sur, con fallas transformantes perpendiculares, a cuencas oblicuas en el norte, las cuales contienen una potente sucesión de sedimentos sin desarrollo de corteza de tipo oceánica. Las cuencas marginales en los flancos de la depresión del golfo incluyen cuencas de supradesprendimiento, de terminación de fallas transtensionales y de *rift* ortogonales, siendo estas cuencas: East Mesa, Altar, Adair-Tepoca, Tiburón y Yaqui, que se muestran en la Figura 1.

En la región norte del Golfo de California, el límite de placas se deforma activamente a una velocidad de 51 mm/año (Plattner *et al.*, 2007) y presenta cuencas transtensionales formadas por el movimiento oblicuo entre las placas Pacífico y Norteamérica. Algunas cuencas están inactivas y otras son activas tectónicamente (Figura 1). En el sur del Golfo de California, el límite de placas se caracteriza por una expansión de tipo oceánica conectada por fallas transformantes, mientras que en el norte y el Delta del Colorado, dicho límite incluye la compleja Depresión Salton, una zona de transición entre el sistema transformante continental de San Andrés y el sistema de fallas y dorsales oceánicas al sur (Lomnitz *et al.*, 1970; Axen y Fletcher, 1998; Suárez-Vidal *et al.*, 2008; Wei *et al.*, 2011; Dorsey y Umhoefer, 2012; González-Escobar *et al.*, 2014, entre otros). Es notable a todo lo largo del Golfo de California la intensa actividad sísmica (Figura 2).

En la región norte del golfo se cuenta con datos de sísmica reflexión que, en un principio, fueron propiedad de Petróleos Mexicanos (PEMEX), y posteriormente fueron facilitados por la Comisión Nacional de Hidrocarburos, los cuales proporcionan información clave sobre las estructuras y características físicas del subsuelo. Esta información es esencial para comprender la evolución tectónica de las cuencas sedimentarias y su entorno. En ese sentido, los datos de sísmica de reflexión en dos dimensiones (2D) son una herramienta valiosa para cartografiar y caracterizar las estructuras y procesos tectónicos a los que se asocian.

Las cuencas del Golfo de California han sido caracterizadas morfológicamente, principalmente mediante estudios geofísicos, aunque aún se carece de detalles en algunos aspectos, como el de estudios sobre tomografías sísmicas o métodos geofísicos como el magnetotelúrico, que nos permitan visualizar en 3D a profundidades mayores a 5 km con más detalle (Persaud *et al.*, 2003; Sutherland, 2012; Aragón-Areola y Martín-Barajas, 2007; Lizarralde *et al.*, 2007; González-Escobar *et al.*, 2009; Mar-Hernández *et al.*, 2012, Martín-Barajas *et al.*, 2020). La distribución de las cuencas transtensionales se debe al movimiento oblicuo entre las placas Pacífico y Norteamérica. Durante los últimos 8-12 millones de años, la corteza ha experimentado una variedad de estilos de deformación que varía entre extensional y transtensional e influyen la geometría, subsidencia y patrones de relleno de las cuencas. Este trabajo revisa aspectos de las cuencas sedimentarias del norte del Golfo de California, analizando la geometría de sus estructuras, así como los rasgos tectónicos de su entorno.

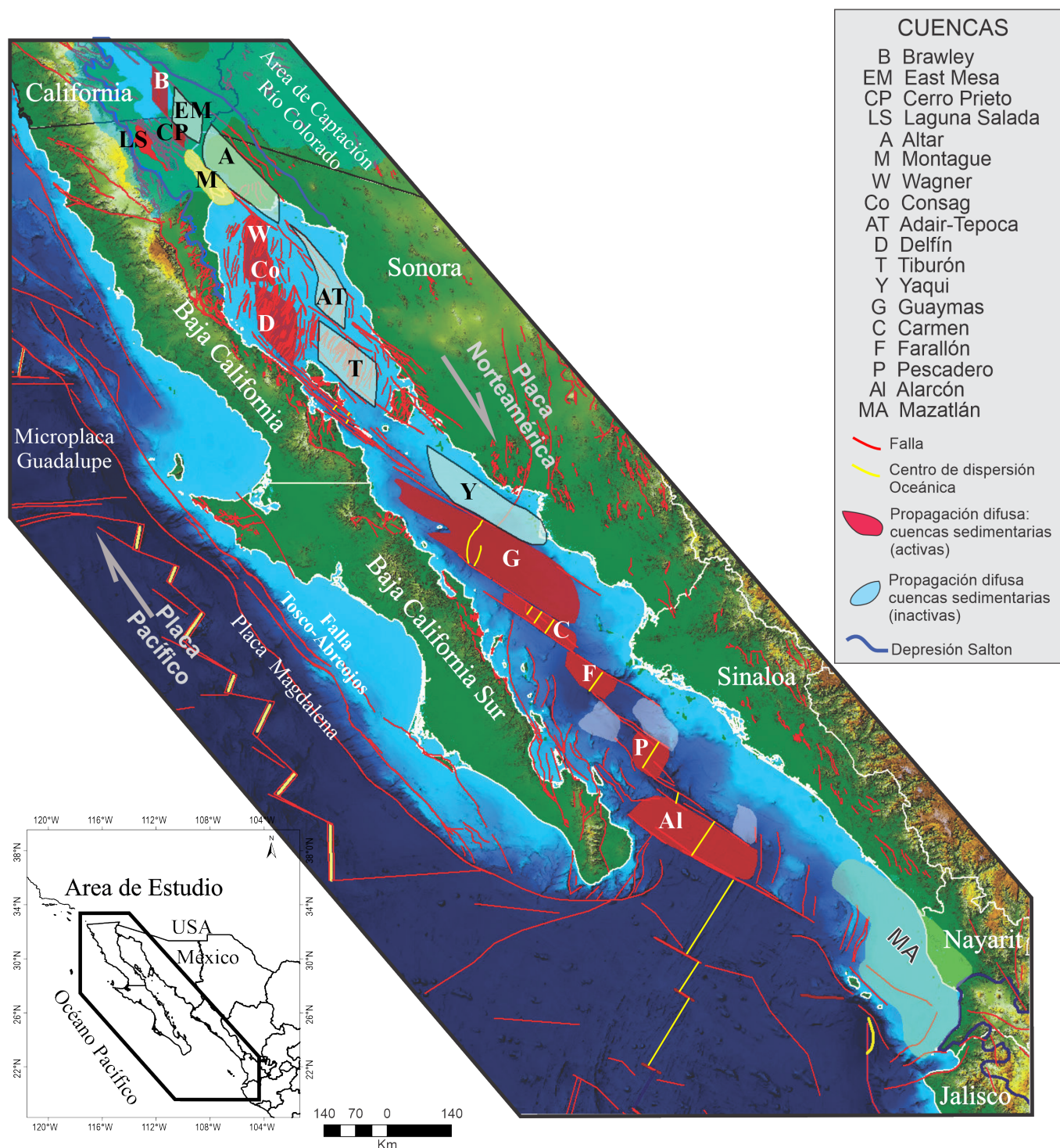


Figura 1. Tectónica y cuencas del Golfo de California, México y la Depresión Salton, CA, EUA. Polígonos rojos y azules indican áreas de expansión difusa, incluyendo cuencas sedimentarias activas e inactivas. Las líneas amarillas representan fallas de tipo pull-apart. Mapa modificado a partir de Dorsey y Umhoefer, 2012; Chanes-Martínez *et al.*, 2014; van Wijk *et al.*, 2017; Umhoefer *et al.*, 2018; Sánchez-Barra *et al.*, 2022; González-Escobar *et al.*, 2024.

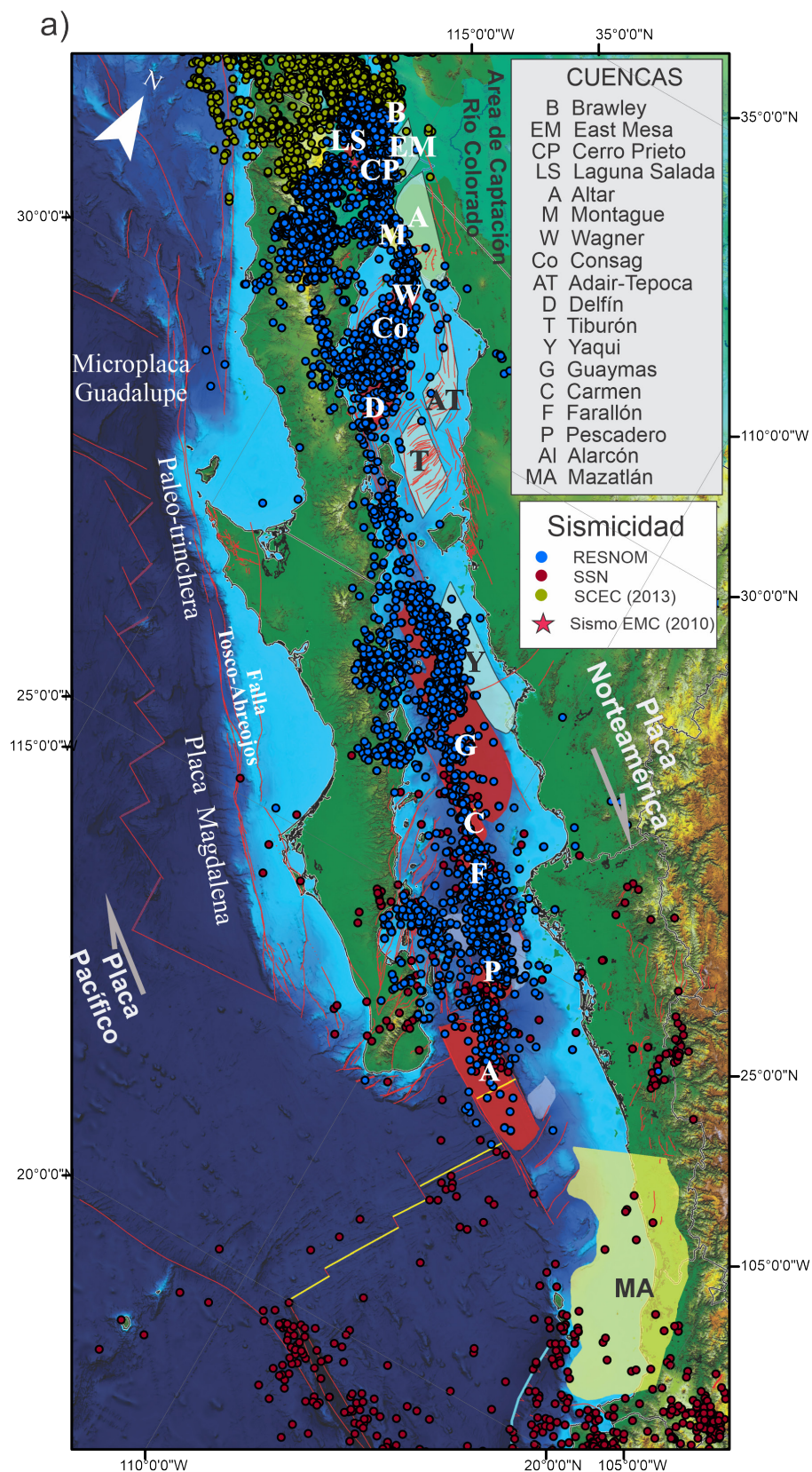


Figura 2. a) Similar a Figura 1 e incluye la sismicidad. Actividad sísmica en la región del Golfo de California.

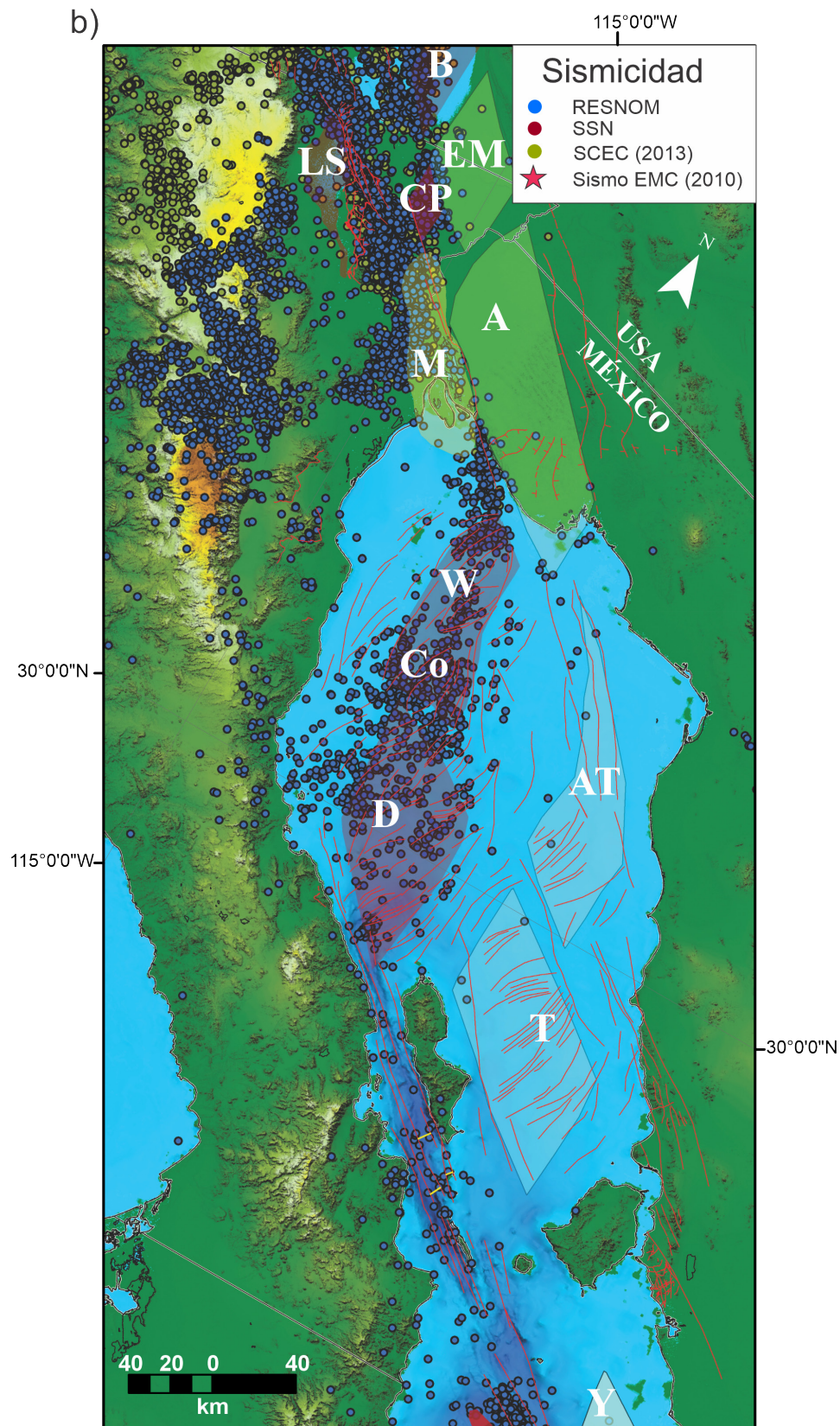


Figura 2. b) Similar a Figura 1 e incluye la sismicidad. Acercamiento de la actividad sísmica en el norte del Golfo de California (área de estudio). Líneas rojas—Fallas.

Sismicidad en el Golfo de California

Se elaboró un catálogo unificado de más de 7,000 sismos registrados en el Golfo de California durante el periodo 1900-2022, integrando datos de la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM), el Servicio Sismológico Nacional (SSN), el Statewide California Earthquake Center (SCEC-2013) y el International Seismological Centre (ISC), en ese orden de prioridad (Figura 2). La base de datos del ISC abarca el periodo 1964-2022 y la de RESNOM (2017), de 1987 a 2022. Los sismos presentan magnitudes locales entre 3.0 y 7.2, estando los mayores ($M > 6.8$) en el sur, sobre las fallas de las cuencas Farallón ($M = 6.9$), Carmen ($M = 7.0$) y Guaymas ($M = 7.1$ y $M = 7.0$) (Figura 2). Los datos de RESNOM corresponden a eventos al sur de Salton Sea (E.U.A.) entre 2011 y 2022, incluido el evento de El Mayor-Cucapah de 2010 ($M = 7.2$) (Figura 2).

Se identificaron fallas sísmicamente inactivas en el noreste del Golfo de California y actividad sísmica concentrada en la región central del norte de la península, con profundidades focales predominantes entre 4 y 8 km. Los sismos superficiales (< 4 km) tienden a alinearse a lo largo del eje del Golfo de California y las estimaciones de la profundidad del Moho, basadas en funciones de receptor (Fernández y Pérez-Campos, 2017) son de 35 km en el lado occidental de la península, de 40 km bajo la Sierra de San Pedro Mártir y de 15 km en el margen oriental del golfo.

Entorno tectónico y estructural

La Depresión Salton, en California, E.U.A., marca el límite oblicuo-divergente entre las placas Pacífico y Norteamérica, cuya tasa de deslizamiento es de 43-47 mm/año (Plattner *et al.*, 2007), conectando una red compleja de fallas del sur de California con el Valle de Mexicali (Nicholson *et al.*, 1994; Dixon *et al.*, 2000). Desde hace 12.5 millones de años, la transtensión regional ha separado la península de Baja California de la parte continental de México (Atwater y Stock, 1998; Oskin y Stock, 2003).

Estudios recientes han revelado detalles sobre la arquitectura del *rift* y la composición de la corteza (Aragón-Arreola *et al.*, 2005; González-Fernández *et al.*, 2005; Lizarralde *et al.*, 2007), mientras otros trabajos documentan la respuesta estratigráfica a la deformación cortical (Umhoefer *et al.*, 1994; Dorsey y Umhoefer, 2012).

El movimiento de placas a lo largo del Golfo de California y la Depresión Salton inició hace 6 millones de años (Oskin *et al.*, 2001), pero la cinemática previa aún es tema de debate. Al respecto, existen tres hipótesis principales sobre el inicio del *rift* del Golfo de California. La primera plantea que el *rift* comenzó después de la subducción de la placa Farallón hace 14-12.5 millones de años, cuando la península de Baja California comenzó a moverse con la placa del Pacífico. Se estima que el deslizamiento entre las placas del Pacífico y Norteamérica desde hace 12 millones de años es de 600 km, lo que sugiere un cierre completo del Golfo de California. Aunque la cizalla lateral solo permite entre 270 y 300 km de desplazamiento, el resto ocurre en el margen del golfo, en Sonora y Sinaloa. La segunda hipótesis, de Stock y Hodges (1989), propone dos etapas en el proceso: la primera es la partición lateral entre las placas y la segunda es la formación de un sistema transformante y cuencas pull-apart a partir de 3-4 millones de años. La tercera hipótesis sostiene que el *rift* comenzó mucho antes, entre 27 y 15 millones de años, con un adelgazamiento litosférico previo y transtensión iniciada a los 12.5 millones de años.

Las cuencas del Golfo de California se dividen en axiales y marginales. Las axiales del norte son someras (< 500 m) con geometrías romboédricas y sin corteza oceánica, mientras que las del sur desarrollan dorsales de tipo oceánico de aguas profundas (2000–3000 m) (Figura 1). En la Cuenca Guaymas, en la zona central del golfo, se combina la sedimentación moderada y profundidades intermedias de alrededor de 1600 m. Las cuencas marginales, como la Depresión

Salton, se caracterizan por estar en aguas someras o encontrarse en ambiente terrestre. La interpretación de dominios genéticos de la corteza se ha logrado a través de perfiles sísmicos y batimétricos. En el norte, en cuencas como Delfín, Consag y Wagner, las cortezas están adelgazadas y definen la transición entre composiciones de tipo continental hacia tipo oceánica. (Persaud *et al.*, 2003; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007; González-Escobar *et al.*, 2024). Las cuencas orientales adyacentes a Sonora son tectónicamente inactivas y su base es de corteza de tipo continental.

Base de datos.

Se emplearon bases de datos de sísmica de reflexión 2D adquiridas por PEMEX y el proyecto Ulloa89 (Francisco de Ulloa es el nombre del buque oceanográfico del CICESE en ese tiempo). La base de datos de PEMEX abarca la totalidad del norte del Golfo de California y cuenta con un tiempo de registro de 6 segundos, mientras que la del proyecto Ulloa89, de alta resolución, se centra en detalles más específicos, y someros (< 1km de profundidad). Ambas bases de datos fueron utilizadas en otros estudios (Persaud *et al.*, 2003; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007; González-Escobar *et al.*, 2009, 2014, 2024; Mar-Hernández *et al.*, 2012, Martín-Barajas *et al.*, 2020, entre otros). Sin embargo, ninguno de estos trabajos ha integrado la información completa de todo el norte del golfo (Figura 3).

Interpretación

En esta sección se analizan por separado las cuencas activas con alta densidad de epicentros (Figura 4) y las cuencas inactivas que se encuentran cerca de las costas de Sonora (Figura 5).

El perfil 5052 de la Figura 4a muestra una serie de cuencas, las cuales contienen subcuencas separadas por altos estructurales posiblemente formados en corteza continental inferior. Lo anterior no necesariamente implica corteza metamórfica.

Sin embargo, la corteza continental inferior pudo haber experimentado procesos metamórficos debido a presiones y temperaturas altas que son características de esas profundidades. Al norte, en la plataforma continental de la península se observa una cuenca abandonada que corresponde a la Cuenca Salina, cuya anchura es de 20 km. Un alto estructural separa la Cuenca Wagner de la Cuenca Consag, la cual presenta una subsidencia mayor en su parte norte. Hacia el sur, la Cuenca Superior Delfín incluye dos subcuencas asimétricas (Delfín Superior Norte y Delfín Superior Sur), delimitadas por fallas normales con orientación NE.

El perfil 5049 (Figura 4b) es perpendicular al perfil anterior y a la orientación hacia el NW del Golfo de California. Se orienta WSW-ENE atravesando la Cuenca Consag, la cual muestra un relleno en forma de cuña que está controlado por fallas normales en sus márgenes. Un reflector profundo sugiere intrusiones magmáticas asociadas a la formación de nueva corteza oceánica. Al este, la Falla Tepoca delimita el margen oriental con un basamento fallado alto, mientras que remanentes de la Cuenca Peñasco, cizallados por fallas N-S, incluyen la Falla Peñasco, de tipo transcurrente, que representa la extensión hacia el SE de la Falla Cerro Prieto. Respecto al sector frente a las costas de Baja California, en la región de San Felipe-Puertecitos, se encuentran varias fallas geológicas, siendo la Falla Percebe una falla de rumbo que es la más dominante en la zona. En esta región, el basamento acústico es somero, profundizándose mar adentro.

El perfil 5035 (Figura 4c) se localiza en la parte más meridional de la Cuenca Wagner, donde su depocentro, presenta reflectores de gran amplitud y una base en forma de domo interpretada como corteza oceánica nueva, ubicada debajo del depocentro más profundo que termina hacia el este en la Falla Wagner. El perfil sísmico corta transversalmente la Cuenca Wagner y la zona de cizalla inactiva (?) del sector oriental del golfo. Hacia el este, una sucesión sedimentaria potente se acuña hacia el continente y está cortada por

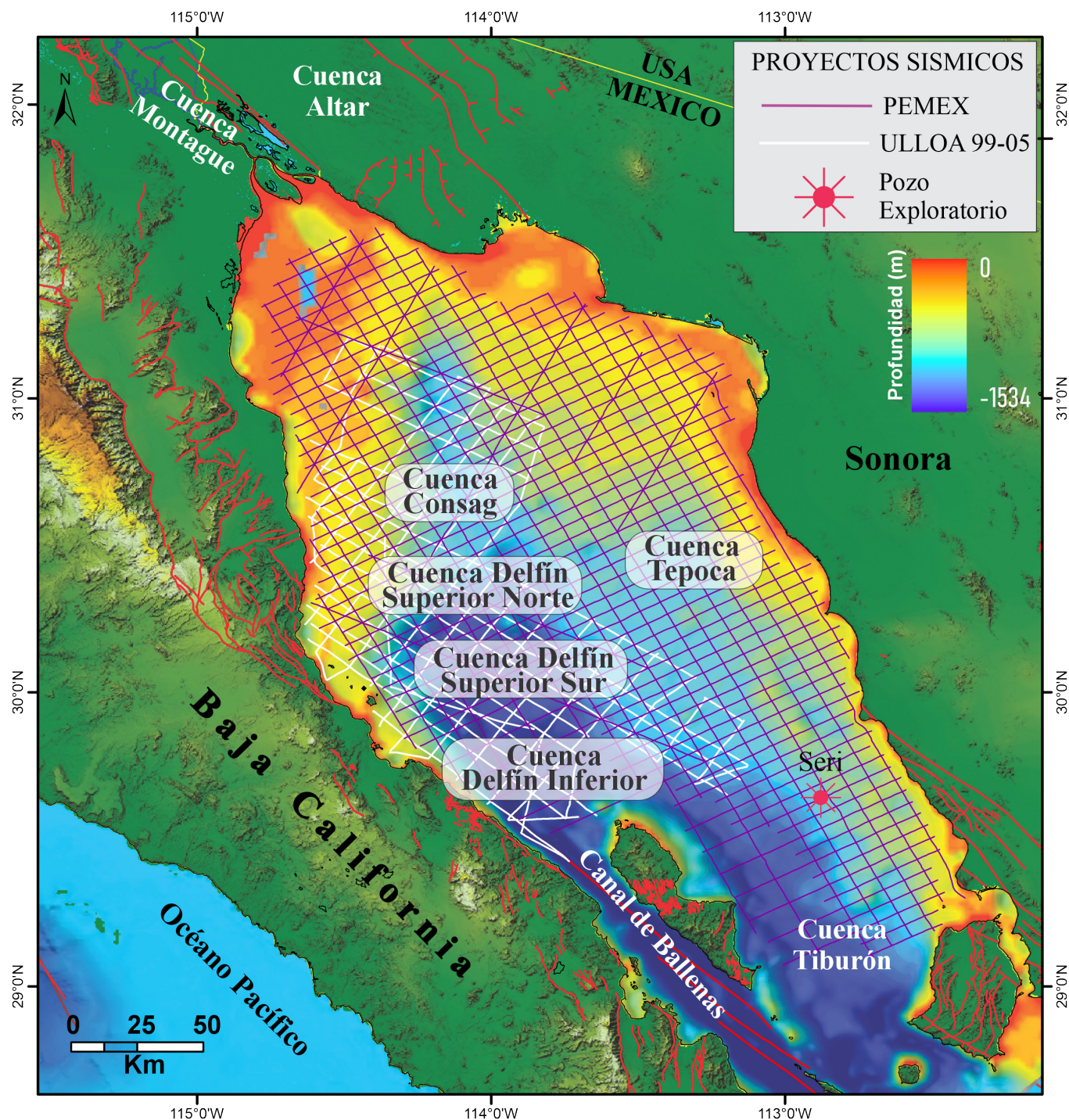


Figura 3. Interpretación estructural a partir de mapas batimétricos y perfiles de refracción sísmica (cuadrícula). Los datos sísmicos de PEMEX son de 48 canales y registran 6 segundos de TWTT—Tiempo doble de viaje (s) (líneas moradas). Las líneas sísmicas de alta resolución Ulloa89 son de 48 canales y registran 2 segundos de TWTT (líneas blancas). Los datos sísmicos de Ulloa89 son de poca penetración y muestran la sedimentación reciente y las fallas activas en detalle. La correlación y ubicación de fallas se definen con estos datos.

una serie de fallas de rumbo NE. Dicha secuencia termina abruptamente en la Falla Peñasco, que es transcurrente derecha. Esta falla produce un desplazamiento de basamento de ~1,5 km de profundidad. Hacia el este de la misma falla, las fallas Adair y Amado definen un graben simétrico y se interpretan como fallas transcurrentes inactivas.

En la Figura 5 se analizan tres perfiles que atraviesan la Cuenca Tiburón en el margen oriental del golfo.

El perfil 5032, orientado NW-SE, paralelo a la costa de Sonora, inicia en el extremo norte del golfo. En esa zona corta oblicuamente la Falla Cerro Prieto la cual está marcada por una caída de 2s del basamento acústico. Los bloques estructurales en la Cuenca Tepoca están controlados por la zona de Falla Tepoca y otras fallas del mismo sistema estructural. El perfil 5024 (Figura 5b), paralelo al anterior, inicia en la Cuenca Tepoca y ofrece una buena definición de la Cuenca Tiburón.

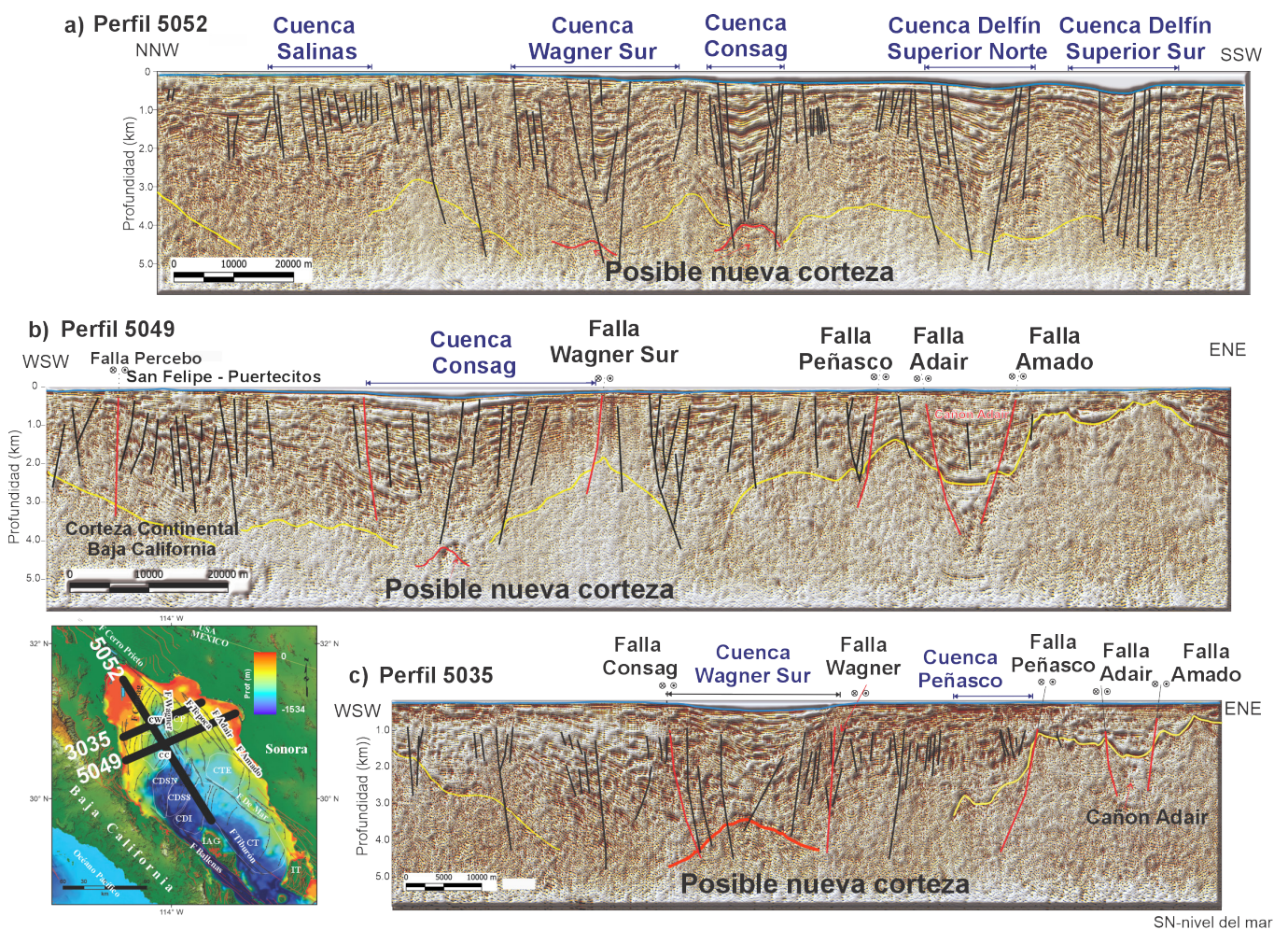


Figura 4. Mapa índice del norte del golfo y tres perfiles sísmicos a través de las cuencas activas. En los perfiles, la línea azul representa el nivel del mar, la línea amarilla—basamento acústico y la línea roja—posible nueva corteza. Las líneas negras y rojas indican fallas, siendo las rojas las estructuras dominantes. Cuencas: CW—Wagner, CC—Consag, CDSN—Delfín Superior Norte, CDSS—Delfín Superior Sur, CDI—Delfín Inferior, CT—Tiburón, CTE—Tepoca.

Dichas cuencas están separadas por un alto en el basamento de una corteza continental adelgazada. La Falla Desemboque (dirección NE-Fig. 5b) corta el basamento en el margen SSE de la Cuenca Tiburón, a la que se asocia una significativa subsidencia.

Finalmente, el perfil 5113 (Figura 5c) muestra fallas normales que controlan la subsidencia en la Cuenca

Tiburón. El pozo Seri, de 4.2 km de profundidad termina en sedimentos sobre el basamento a ~4 km de profundidad. La Falla Tiburón, transcurrente derecha, presenta deformación activa, evidenciada por rasgos que alcanzan el fondo marino y sismicidad que coincide con un montículo volcánico reciente.

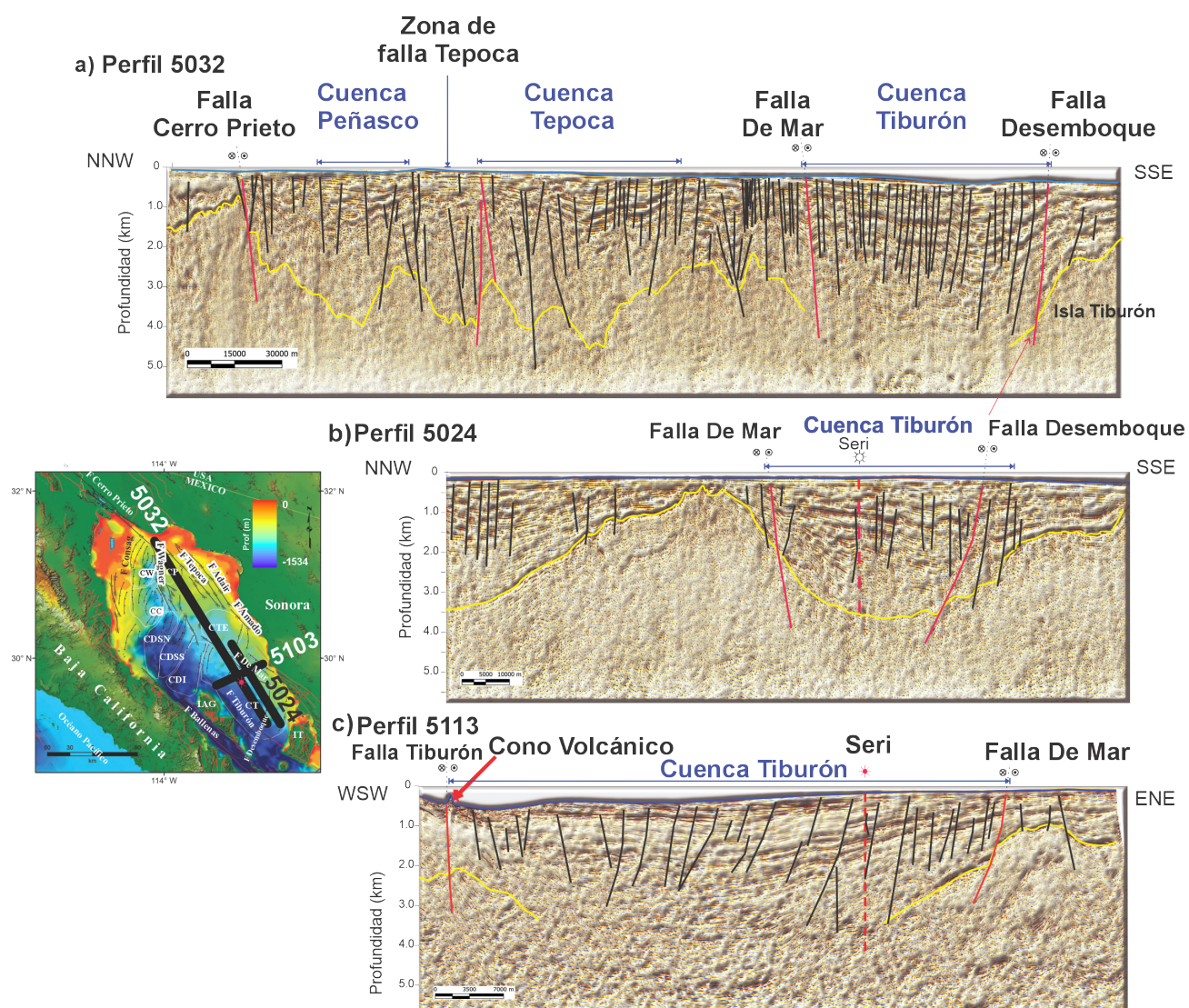


Figura 5. Mapa índice de tres perfiles sísmicos ubicados sobre la Cuenca del Tiburón. En los perfiles la línea amarilla se asocia al basamento acústico. Seri—Pozo Exploratorio (4,200 m de profundidad). Las líneas negras y rojas son fallas, siendo las rojas las dominantes. Cuencas: CW—Wagner, CC—Consag, CDSN—Delfín Superior Norte, CDSS—Delfín Superior Sur, CDI—Delfín Inferior, CT—Tiburón, CTE—Tepoca.

Resultados

La interpretación de los perfiles sísmicos revela que la batimetría somera alcanza profundidades de ~200 m (Figura 6a). El espesor sedimentario oscila entre ~7.0 km y más de 10 km, principalmente por aporte del Río Colorado (González-Fernández *et al.*, 2005; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007; González-Escobar *et al.*, 2009, 2014; Mar-Hernández *et al.*, 2012). Las cuencas Wagner, Consag y Delfín Superior e Inferior tienen depocentros sepultados y están vinculadas a las fallas transformantes del Canal de Ballenas al sur y Cerro Prieto al norte (Lonsdale, 1989; Fenby y Gastil, 1991; Persaud *et al.*, 2003). La deformación transcurrente en el Canal de Ballenas genera una red compleja con aspecto de cola de caballo que define a las cuencas Delfín Norte y Sur.

La Cuenca Wagner está formada por dos subcuencas cuyos depocentros asimétricos se orientan NNE-SSW. La subcuenca norte, sin expresión batimétrica clara, está delimitada por la Falla Consag en el NW y la Falla Wagner en el este, mientras que la subcuenca sur de ~12-15 km de ancho está delimitada por fallas normales en el NW y la Falla Wagner en el E. La base de la corteza en la zona norte del golfo se sitúa entre 15 y 20 km de profundidad, la cual puede estar constituida por rocas metamórficas con intrusiones basálticas, o rocas graníticas diluidas, lo que significa que es una corteza que originalmente estaba formada por rocas graníticas que ha sufrido alteraciones que han modificado su composición mineralógica, empobreciéndola en algunos de sus componentes originales, o bien mezclándola con otros materiales. Este tipo de alteraciones son comunes en zonas donde la corteza ha estado sujeta a procesos de metamorfismo, erosión o actividad magmática (González-Fernández *et al.*, 2005; Fuis *et al.*, 1984).

Al W de la Falla Tepoca, las fallas activas tienen expresión en la batimetría del fondo marino (Figura 6a). Hacia el oriente de la misma zona

de falla, la subsidencia de las cuencas marinas disminuyó o cesó hace ~2-3 Ma con la migración de actividad tectónica hacia la península de Baja California (Aragón-Arreola *et al.*, 2005; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007). Entre las cuencas abandonadas, la mayor es la Cuenca Tiburón. Las fallas activas al oeste de la región de la Falla Tepoca también delimitan el *rift* moderno que desarrolla formas no romboidales como se ha estado suponiendo, con subcuencas múltiples (Figura 6). Los depocentros de las cuencas Wagner, Consag, Delfín Superior e Inferior están sepultados y no tienen expresión batimétrica clara (Fenby y Gastil, 1991; Persaud *et al.*, 2003), al igual que la subcuenca norte de la Cuenca Wagner, mientras que la subcuenca sur de ~12-15 km de ancho conecta con la Falla Wagner al NE. La deformación transcurrente en el Canal de Ballenas genera una red compleja con aspecto de cola de caballo que define a las cuencas Delfín Norte y Sur. La Cuenca Delfín Superior tiene entre cuatro y cinco depocentros asimétricos, mientras que la Cuenca Delfín Inferior es más joven y tiene un *rift* simétrico orientado al NE paralelo al alto Ángel de la Guarda definido por una falla normal con movimiento de bloque de techo hacia el NW (Figura 6).

Hacia el E, la inactiva Cuenca Tiburón tiene depocentros orientados al NE definidos por fallas normales de bajo ángulo, limitadas por las fallas Tiburón al oeste y De Mar en el este. El basamento de esta cuenca es continental y está cubierto por >6-7 km de sedimentos (González-Fernández *et al.*, 2005; Mar-Hernández *et al.*, 2012). La Falla Tiburón es activa localmente y captura una pequeña parte de la deformación de las placas Pacífico-Norteamérica. Las cuencas relictas del margen oriental, como Tiburón, Tepoca, Peñasco y Altar, están separadas por altos estructurales definidos por el desplazamiento de la Isla Ángel de la Guarda y la zona de Falla Amado. Estas cuencas, formadas en la etapa inicial del *rifting*, contienen restos de corteza continental hiperextendida observados como altos en intracuenca (Figuras 4-6).

Magmatismo activo se observa en la Cuenca Delfín Inferior, en el margen peninsular (fallas Volcanes y Ballenas), y a este pueden estar asociados los

respiraderos hidrotermales de las cuencas Delfín Superior, Consag y Wagner (González-Escobar *et al.*, 2014; Figura 6).

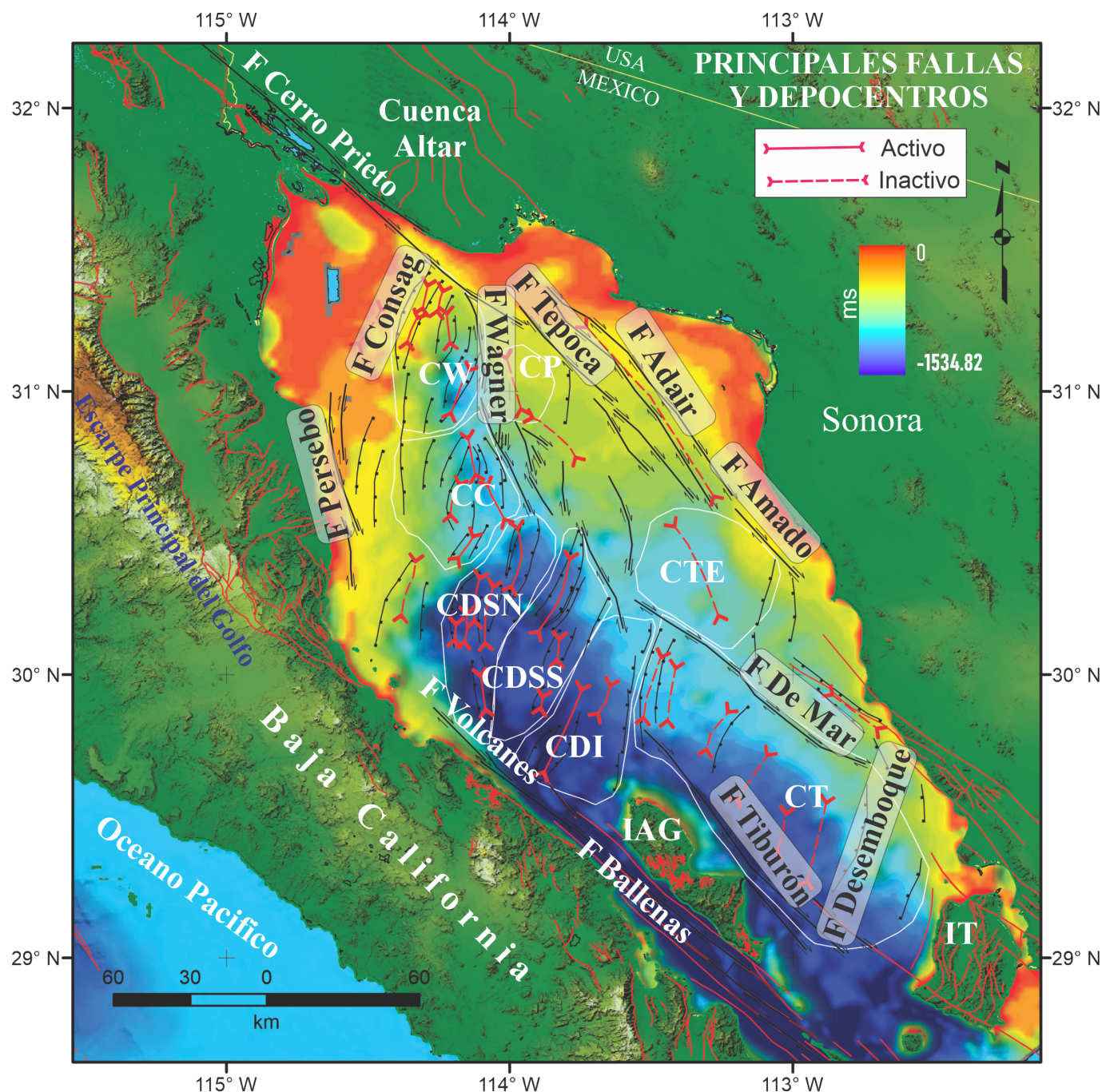


Figura 6. a). Mapa estructural del norte del Golfo de California mostrando las fallas principales. Algunas fallas cortan el basamento y producen varias cuencas menores cuyos depocentros se representan con líneas en rojo. Las líneas discontinuas rojas indican depocentros abandonados ubicados principalmente en el lado oriental del *rift*. Los contornos blancos delimitan cada una de las cuencas.

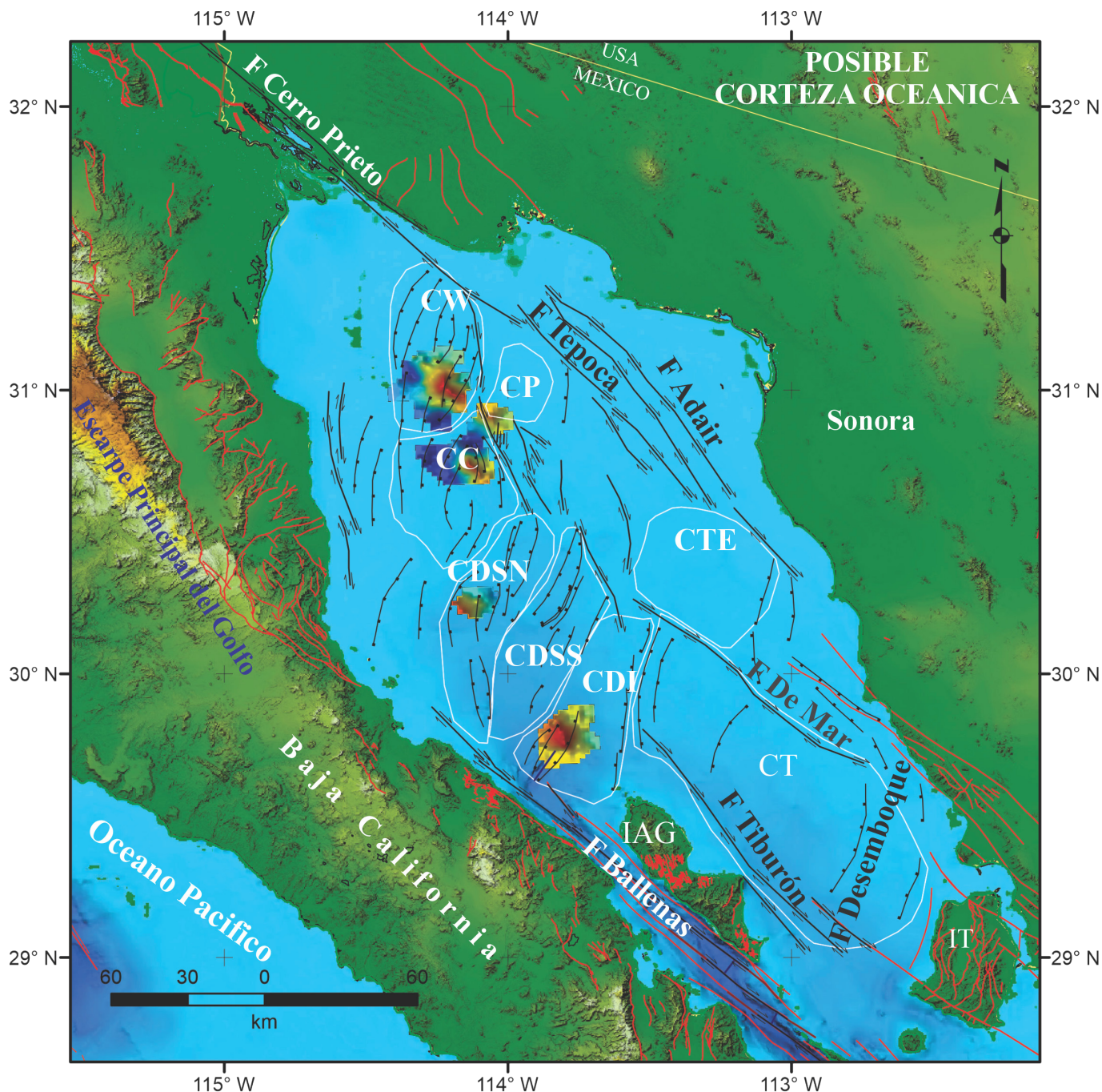


Figura 6. b) Mapa estructural con fallas activas que cortan el fondo marino. Se muestran los sitios en donde se observa evidencia de nueva corteza oceánica y que en su mayoría son *rifts* activos (sectores de color diferente al azul). Los reflectores profundos en forma de domo y de alta amplitud se interpretan como intrusiones magmáticas debajo de los depocentros (Mar-Hernández *et al.*, 2012; González-Escobar *et al.*, 2014). Cuencas: CW—Wagner Norte, CC—Consag, CDSN—Delfín Superior Norte, CDSS—Delfín Superior Sur, CDI—Delfín Inferior, CT—Tiburón. Islas: IAG—Ángel de la Guarda, IT—Tiburón.

Discusión

El Río Colorado ha llenado las cuencas de la Depresión Salton y el norte del Golfo de California con un volumen de sedimentos estimado entre 2.2 y $3.4 \times 10^5 \text{ km}^3$ (Dorsey y Umhoefer, 2012). Estos depósitos han formado una corteza transicional durante los últimos 5-6 Ma, evitando posiblemente la extrusión de derrames basálticos que caracterizan a una corteza oceánica (Fuis *et al.*, 1984). En el norte del Golfo, las cuencas Wagner, Consag, Delfín Superior Norte y Sur, así como Delfín Inferior, presentan espesores de sedimentos de hasta 10 km, provenientes del Río Colorado (Moore y Curray 1982). Los ejes de las cuencas muestran una geometría vinculada a las fallas transformantes paralelas Ballenas en el sur y Cerro Prieto en el norte. La deformación transcurrente del Canal de Ballenas crea una red compleja en las cuencas Delfín, mientras que la subsidencia se ha desplazado hacia el margen occidental (Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007). La Cuenca Tiburón, con un basamento mal definido entre las fallas de Tiburón y De Mar (Figura 6), presenta depocentros orientados al NE bajo más de 6 km de sedimentos (González-Fernández *et al.*, 2005).

Las fallas activas son dominantes hacia el oeste de la zona de Falla Tepoca, mientras que las cuencas marginales del margen oriental, como Tiburón, Tepoca, Peñasco y Altar, corresponden a remanentes tectónicos separados por altos estructurales (Figura 6) y son tectónicamente inactivas. La Cuenca Altar tiene importantes implicaciones tectónicas respecto a las cuencas localizadas en el norte del Golfo de California, debido a su relación con el proceso de extensión continental y la interacción tectónica en la región. En particular, la Cuenca Altar es parte de una estructura extensional que ha sido influenciada por la misma dinámica que afecta al Golfo de California, en donde el estiramiento de la corteza continental ha dado lugar a la formación de cuencas y la separación de bloques tectónicos y que actualmente se considera tectónicamente inactiva. Por otro lado, las cuencas Wagner, Consag y Delfín son activas y desarrollan subcuencas asimétricas.

Conclusiones

La reinterpretación de los perfiles sísmicos de reflexión 2D de PEMEX y Ulloa89 aportan información relevante sobre la actividad de las principales cuencas del norte del Golfo de California, en donde el tirante de agua es de hasta 200 m, sin considerar Canal de Ballenas que tiene profundidades de alrededor de 1500 m. Con espesores sedimentarios mayores a 7 km, los sedimentos del Río Colorado son los materiales más abundantes en el relleno de las cuencas Wagner, Consag y Delfín Superior Norte y Sur, así como Delfín Inferior, las cuales exhiben geometrías extensionales en dirección norte-sur, vinculadas a las fallas transformantes del Canal de Ballenas al sur y Cerro Prieto al norte. La deformación transcurrente en el Canal de Ballenas genera una red compleja con aspecto de cola de caballo que define a las cuencas Delfín Inferior y Superior (norte y sur).

Las fallas activas de la zona de Falla Tepoca marcan el límite oriental del *rift* moderno, mientras que cuencas marginales en la Isla Tiburón y el noreste de Sonora evidencian actividad tectónica y sedimentaria del Mioceno Tardío (12-6 Ma). Depocentros asimétricos y estructuras de bloques tipo *horst*, como el alto Ángel de la Guarda y la Cuenca Tiburón, están formados por corteza continental.

Agradecimientos

Agradecemos a la Comisión Nacional de Hidrocarburos y a PEMEX por brindarnos el acceso a los datos sísmicos de reflexión. A los estudiantes de posgrado que, a lo largo de los años, han participado activamente en la región con sus tesis, apoyados por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, cuya invaluable ayuda financiera ha sido esencial para la realización de sus proyectos. Al Dr. Arturo Martín-Barajas por su constante participación en los proyectos y sus valiosos aportes al conocimiento del norte del Golfo de California. A Halliburton/Landmark, OpendTect,

GeoMapApp y Google Earth Pro por permitirnos utilizar sus softwares a través de los Programas de Grants Universitarios/CICESE. Queremos expresar nuestro agradecimiento a Luis Delgado y Felipe Escalona por su minuciosa revisión y valiosas sugerencias, las cuales han enriquecido y mejorado significativamente este manuscrito.

Referencias

- Aragón-Arreola, M., Morandi, M., Martín-Barajas, A., Delgado-Argote, L., González-Fernández, A. (2005). Structure of the *rift* basins in the central Gulf of California: kinematic implications for oblique rifting. *Tectonophysics*, 409, 19–38.
- Aragón-Arreola, M., Martín-Barajas, A. (2007). Westward migration of extension in the northern Gulf of California, Mexico. *Geology*, 35, 571–574.
- Atwater, T., Stock, J.M. (1998). Pacific North America plate tectonics of the Neogene southwestern United States: An update: *International Geology Review*, 40, 375–402.
- Axen, G., Fletcher, J.M. (1998). Late Miocene-Pleistocene extensional faulting, northern Gulf of California, Mexico and Salton Trough, California. *International Geology Review*, 40, 217–244.
- Chanes-Martínez, J.J., González-Escobar, M., Suárez-Vidal, F., Gallardo-Mata, G.C. (2014). Structural Geometry of a Sector of the River Delta, Baja California, Mexico, Based on Seismic Reflections, 2014, *Pure and Applied Geophysics*, 171, 1107–1127, Doi: 10.1007/s00024-013-0729-z.
- Dixon, T., Farina, C. De Mets, Suarez Vidal, F., J. Fletcher, J., Márquez-Azua, B., Miller, M., Sánchez, O., Umhoefer, P. (2000). New kinematic models for Pacific-North America motion from 3 Myr to present, II: Tectonic implications for Baja and Alta California, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3961–3964.
- Dorsey, R.J., Umhoefer, P.J. (2012). Influence of sediment input and plate-motion obliquity on basin development along an active oblique-divergent plate boundary: Gulf of California and Salton Trough, in Cathy Busby and Antonio Azor (ed.), *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances*, Blackwell Publishing Ltd, 209–225.
- Fenby S.S., Gastil, R.G. Cartographers. (1991). *Geologic-tectonic map of the Gulf of California and surrounding areas*. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists.
- Fernández, A., Pérez-Campos, X. (2017). Lithosphere thickness in the Gulf of California region, *Tectonophysics*, 719, doi: 10.1016/j.tecto.2017.06.016
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S.E., Duque-Trujillo, J., Lonsdale, P., Solari, L. (2013). Late Oligocene to middle Miocene rifting and synextensional magmatism in the southwestern Sierra Madre Occidental, Mexico: the beginning of the Gulf of California rift. *Geosphere* 9 (5), 1161–1200. <https://doi.org/10.1130/GES00925.1>.
- Fletcher, J.M., Grove, M., Kimbrough, D., Lovera, O., Gehrels, G. (2007). Ridge-trench interactions and the Neogene tectonic evolution of the Magdalena shelf and southern Gulf of California: Insights from detrital zircon U-Pb ages from the Magdalena fan and adjacent Sediment Input and Plate-Motion Obliquity 223 areas. *Geological Society of America Bulletin*, 119, 1313–1336.

- Fuis, G. S., Bauer, K., Goldman, M. R., Ryberg, T., Langenheim, V. E., Scheirer, D. S., Rymer, M. J., Stock, J. M., Hole, J. A., Catchings, R. D., (1984). Subsurface geometry of the San Andreas fault in southern California: Results from the Salton Seismic Imaging Project (SSIP) and strong ground-motion expectations, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 107, 1642–1662.
- Gans, P. B. (1997). Large-magnitude Oligo-Miocene extension in southern Sonora: Implications for the Tectonic evolution of northwest Mexico. *Tectonics*, 16 (3), 388–408.
- González-Escobar, M., Reyes-Martínez, C.S., Gallegos-Castillo, C.A., Arregui-Ojeda, Sergio, M. Masache-Román, Edgar A. (2024). Basin Style Variation Along a Transform Fault: Southern Colorado River Delta, Baja California, México. *Pure and Applied Geophysics*. (2024). <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03561-6>.
- González-Escobar, M., Suárez-Vidal, F., Sojo-Amézquita, A., Gallardo-Mata C.G., Martín-Barajas, A. (2014). Consag Basin: northern Gulf of California, evidence of generation of new crust, based on seismic reflection data, *International Geology Review*, 56:11, 1315-1331, DOI:10.1080/00206814.2014.941023
- González-Escobar, M., Aguilar-Campos, C., Suárez-Vidal, F. Martín-Barajas, A. (2009). Geometry of the Wagner basin, upper Gulf of California based on seismic reflections, *International Geology Review*, 51:2, 133-144, DOI: <https://doi.org/10.1080/00206810802615124>.
- González-Fernández, A., Danobeitia, J. J., Delgado-Argote, L., Michaud, F., Cordoba, D., Bartolome, R. (2005). Mode of extension and rifting history of upper Tiburon and upper Delfin basins, northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 110, 1–17.
- Lizarralde, D., Axen, G.J., Brown, H.E., Fletcher, J.M., Antonio González-Fernández, A., Harding, A.J., Holbrook, W.S., Kent, G.M., Paramo, P., Sutherland, F., Umhoefer, P.J. (2007). Variation in styles of rifting in the Gulf of California. *Nature*, 448, 466–469.
- Lonsdale, P. (1989). Geology and tectonic history of the Gulf of California, in Winterer, E.L., Hussong, D., and Decker, R.W., eds., *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii*, vol. N Boulder, CO, Geological Society of America, *Geology of North America*, 499–522.
- Lomnitz, C., Allen, C., Brune, J., Thatcher, W. (1970). Sismicidad y tectónica de la región norte del Golfo de California, México, resultados preliminares. *Geofísica Internacional* 10(2), 37-48.
- Mar-Hernández, E., González-Escobar, M., Martín-Barajas, A. (2012). Tectonic framework of Tiburon Basin, Gulf of California, from seismic reflection evidence, *International Geology Review*, 54:11, 1271-1283, DOI: 10.1080/00206814.2011.636988.
- Martín-Barajas, A., González-Escobar, M., Pacheco, M., Mastache, A., Gallegos-Castillo, C., Mendoza-Borunda, R., Arregui, S. (2020). Sedimentary basin thickness, architecture and evolution in the Gulf of California. In: *The thermal evolution of rifting and the transition to passive margins in the area of Gulf of California*, Phase 1 Report, Ensenada, México, División Ciencias de la Tierra, CICESE, 85 p.

- Moore D. G., Curray, J. R. (1982). Geologic and tectonic history of the Gulf of California, Initial Reports DSDP, 64:m Washington (U.S. Govt. Printing Office), p. 1279-1294.
- Nicholson, C., Sorlien, C. C., Atwater, T., Crowell, J. C., Luyendyk, B. P.. (1994). Microplate capture, rotation of the Western Transverse Ranges, and initiation of the San Andreas transform as a low-angle fault system, *Geology*, 22, 491–495.
- Oskin, M., Stock, J., Martín-Barajas, A. (2001). Rapid localization of Pacific-North America plate motion in the Gulf of California. *Geology*, 29, 459–462.
- Oskin, M., Stock, J.M. (2003). Marine incursion synchronous with plate-boundary localization in the Gulf of California. *Geology*, 31, 23–26.
- Persaud, P., Stock, J. M., Steckler, M. S., Martín-Barajas, A., Diebold, J. B., González-Fernández, A., Mountain, G. S. (2003). Active deformation and shallow structure of the Wagner, Consag, and Delfín Basins, northern Gulf of California, México, *J. Geophys. Res.*, 108(B7), 2355, doi:10.1029/2002JB001937.
- Plattner, C., Malservisi, R., Dixon, T.H., LaFemina, P., Sella, G.F., Fletcher, J., Suarez-Vidal, F. (2007). New constraints on relative motion between the Pacific Plate and Baja California microplate (Mexico) from GPS measurements. *Geophys. J. Int.*, 170, 1373–1380. doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03494.
- RESNOM (2017). Red Sísmica del Noroeste de México, Departamento de Sismología CICESE, todos los derechos reservados 2013 - 2017. doi.org/10.7914/SN/BC.
- Sánchez-Barra, A.C., González-Escobar, M., Ferrari, L. (2022). Subsurface structure of the Mazatlán basin, southeastern Gulf of California, Mexico, from seismic reflection and well data, *Tectonophysics*, Volume 838, doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229505.
- SCEC (2013). Southern California Earthquake Center. Caltech. Dataset. doi: 10.7909/C3WD3xH1.
- Spencer, J.E., Normark, W.R. (1979). Tosco-Abrejos fault zone: A Neogene transform plate boundary within the Pacific margin of south Baja California, Mexico. *Geology*, 7, 554–557.
- 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. <https://doi.org/10.1029/TC008i001p00099>.
- Suárez-Vidal, F., Mendoza-Borunda, R., Navarrete-Zamarripa, L.M., Ramírez, J., Glowacka, E. (2008). Shape and dimensions of the Cerro Prieto pull-apart basin, Mexicali, Baja California, México, based on the regional seismic record and surface structures. *Int. Geol. Rev.* 50, 636–649. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.50.7.636>.
- Sutherland, F.H., 2006, Continental rifting across the southern Gulf of California [Ph.D. thesis]: San Diego, University of California, 189 p.
- Sutherland, F.H., Kent, G.M., Harding, A.J., Umhoefer, P.J., Driscoll, N.W., Lizarralde, D., Fletcher, J.M., Axen, G.J., Holbrook, W.S., González-Fernández, A., Lonsdale, P. (2012) *Geosphere* August 2012; v. 8; no. 4; p. 752–770; doi:10.1130/GES00770.1.

Umhoefer, P.J., M.H. Darin, S.E. K. Bennett, L.A. Skinner, R. J. Dorsey, E. Oskin (2018). Breaching of strike-slip faults and successive flooding of pull-apart basins to form the Gulf of California seaway from ca. 8-6 ma. *Geology*, 46, 8.

Umhoefer, P.J., Dorsey, R.J., Renne, P.R. (1994). Tectonics of the Pliocene Loreto basin, Baja California Sur, Mexico, and evolution of the Gulf of California. *Geology*, 22, 649–652.

van Wijk, J., Axen, G., Abera, A. (2017). Initiation, evolution and extinction of pull-apart basin: Implications for opening of the Gulf of California. *Tectonophysics*, 719-720, p. 37-50. doi: 10.1016/j.tecto.2017.04.019.

Wei, S., Fielding, E., Leprince, S., Sladen, A., Avouac, J.-P., Helmberger, D., R. Chu, M. Simons, K. Hudnut, T., Herring R. (2011). Superficial simplicity of the 2010 El Mayor–Cucapah earthquake of Baja California in Mexico. *Nat. Geosci.* 4 (9), 615–618. <https://doi.org/10.1038/ngeo121>.

Manuscrito recibido: 17 enero 2025

Recepción del manuscrito corregido: 12 marzo 2025

Manuscrito aceptado: 18 marzo 2025