

Base de datos geocientíficos del fondo marino de la porción sur del Golfo de California: Un acercamiento al mapeo geológico submarino

Trabajo de grado para optar por el título de geólogo

Autor:

Daniel Enrique Monterrosa Puente

Asesor:

Geólogo: PhD, José Fernando Duque Trujillo

Escuela de Ciencias

Departamento de Ciencias de la Tierra

Universidad EAFIT

2019-02

Este trabajo se lo dedico a mi madre.

Agradecimientos

Este trabajo fue posible en cierta medida gracias a los datos personales aportados por: Jose Duque Trujillo [EAFIT] y Luca Ferrari [UNAM]. También se le agradece a este primero por el seguimiento y la ayuda en el desarrollo del documento escrito. Mención especial a los laboratorios de Geología de la universidad EAFIT, por brindar el espacio necesario; a la planta de docentes del pregrado de ingeniería de sistemas y geología de la Universidad EAFIT, por su completa disposición para resolver dudas académicas; y al proyecto QGIS, que gracias al software desarrollado por estos, se pudo gestionar la base de datos y los datos espaciales trabajados sin ningún impacto económico.

Resumen

En este trabajo se presenta la primera base de datos digital de la porción sur del Golfo de California a partir información geológica submarina disponible. El área cubierta en esta recopilación es de aproximadamente $\sim 200.000 \text{ km}^2$, y está delimitada entre las latitudes $28^\circ - 20^\circ$ norte, y las longitudes $115^\circ - 104^\circ$ oeste, bordeando con los estados de Sonora, Sinaloa, Nayarit, Jalisco y Baja California Sur de los Estados Unidos Mexicanos. Los datos geológicos fueron recopilados de diferentes bases de datos digitales y publicaciones disponibles en la literatura. Posteriormente fueron editados y unificados utilizando el software libre QGIS, y el contenedor de bases de datos GeoPackage. Se extrajeron y organizaron 1200 muestras litológicas de fondo marino, de las cuales 170 presentan dataciones; 19 perfiles sísmicos previamente interpretados y 20 diagramas cartográficos de diferentes autores. También se adquirieron modelos geofísicos globales de anomalía magnética; gravitacional con corrección de aire libre y Bouguer; modelos digitales de batimetría; y la geología continental 1:250.000 del Servicio Geológico Mexicano para correlacionar con el margen submarino. A partir de esta información se desarrolló un acercamiento a la cartografía geológica y la delimitación tectónica generalizada del fondo marino. Se clasificaron los eventos geológicos relevantes del margen continental desde el mesozoico tardío hasta el presente, y se correlacionaron con el muestreo submarino. Se digitalizaron las fallas y estructuras del margen marino, y se representaron en un diagrama de rosas junto con las del margen continental para determinar las posibles distribuciones de los esfuerzos principales. Por último se hizo una caracterización espacial del proceso de rift oblicuo actual de la porción sur del Golfo de California, complementándose con las descripciones previamente realizadas en la literatura.

Palabras clave: Porción sur del Golfo de California; Base de datos; software de código libre; geología submarina; límites tectónicos; digitalización

Contenido

| | |
|--|-----------|
| 1. Capítulo I: Introducción y generalidades..... | 1 |
| 1.1. Introducción..... | 1 |
| 1.2. Objetivos | 8 |
| 1.2.1. <i>Objetivo general</i> | 8 |
| 1.2.2. <i>Objetivos específicos</i> | 8 |
| 1.3. Bases de datos y su relación con las geociencias | 8 |
| 2. Capítulo II: Antecedentes | 11 |
| 2.1. Marco geológico de la porción sur del Golfo de California..... | 11 |
| 2.1.1. <i>Basamento Pre-Laramide (> 100 Ma)</i> | 12 |
| 2.1.2. <i>Magmatismo Laramide (~100 – 50 Ma)</i> | 14 |
| 2.1.3. <i>Vulcanismo de extensión temprana (~30 – 12,5 Ma)</i> | 15 |
| 2.1.4. <i>Vulcanismo transtensional y CVTM (~12,5 Ma – presente)</i> | 18 |
| 2.2. Bases de datos y recopilaciones bibliográficas previas | 20 |
| 3. Capítulo III: Metodología | 24 |
| 3.1. Limitaciones y condicionantes previos | 24 |
| 3.2. Primera etapa: Búsqueda, extracción y organización | 27 |
| 3.3. Segunda etapa: Visualización y procesamiento..... | 28 |
| 3.4. Tercera etapa: Integración | 30 |

| | |
|--|-----------|
| 4. Capítulo IV: Resultados | 32 |
| 4.1. Introducción a la base de datos - (GoC_DB)..... | 32 |
| 4.2. Contenido de la base de datos - (GoC_DB)..... | 35 |
| 4.2.1. <i>Geografía (0_gg)</i> | 35 |
| 4.2.2. <i>Geología submarina (1_go)</i> | 38 |
| 4.2.3. <i>Geología continental (2_goc)</i> | 42 |
| 4.2.4. <i>Batimetría (3_bat)</i> | 47 |
| 4.2.5. <i>Anomalía magnética (4_amg)</i> | 48 |
| 4.2.6. <i>Anomalía gravitacional (5_agr)</i> | 50 |
| 4.2.7. <i>Modelos georreferenciados (6_grf)</i> | 51 |
| 4.2.8. <i>Tablas no espaciales (7_ne)</i> | 53 |
| 5. Capítulo V Discusión y Conclusiones | 56 |
| 5.1. Discusión..... | 56 |
| 5.1.1. <i>Refinamiento del límite corteza oceánica – corteza continental de la porción sur del Golfo de California a partir de la base de datos desarrollada</i> | 56 |
| 5.1.2. <i>Resumen de las características geológicas principales del fondo marino a partir de la base de datos de la porción sur del Golfo de California</i> | 65 |
| 5.1.3. <i>Análisis estructural de la porción sur del Golfo de California</i> | 67 |
| 5.1.4. <i>Geología submarina de la porción sur del Golfo de California</i> | 70 |
| 5.1.5. <i>Características del rift oblicuo actual (PTG)</i> | 72 |
| 5.2. Recomendaciones..... | 78 |
| 5.3. Conclusiones..... | 80 |

Referencias83

Anexos93

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| FIGURA 1. Localización del Golfo de California y la configuración tectónica actual al occidente de Norteamérica..... | 2 |
| FIGURA 2. Variaciones en el límite entre la corteza oceánica y continental y delimitaciones tectónicas entre diferentes autores a lo largo de la porción sur del Golfo de California. | 7 |
| FIGURA 3. Distribución espaciotemporal de los principales eventos geológicos de la porción sur del Golfo de California..... | 13 |
| FIGURA 4. Metodología empleada en la elaboración de la base de datos geocientíficos de la porción sur del Golfo de California; dividida en tres etapas que fueron establecidas a partir de los objetivos específicos planteados en el presente trabajo. | 25 |
| FIGURA 5. Características estructurales de la base de datos de la porción sur del Golfo de California (A). Relaciones entre la tabla de metadatos bibliográficos y los archivos vectoriales de muestreo submarino y localización de perfiles sísmicos interpretados (B). | 34 |
| FIGURA 6. Representación espacial de las entidades almacenadas en la base de datos de la porción sur del Golfo de California. | 37 |
| FIGURA 7. Distribución espacial de las muestras submarinas recopiladas y los límites tectónicos planteados por Bird, 2003 en la porción sur del Golfo de California (v1_gos_m-litologia_SGC & v1_gos_límites-tectonicos(bird-2003)_SGC)..... | 40 |
| FIGURA 8. Distribución espaciotemporal de la geología continental (v2_goc_geologia(sgm)_SGC & v2_goc_estructuras(sgm)_SGC) y submarina (v1_gos_m-litologia_SGC) incorporadas en la base de datos de la porción sur del Golfo de | 44 |

- FIGURA 9.** Resumen y análisis de la información integrada en base de datos de la porción sur del Golfo de California desarrollada en el presente trabajo: delimitación de las cortezas oceánica y continental; distribución espaciotemporal de la geología57
- FIGURA 10.** Esquema generalizado de los tipos de cortezas y sus características, ambientado en el Golfo de California según el ambiente tectónico actual -extensión-.59
- FIGURA 11.** Identificación del el tipo y los límites de cortezas en la boca del Golfo de California (Los Cabos – Puerto Vallarta) a través de la correlación transversal de la información integrada en la base de datos de la porción sur del Golfo de California desarrollada en presente trabajo.62
- FIGURA 12.** Representación espacial de los nuevos archivos vectoriales desarrollados a partir de la información integrada en la base de datos de la porción sur del Golfo de California del presente trabajo: fallas submarinas (v1_gos_fallas_SGC) (**A**), y límites tectónicos entre la corteza oceánica y continental (v1_gos_limites-tectonicos_SGC) (**B**).66
- FIGURA 13.** Heterogeneidades en la simetría y temporalidad de formación de corteza de afinidad oceánico entre los diferentes sistemas de expansión de la porción sur del Golfo de California. ..73
- FIGURA 14.** Heterogeneidades en la anomalía gravitacional con corrección de Bouguer (**A**) y anomalía magnética (**B**) a lo largo del fondo marino de la porción sur del Golfo de California. .74

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| TABLA 1. Contenido de la base de datos geocientíficos submarinos de la porción sur del Golfo de California - (GoC_DB)..... | 33 |
| TABLA 2. Diagramas geológicos y perfiles interpretados extraídos de la bibliografía e integrados en la base de datos de la porción sur del Golfo de California | 52 |
| TABLA 3. Estructura de la tabla de metadatos bibliográficos integrada en la base de datos de la porción sur del Golfo de California (t7_tns_bibliografia_GC) | 54 |
| TABLA 4. Recopilación de las características distintivas de la corteza oceánica y continental entre diferentes autores. | 59 |

1. Capítulo I:

Introducción y generalidades

1.1. Introducción

El Golfo de California o Mar de Cortés es la porción del océano Pacífico que se encuentra entre la península de Baja California y el margen continental mexicano, bordeando los estados de Sonora, Sinaloa, Baja California y Baja California Sur. Tiene una longitud de ~1.200 km desde su boca, situada entre la punta de la península de Baja California y Sinaloa al sur, hasta la desembocadura del río Colorado al norte, y su ancho varía entre ~100 – 150 km en el interior, pudiendo llegar hasta ~230 km en la boca. En total, abarca una extensión de aproximadamente ~220.000 km², y en las zonas más profundas el golfo puede alcanzar hasta 3.400 m de profundidad (Alles, 2007; Ledesma-Vázquez et al., 2008; Lonsdale, 1989) (**FIGURA 1**).

Esta cuenca marina es producto del desplazamiento oblicuo hacia el noroeste de la placa Pacífico con respecto a la placa Norteamérica una vez finalizada la subducción en el margen occidental norteamericano hace aproximadamente ~12,5 Ma. (Mioceno Medio) (e.g. Lonsdale, 1989, 1991). Dicha placa incorporó un fragmento de corteza de la última, delimitado por el adelgazamiento de extensiones previas, conocido como la microplaca Baja California, y empezó a formar un sistema de rift principalmente oblicuo en la actual localización del Golfo de California, que ha desarrollar corteza oceánica desde el Plioceno temprano (Lonsdale, 1989, 1991; Atwater, 1970; Plattner et al., 2007; Fletcher

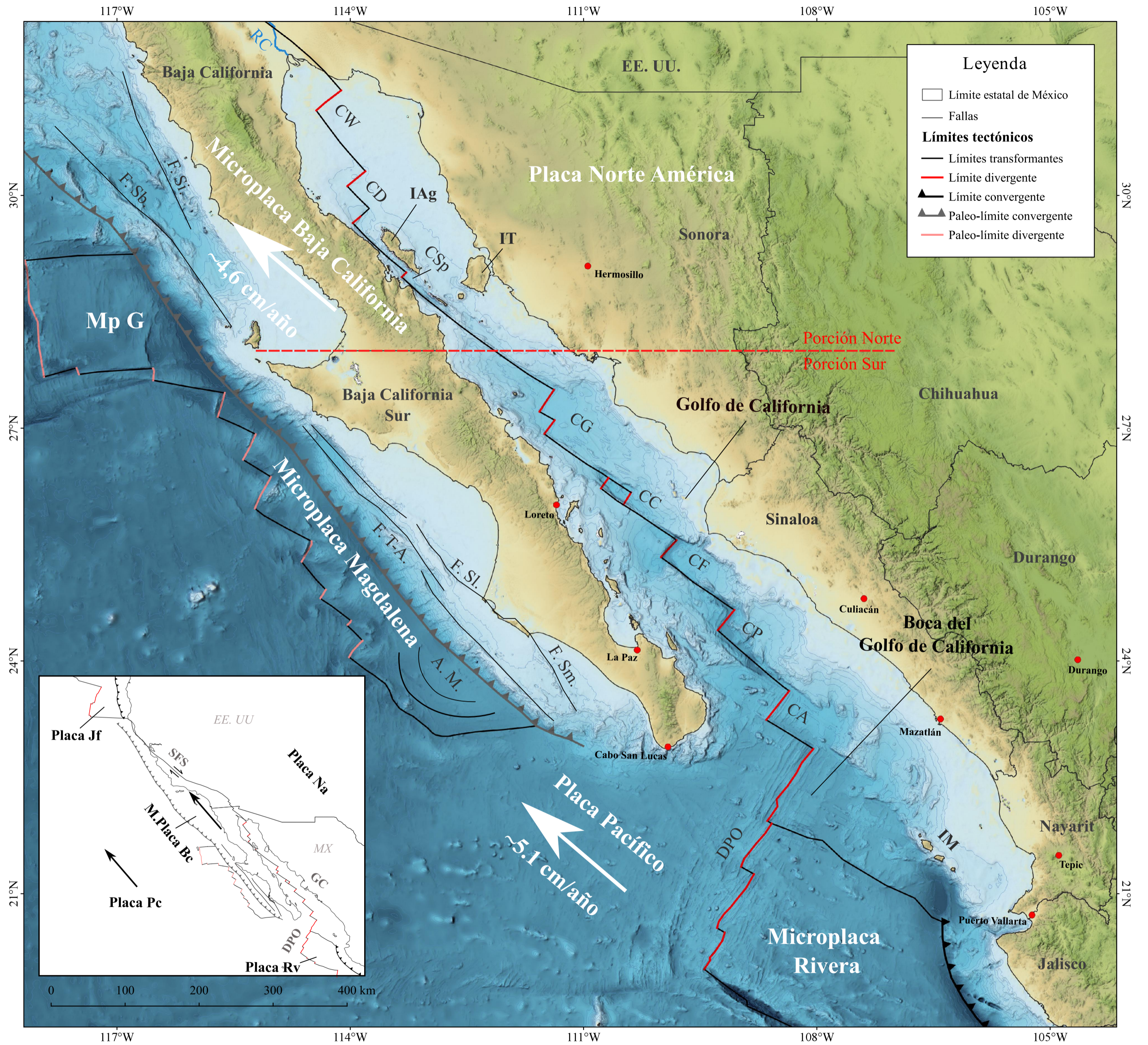


FIGURA 1. Localización del Golfo de California y la configuración tectónica actual al occidente de Norteamérica. Las fallas submarinas fueron tomadas de Ferrari et al., 2013 y Fletcher et al., 2007. Las velocidades de desplazamiento de la placa Pacífico y la microplaca Baja California fueron tomadas de DeMets, 1995 y Plattner et al., 2007. La delimitación de las placas fue modificada de Bird, 2003. EE. UU. — Estados Unidos de América; CW — Cuenca Wagner; CD — Cuenca Delfín; CSp — Cuenca Sal Si Puedes; CG — Cuenca Guaymas; CC — Cuenca Carmen; CF — Cuenca Farallón; CP — Cuenca Pescadero; C.A. — Cuenca Alarcón; DPO — Dorsal del Pacífico Oriental; A.M. — Abanico Magdalena; IM — Islas Marias; IAg — Isla Ángel de la Guarda; F. T-A. — Falla Tosco-Abrejos; Mp G — Microplaca Guadalupe; F. Sb. — Falla San Benito; F. Sm. — Falla Santa Margarita; F. Sl. — Falla San Lorenzo; F. Si. — Falla San Isidro; RC — río Colorado; Na — Norteamérica; Bc — Baja California; Rv — Riviera; Jf — Juan de Fuca; Pc — Pacífico; GC — Golfo de California; SFS — Sistema de fallas de San Andres; MX — México.

et al., 2007; Ferrari et al., 2018, 2013; Umhoefer et al., 2018; Lizarralde et al., 2007).

Actualmente la placa Pacífico se separa a una tasa de 5,1 cm/año de la Placa Norteamericana, mientras que, pese a estar incorporada, la microplaca Baja California se separa a una tasa de 4,6 cm/año; esta diferencia en la velocidad de desplazamiento evidencia la parcialidad de la incorporación y la rigidez de este bloque continental (Plattner et al., 2007; DeMets, 1995), que además muestra evidencias cuaternarias de resistencia en contra del desplazamiento de la Placa Pacífico en los alrededores del borde occidente de la península, en la antigua zona de subducción (e.g. Dixon et al., 2000; Hauksson et al., 2014; Fletcher & Munguia, 2000; Brothers et al., 2012; Michaud et al., 2004).

El límite tectónico entre estas placas se sitúa en el centro del Golfo de California. En la parte sur del Golfo este límite está representado por extremo noreste de la Dorsal del Pacífico Oriental. Este imponente MOR (Mid-Ocean Ridge) que se despliega a lo largo del océano Pacífico separa ambas porciones corticales a través de centros de expansión alargados con dirección N-NE, con forma de cuencas “pull-apart” conectadas a través de largos sistemas de fallas transformantes con dirección NW, formando un patrón chevron o zigzag a lo largo del Golfo de California (Lonsdale et al., 1989; Duque-Trujillo et al., 2015; Larson, 1972).

Al llegar a al valle Salton, al norte de la desembocadura del río Colorado, este sistema submarino de rift se convierte en el sistema de fallas lateral derecha de San Andrés, el cual se encuentra desplazando hacia el noroeste parte del estado de California de EE. UU. (Ledesma-Vásquez et al., 2008; Alles, 2007, 2011). Todo este sistema

complejo de fallas de rumbo y cuencas distensivas forman el sistema transformante San Andres – Golfo de California (Hernández; 2010). Esta zona es foco de muchas investigaciones que buscan establecer su temporalidad, cinemática y evolución geológica (e.g. Fletcher et al., 2007; Umhoefer et al., 2011; 2018; Ferrari et al., 2013, 2018), puesto que representa un rift en etapa temprana del proceso de oceanización, y su entendimiento puede ayudar a comprender la tectónica global y específicamente la compleja evolución tectónica del occidente norteamericano.

Como el límite tectónico actual del margen occidental de Norteamérica se encuentra sumergido bajo el Golfo de California, gran parte de las evidencias de los eventos relacionados con la extensión oblicua allí ocurrida se encuentran en el fondo marino, y por lo tanto fuera del alcance de los geólogos, complicando la obtención de evidencias que permitan establecer una evolución.

Por su gran escala, el Golfo de California es estudiado principalmente en dos partes: la porción norte, y la porción sur; en este trabajo, dicha delimitación se realizará a partir de la latitud 28° N -límite político entre los estados de Baja California y Baja California Sur- (**FIGURA 1**). La mayoría de las investigaciones en el golfo suelen ser locales, y se enfocan de manera individual en una de estas porciones, ya sea al norte (e.g. Aragón-Arreola & Martín-Barajas, 2007; Gastil, 1975; Oskin & Stock, 2003a, 2003b; Bennett, Oskin, et al., 2016) o la sur (e.g. Duque-Trujillo et al., 2015; Ferrari et al., 2013; Lizarralde et al., 2007; Sutherland et al., 2012; Fletcher et al.; 2007, Umhoefer et al., 2001). Poco a poco han aparecido proyectos e investigaciones que han recopilado esta información para desarrollar modelos a escala regional que sintetizan la evolución

geológica del Golfo de California (e.g. Ferrari et al., 2013, 2018; Umhoefer et al., 2011, 2018; Bennett, Darin, et al., 2016; Bryan et al., 2014), pero, dejan en claro que aún hace falta analizar la información existente y recolectar más datos para respaldar y perfeccionar sus modelos e hipótesis.

Una de las problemáticas que afecta la interpretación geológica del Golfo de California es la escasez de información a causa de lo costoso e ineficiente que implica hacer recolección de datos en el fondo marino en comparación con el campo en tierra firme. Sumado a esto, los cruceros investigativos y sus respectivas plataformas suelen manejar la información de manera confidencial y limitada por largos o indefinidos periodos de tiempo, condicionando aún más el acceso a los datos submarinos.

La mayor deficiencia de datos en el Golfo de California se presenta en la porción sur, puesto que esta abarca más extensión submarina que la porción norte -76% del área del Golfo, incluyendo la boca -. Esta solo ha sido foco de algunos estudios que aportan datos e información localizada, que se encuentra distribuida por la zona, pero que no cubre la totalidad de la extensión, siendo la boca del Golfo, las islas al interior del Golfo, las cuencas Alarcón, Farallones, Guaymas, y Pescadero, y el margen oriental sumergido de la península de Baja California las zonas que más han sido estudiadas (e.g. Duque-Trujillo et al., 2015, Lizarralde et al., 2007; Lonsdale, 1989, 1991; Sutherland et al., 2012; Páramo et al., 2008; Piñero Lajas, 2008; Hernández, 2010; Curray & Moore, 1979; Lewis & Robinson, 1979; Yeats & Haq, 1978).

Otra problemática en la porción sur del Golfo de California es que muchas de las investigaciones desarrolladas no tienen en cuenta datos e información que se han

publicada con anterioridad; esto es evidente cuando se analiza la delimitación de las estructuras tectónicas principales (e.g. el límite entre corteza oceánica y continental del Golfo de California) definidas por diferentes autores (**FIGURA 2**). En este ejemplo se muestra claramente como los diferentes modelos presentan variaciones e incongruencias con respecto a otros previamente realizados, dejando en duda cual exactamente es la disposición de estos límites. Esta situación expone las condiciones de la información geológica submarina en el Golfo de California, la cual no se está gestionando adecuadamente a pesar de ser valiosa por su condición de escasez; además de mostrar la falta de un referente claro acerca de la información o datos disponibles, como puede ser la cartografía del fondo marino.

En vista del creciente interés por entender la evolución tectónica y las características y movimientos de los bloques corticales; interpretar los fenómenos geológicos; y describir los procesos tectónicos que afectaron la porción sur del Golfo de California (e.g. Ferrari et al., 2018; Umhoefer et al., 2018; Bennett, Darin, et al., 2016; Bryan et al., 2014; Duque-Trujillo et al., 2015; Van Wijk et al., 2019; Fernández & Pérez-Campos, 2017; Persaud et al., 2017); como un primer acercamiento al almacenamiento e integración de los datos geocientíficos submarinos que han estado apareciendo rápidamente en la literatura, el presente trabajo busca desarrollar la primera base de datos de la geología del fondo marino de la porción sur del Golfo de California. Esta base de datos integrará la información geocientífica necesaria para generar una cartografía generalizada de la geología submarina, que muestre la disposición de la información existente y la distribución espacial de los principales rasgos geológicos de la

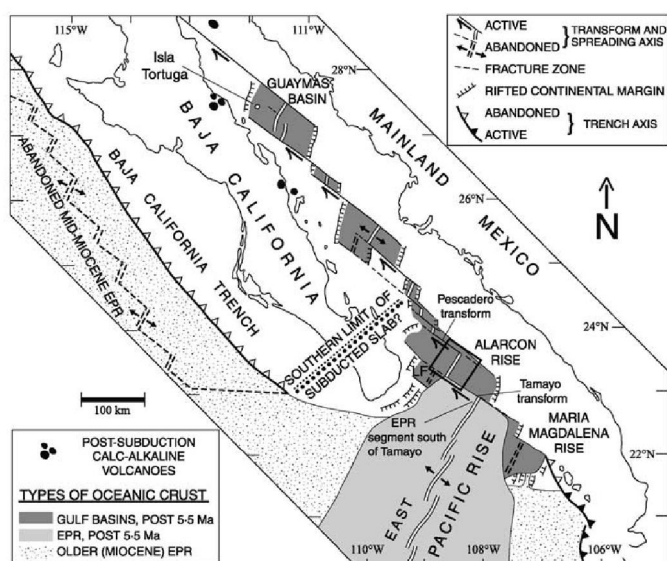


Figura 1. (Castillo et al., 2002)

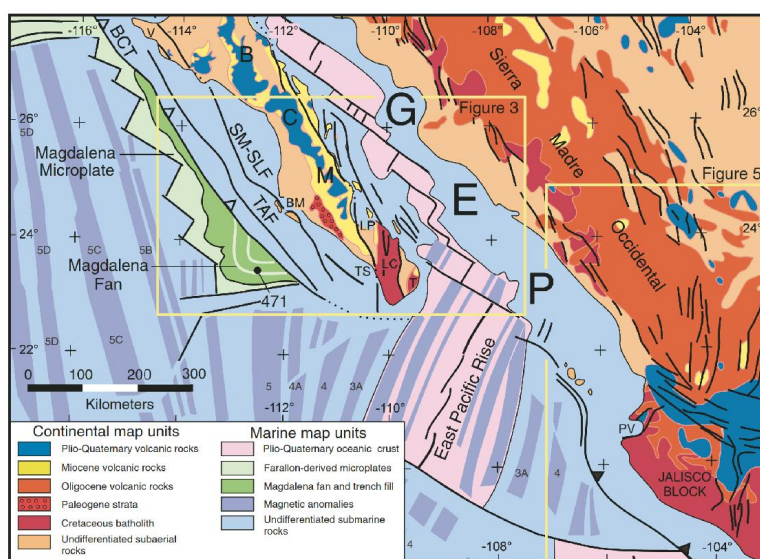


Figura 2. (Fletcher et al., 2007)

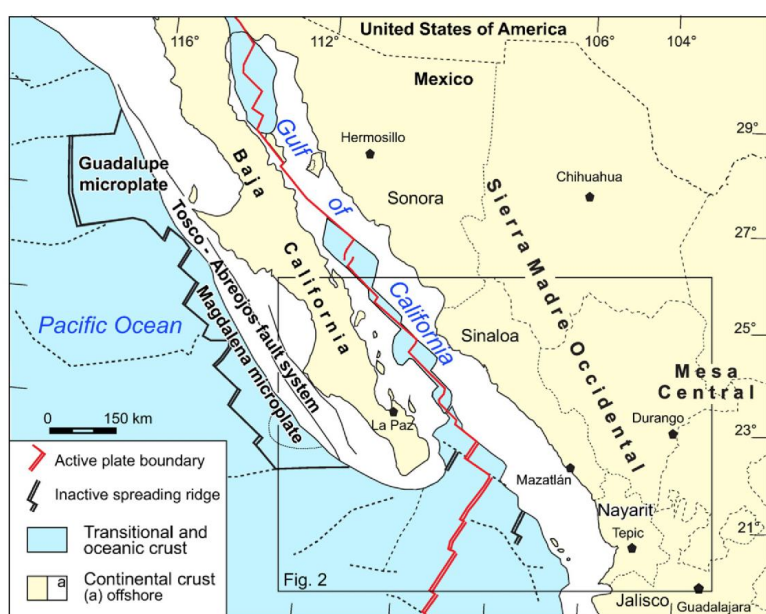


Figura 1. (Balestrieri et al., 2007)

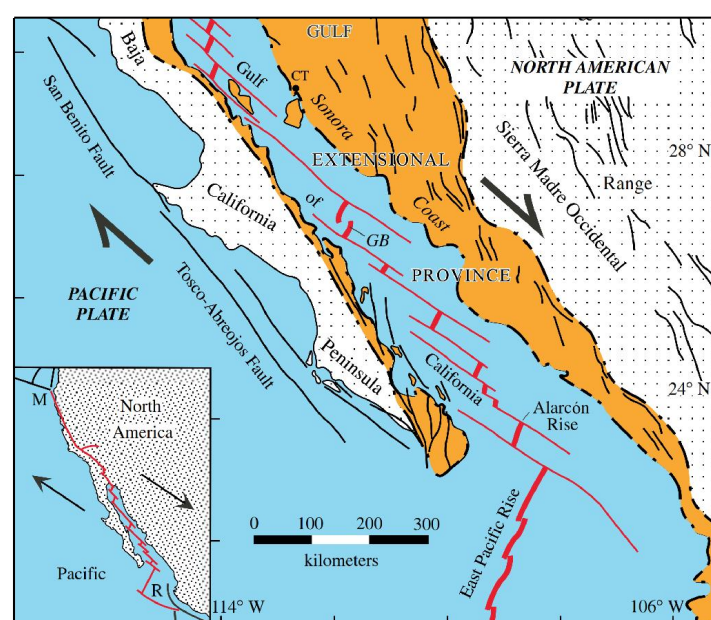


Figura 1. (Alvarez et al., 2009)

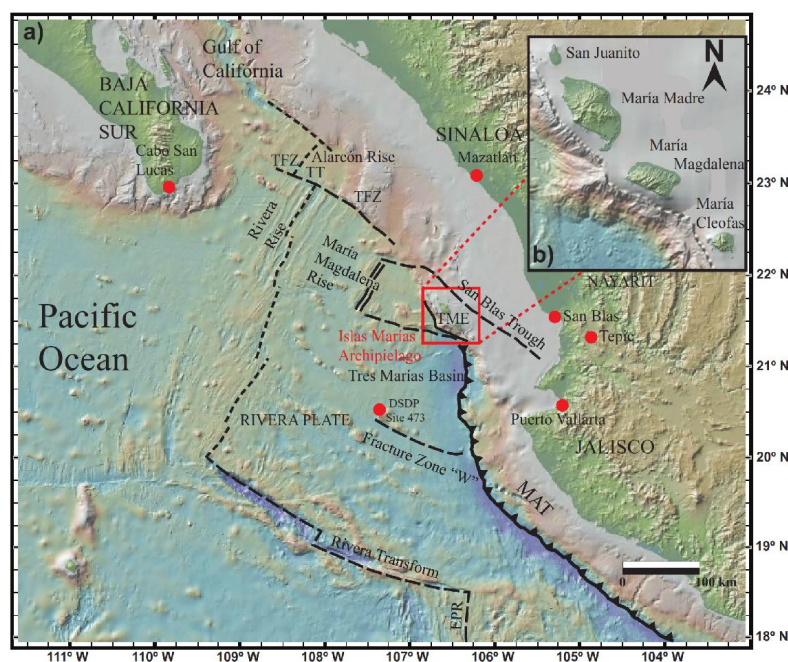


Figura 1. (Pompa-Mera et al., 2007)

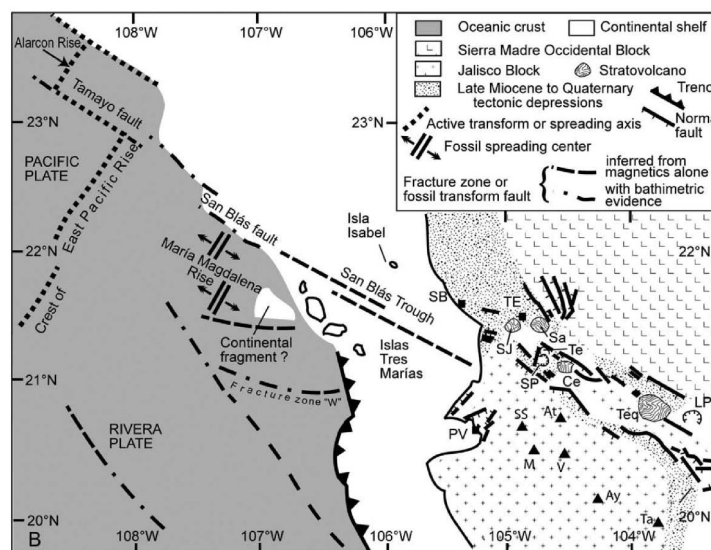


Figura 1.(B) (Housh et al., 2010)

FIGURA 2. Variaciones en el límite entre la corteza oceánica y continental y delimitaciones tectónicas entre diferentes autores a lo largo de la porción sur del Golfo de California.

porción sur del Golfo de California, como sería la posición del límite de las cortezas oceánica y continental; todo esto en formato digital, para que puedan ser modificados e incorporados eficientemente como referencia en nuevas investigaciones.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general.

Unificar la información bibliográfica geocientífica submarina disponible en la porción sur del Golfo de California en una base de datos capaz de delimitar y caracterizar la geología del fondo marino.

1.2.2. Objetivos específicos.

- **1. *Recolectar y organizar*** los datos geológicos submarinos presentes en la porción sur del Golfo de California.
- **2. *Estandarizar y sintetizar*** los datos geológicos de las diferentes fuentes recolectadas que representen la misma información.
- **3. *Estructurar*** los datos en un sistema de ordenamiento lógico que sea simple y eficiente.

1.3. Bases de datos y su relación con las geociencias

Antes de continuar con el presente trabajo, es necesario hacer algunas explicaciones sobre el producto a desarrollar para la porción sur del Golfo de California.

Hoy en día la tecnología ha permitido que se puedan almacenar grandes volúmenes de datos de manera digital en pequeños espacios. En informática, una simple colección de datos relacionados se conoce como una *base de datos (DB)*. Los programas que permiten interactuar, gestionar y acceder a los datos de estas bases de datos son llamados *sistemas de gestión de bases de datos (DBMS)*. Una de las cualidades de estos programas es la capacidad de gestionar y estructurar bases de datos según diferentes *modelos de bases de datos (DM)*. Estos modelos son un conjunto de conceptos abstractos que se aplican en la estructuración de las bases de datos para determinar la manera en la que serán almacenados y relacionados los datos, es decir, el comportamiento de la base de datos. Existen diferentes tipos de modelos que se acoplan a las necesidades de cada usuario. Uno de los modelos más utilizados hoy en día es el *modelo relacional*, en el cual se almacenan diferentes grupos de datos interrelacionados en tablas, para posteriormente establecer diferentes relaciones entre estas, y de esta manera determinar el comportamiento de la búsqueda o interacción del usuario con los datos. El propósito de los DBMS y DM es poder administrar de manera conveniente y eficiente la información utilizada por cualquier profesional. (Silberschatz et al, 2019).

En las geociencias se suelen recolectar grandes volúmenes de datos para poder hacer interpretaciones de la naturaleza, por lo que es común que nos relacionemos con bases de datos y los DBMS. Una de las particularidades de los datos recolectados por los geocientíficos es la relación de estos con el entorno, siendo necesario trabajar principalmente con datos espaciales. Los datos espaciales son cualquier tipo de

información que esté relacionada con una localización específica en la superficie terrestre; para este tipo de datos se utilizan los *sistemas de información geográfica (SIG)* (e.g. QGIS), herramientas que permiten manipular, analizar y procesar datos espaciales (Longley et al., 2005; Bonham-Carter, 1994; Gupta, 2018). Debido a que los SIG pueden trabajar con grandes cantidades de datos digitales, estos suelen ir de la mano con los DBMS, salvo que esta vez están especializados para almacenar y administrar eficientemente los datos espaciales. Un ejemplo de estos gestores de bases de datos especializados, y que además es de código libre, es PostgreSQL, el cual está estrechamente relacionado con el SIG QGIS.

Ambas herramientas, los SIG y los DBMS, son fundamentales para los geocientíficos, puesto que ayudan a potenciar la gestión, análisis y almacenamiento de los datos espaciales, los cuales son la base para las investigaciones científicas, la solución a problemáticas ambientales, y la toma de decisiones para el desarrollo de nuestra sociedad (Longley et al., 2005; Bonham-Carter, 1994; Gupta, 2018).

2. Capítulo II:

Antecedentes

2.1. Marco geológico de la porción sur del Golfo de California

Es importante entender el contexto y las características de la geología, además de la historia evolutiva de los procesos naturales que han ocurrido a lo largo de la porción sur del Golfo de California antes de poder desarrollar una base de datos con la información geocientífica disponible; de esta manera se asegura la planeación óptima de esta información, siguiendo las preguntas y problemáticas planteadas en diferentes estudios, que deben ser abordadas dentro de la base de datos.

La geología de la porción Sur del Golfo de California está llena de complejidades y contradicciones, que dependen de la recopilación de muchos datos que debe ser analizados y asociados para lograr avanzar en el conocimiento. Aunque actualmente se dispone de muchas publicaciones en la literatura sobre el Golfo, aún quedan controversias y puntos de vista contrastantes entre diferentes autores por resolver.

La transición en el margen occidental de Norteamérica entre un ambiente de subducción oblicua hasta la instalación de un sistema divergente entre las placas Pacífico y Norteamérica, que terminara con la separación de la Baja California del continente americano, se ha venido discutiendo desde las últimas décadas con la aparición de nueva información en el registro geológico tanto marino como continental (e.g. Fletcher et al., 2007, Lizarralde et al., 2007; Lonsdale, 1989, 1991; Atwater & Stock, 1998; Ferrari,

2000, 2001, 2013; Duque-Trujillo, 2014, 2015; Umhoefer, 2001, 2011; Henry et al., 2003; McDowell & Keizer, 1977; McDowell & McIntosh, 2012). Uno de los primeros hallazgos importantes en el Golfo, fue el descubrimiento del final de la subducción y comienzos de la extensión a partir 12,5 Ma (Lonsdale, 1989; Umhoefer and Dorsey, 1997; Atwater and Stock, 1998). A partir de estos trabajos se comienza a asociar la geología continental con este evento, por lo que los modelos evolutivos se empiezan a desarrollar teniendo en cuenta que el comienzo de la extensión ocurre después de periodo de tiempo (e.g. Fletcher et al., 2007; Umhoefer et al., 2011; Stock and Hodges, 1989; Lizarralde et al., 2007; Sutherland et al., 2012; Calmus et al., 2011). A medida que nuevos datos geológicos y geocronológicos estuvieron disponibles para la comunidad científica, se pudo proponer que el evento ocurrido a los 12.5Ma. podría tener un significado geológico diferente y que el proceso de extensión pudiera haber comenzado antes de lo anteriormente propuesto (Bryan et al., 2014; Duque-Trujillo et al., 2015; Ferrari et al., 2013).

Para sintetizar la configuración geológica del Golfo de California, el presente trabajo se concentrará en la recopilación de información bibliográfica reciente, con especial énfasis en trabajos recopilatorios como el realizado por Ferrari (2018). De esta manera, los eventos geológicos de la porción sur del Golfo de California se pueden dividir en cuatro grupos fundamentales según su distribución temporal (**FIGURA 3**):

2.1.1. Basamento Pre-Laramide (> 100 Ma)

Ferrari et al. (2018) simplifica una parte del basamento de la porción sur del Golfo de California como las unidades de rocas anteriores al magmatismo del Cretácico

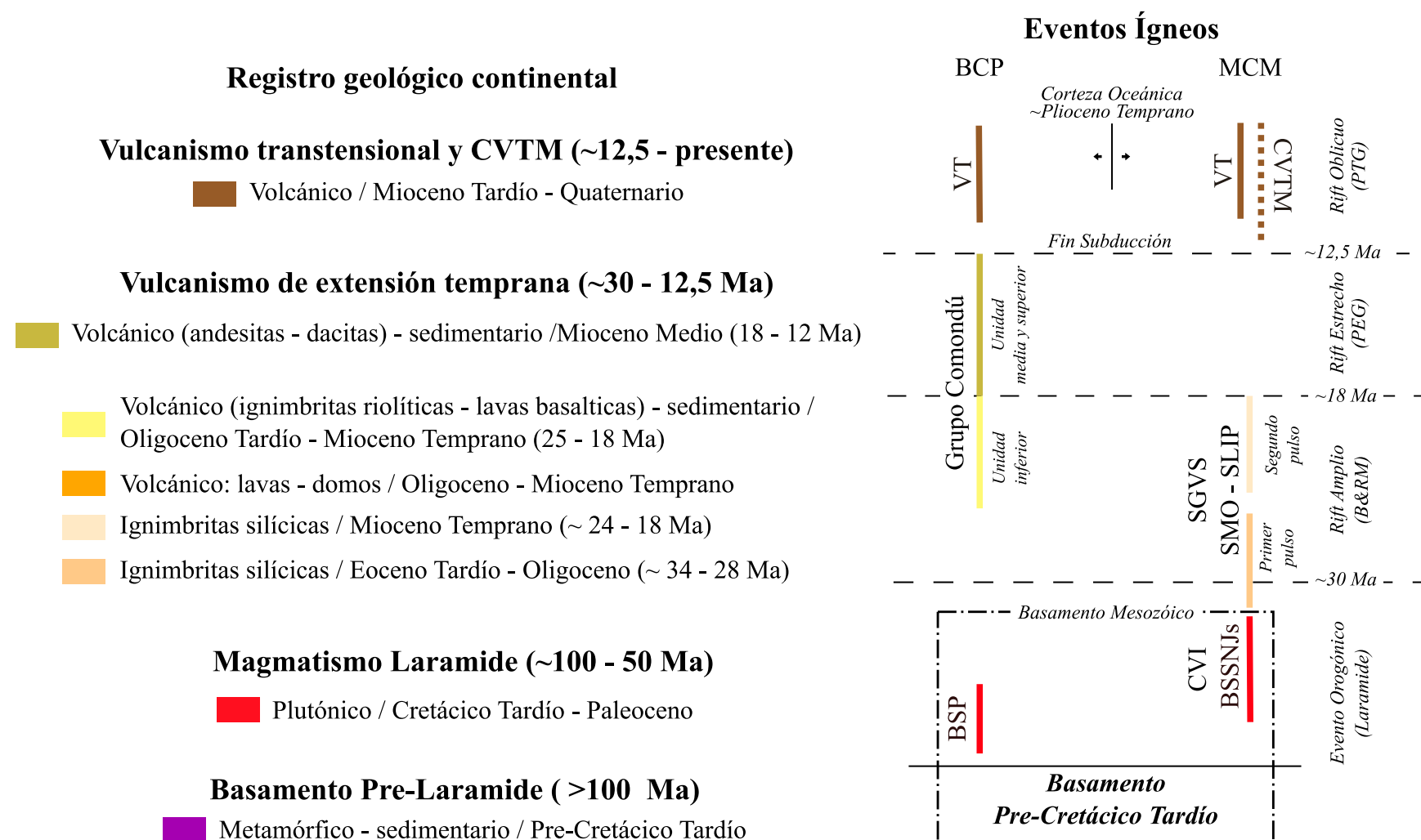
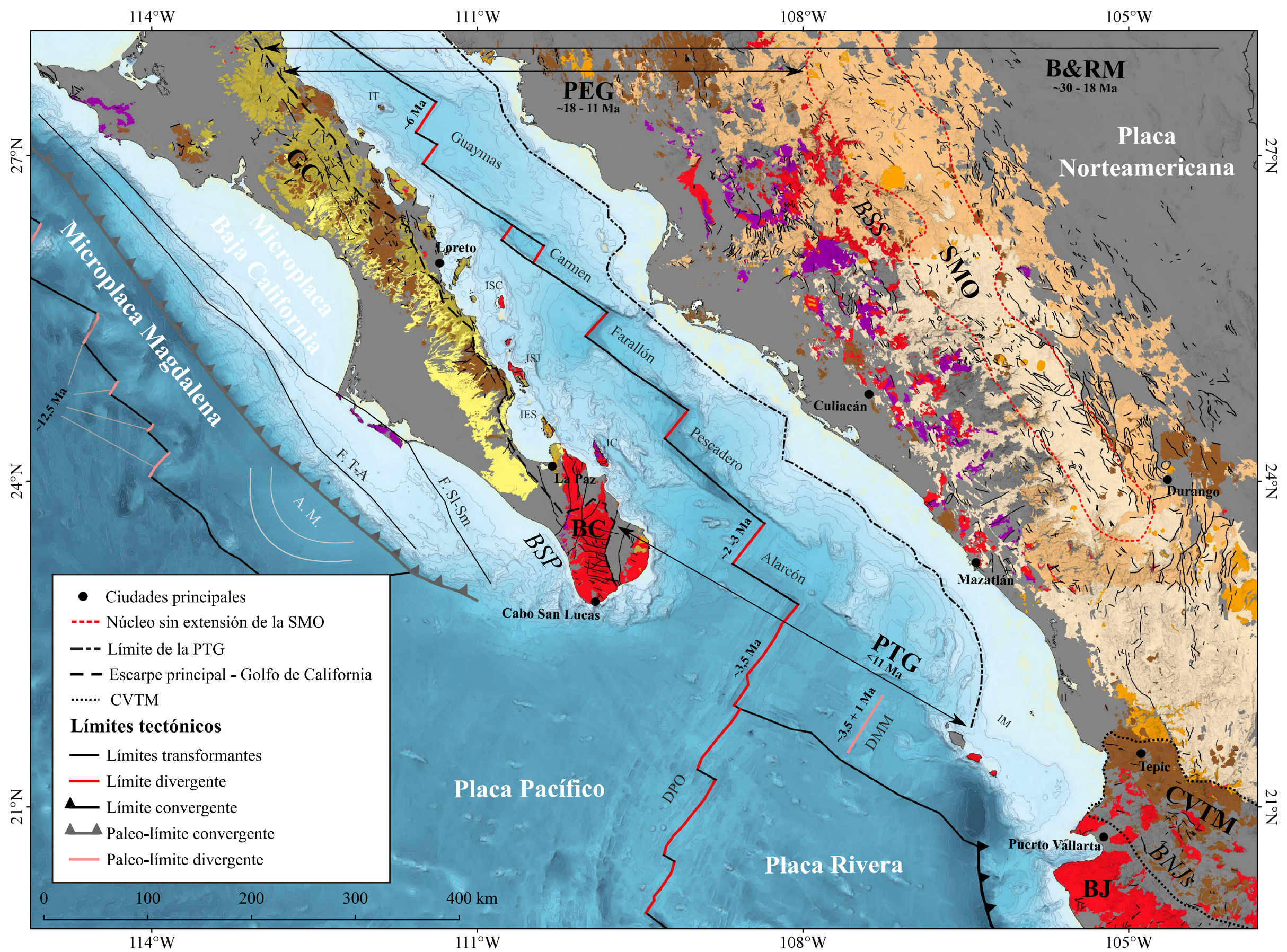


FIGURA 3. Distribución espaciotemporal de los principales eventos geológicos de la porción sur del Golfo de California. La delimitación tectónica fue modificada de Bird, 2003. La cartografía geológica continental fue modificada del Servicio Geológico Mexicano a escala 1:250.000 de 1980 - 1990. Las unidades geológicas, su distribución temporal y las delimitaciones de las provincias extensionales del golfo se modificaron a partir de Duque-Trujillo et al., 2015 y Ferrari et al., 2018. Las fechas de formación de suelo oceánico en los límites divergentes fueron tomados de Lizarralde et al., 2007; Lonsdale, 1989. CVTM – Cinturón Volcánico Transmexicano; SMO – Sierra Madre Occidental; GC – Grupo Comondú; BC – Bloque Los Cabos; BJ – Bloque Jalisco; BSP – Batolitos de la Sierra Peninsular; BSSNJs – Batolitos de Sonora, Sinaloa, Nayarit y Jalisco; CVI – Complejo Volcánico Inferior; SGVS – Super Grupo Volcánico Superior; VT – Vulcanismo Transtensional; IM – Islas Marias; II – Isla Isabel; IC – Isla Cerralvo; IES – Isla Espíritu Santo; ISI – Isla San José; ISC – Isla Santa Catalina; IT – Isla Tortuga; DPO – Dorsal del Pacífico Oriental; DMM – Dorsal de María Magdalena; F. T-A – Sistema de fallas Tosco-Abreojos; F. SI-Sm – Sistema de fallas San Lorenzo-Santa Margarita; A.M. – Abanico de Magdalena; B&RM – Basin and Range Mexicano; PEG – Provincia extensional del Golfo de California; PTG – Provincia transtensional del Golfo de California.

Temprano – Paleoceno que está relacionado con el *evento orogénico Laramide*, denominándolo: *Basamento Pre-Laramide*. Este está conformado principalmente por rocas metamórficas de medio y alto grado, rocas metasedimentarias, metavolcánicas, esquistos, e intrusivos deformados que varían desde el Precámbrico al Jurásico, además de rocas plutónicas de composición variada de edad Jurásico – Cretácico Temprano, sobre los cuales se depositan secuencias sedimentarias de shales y calizas del Cretácico Temprano (Servicio Geológico Mexicano, 1980, 1990; Ferrari, 2018). En el margen continental de México, estas rocas se localizan principalmente al occidente del núcleo sin extensión de la Sierra Madre Occidental (SMO), entre Sonora y Sinaloa. También se han encontrado algunas porciones en la parte occidental de la península de Baja California (**FIGURA 3**). Todas estas rocas representan eventos geológicos relacionados con la compleja interacción entre la placa Farallones y Norteamérica antes de la formación de batolitos del evento Laramide (Ferrari et al., 2005, 2018).

2.1.2. Magmatismo Laramide (~100 – 50 Ma)

Los cuerpos plutónicos de características de arco continental, que coinciden con las edades del evento orogénico Laramide, producto de la interacción y ajuste de la subducción entre las placas Farallón y Norteamérica en el Cretácico Tardío - Paleoceno son conocidos como *magmatismo Laramide* (Valencia-moreno & Ortega-Rivera, 2011; Valencia-Moreno et al., 2001). Estos representan el principal basamento de los posteriores eventos magmáticos del cenozoico en la porción sur del Golfo de California (Ferrari et al., 2018). Este evento orogénico se refleja en el Golfo de California como cuerpos plutónicos de edad Cretácicos Temprano – Paleoceno (~100 – 50 Ma),

localizados en los alrededores de Sinaloa, Sonora, Jalisco, Nayarit, Baja California sur (Los Cabos), y como bloques tectónicos en el fondo marino del Golfo (Duque-Trujillo, 2015; Valencia-moreno & Ortega-Rivera, 2011; Valencia-Moreno et al., 2001; Ferrari et al., 2005). Las edades y composición litológica y geoquímica de los batolitos de la Sierra Peninsular (BSP) en Baja California Sur son correlacionables con los batolitos presentes en el bloque Jalisco, Sinaloa, Sonora y Nayarit (BSSNJs) (Busby, 2004; Valencia-moreno & Ortega-Rivera, 2011; Valencia-Moreno et al., 2001; Gastil, 1975; Henry et al., 2003; Schaaf et al., 2000). Estos, en general presentan una composición granítica a granodiorítica, y temporalmente varían desde (~90 – 80 Ma) en los plutones ubicados al oeste de Sonora, Bloque Los Cabos y Jalisco, a más jóvenes al oriente, cerca de la SMO (~60 – 50 Ma) (Henry et al., 2003; Schaaf et al., 2000; Gastil, 1975; Ferrari et al., 2000; Calmus et al., 1999). Este cinturón plutónico desmembrado y disgregado por la posterior extensión Cenozoica se extiende de norte a sur desde California, EE. UU., hasta Jalisco (Valencia-moreno & Ortega-Rivera, 2011; Valencia-Moreno et al., 2001; Busby, 2004).

2.1.3. Vulcanismo de extensión temprana (~30 – 12,5 Ma)

El magmatismo del Eoceno tardío – Mioceno medio evidencia las primeras etapas del proceso de adelgazamiento cortical que afectó el margen occidental de la placa Norteamérica en dirección ~W-E antes del cese de la subducción -12,5 Ma- y el inicio del proceso de rifting oblicuo y formación de suelo oceánico en el Golfo de California (Ferrari et al., 2013, 2018; Bryan et al., 2014; Duque-Trujillo et al., 2015).

Basados en este vulcanismo se pueden diferenciar dos etapas de extensión (Ferrari et al., 2013, 2018; Bryan et al., 2014). El primer evento distensivo es conocido como

Basin and Range Mexicano (B&RM), el cual recibe su nombre por las estructuras horst y graben que forman un relieve de cuencas y sierras paralelas, producto del rifting amplio -desde la SMO al este, hasta el margen oriental del Golfo de California al oeste; este proceso extensivo afectó la parte norte y central de México, y en mayor medida la porción sur del Golfo de California entre ~30 – 18 Ma (Henry & Aranda-Gómez, 1992, Luhr et al., 2001) (**FIGURA 3**). El segundo evento extensivo corresponde a la extensión localizada evidenciada exclusivamente por los alrededores del Golfo de California; este sector se conoce como: ***Provincia Extensional del Golfo de California (PEG)*** (Henry & Aranda-Gómez, 1992). Este rift estrecho (PEG) inicia a partir de la localización del rifting amplio (B&RM) al oeste de la SMO a los ~18Ma., y dura hasta la finalización de la subducción -12,5 Ma- (Ferrari et al., 2013, 2018; Bryan et al., 2014; Duque-Trujillo et al., 2014, 2015) (**FIGURA 3**).

El magmatismo de la SMO y el Grupo Comondú son la representación en el registro geológico de la extensión ocurrida en la zona del Golfo de California posterior a la orogenia Laramide (Ferrari et al., 2018).

Sierra Madre Occidental (34 – 18 Ma.) – Es la provincia ígnea silícica más grande de Norte América (SLIP) (McDowell & McIntosh, 2012; McDowell & Keizer 1977). Está ubicada al occidente de México, desde la frontera con EE. UU. en el norte, hasta el Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) al sur, en la zona de Jalisco, conformando una meseta de ~1200 km de longitud, ~200 – 400 km extensión y una altura máxima de 3.000 m sobre el nivel del mar (McDowell & Kreiser, 1977); se estima que cubre un área de ~400.000 km² (McDowell & McIntosh, 2012; Ferrari et al., 2007)

(**FIGURA 3**). Geológicamente está compuesta por el *Super Grupo Volcánico Superior (SGVS)*, constituido principalmente por ignimbritas voluminosas silíceas, que representan el ~85 – 90% del vulcanismo; con apariciones menores de domos riolíticos y lavas basálticas, conformando un vulcanismo bimodal (Duque-Trujillo et al., 2015; Ferrari et al., 2007, 2013; Bryan et al., 2014). Se pueden diferenciar dos grandes eventos ignimbríticos; el primer pulso sucedió en el oligoceno (34 – 28 Ma), se encuentra disperso por toda el área y representa tres cuartos del total del volumen del material volcánico, mientras que el segundo pulso ocurrió en el Mioceno Temprano (24 – 18 Ma) y solo se concentra en la parte sur de la SMO (Ferrari et al., 2007, 2013; Bryan et al., 2014). Este vulcanismo representa la etapa inicial de la extensión que empezó a afectar Norteamérica -B&RM-, asociado a su contemporaneidad y afinidad composicional con dicho sistemas de extensión (Vulcanismo Bimodal), entre otras características (ver: Bryan et al., 2014; Ferrari et al., 2013, 2018).

Grupo Comondú (29 – 12 Ma.) – Se encuentra ubicado al oriente de la península de Baja California, conformado por rocas volcánicas, volcanoclásticas y volcanosedimentarias con edades entre Oligoceno y Mioceno Medio (Umhoefer et al., 2001; Ferrari et al., 2018; Bryan et al., 2014; Duque-Trujillo et al., 2015; Drake, 2005) (**FIGURA 3**). Se puede dividir en dos unidades principales (Bryan et al., 2014; Ferrari et al., 2013, 2018): la primera unidad, con edades entre Oligoceno y Mioceno temprano (29–18 Ma), está compuesta principalmente por secuencias sedimentarias eólicas y fluviales intercaladas con areniscas tobáceas retrabajadas, pulsos ignimbríticos riolíticos y lavas basálticas -vulcanismo bimodal- de 500 m de espesor, que por su gradación

parecen haberse depositado en un ambiente distal al oeste del área fuente (Umhoefer et al., 2001; Drake, 2005). La segunda unidad corresponde con las unidades media y superior de Umhoefer et al. (2001), unificadas por Bryan (2014) como una secuencia del Mioceno Medio (18–12 Ma) dominada por brechas sedimentarias intercaladas con lavas y domos de composición intermedia, que alcanzan 1 km de espesor.

La primera unidad es correlacionable con la actividad del primer pulso ignimbrítico de la SMO, a manera que esta secuencia corresponda a la parte distal de este evento (Umhoefer et al., 2001; Ferrari et al., 2007, 2018), mientras que la segunda unidad registra un evento completamente diferente, de carácter efusivo y composición intermedia, relacionado con el proceso de rifting estrecho que afectó el occidente de la SMO en las mismas fechas y que evolucionaría al actual Golfo de California (PEG) (Duque-Trujillo et al., 2015 y Bryan et al., 2014; Ferrari et al., 2007, 2018).

2.1.4. Vulcanismo transtensional y CVTM (~12,5 Ma – presente)

Los últimos pulsos ígneos registrados en el Golfo de California son principalmente volcánicos y están directamente relacionados con el proceso de extensión oblicua que afecta la parte occidental del rift estrecho (PEG) desde ~12,5 Ma., una vez acabada la subducción de Farallones y se trasladara el límite divergente de la DPO al interior de la placa Norteamérica en la actual posición del Golfo de California, separando la microplaca Baja California (Lonsdale, 1989). Según Ferrari et al. (2018) se podría denominar esta zona de extensión oblicua que dio origen a la Golfo de California como: ***Provincia Transtensional del Golfo de California (PTG) (FIGURA 3).***

Composicionalmente estos eventos ígneos son muy variados; desde flujos de lavas

basálticos, algunos de composición intermedia, hasta actividad ignimbrítica y domos riolíticos, siendo los primeros los más representativos (Ferrari et al. 2018). Estos pulsos volcánicos van desde el Mioceno temprano hasta la actualidad, y se encuentran distribuidos a lo largo del margen continental de la porción sur del Golfo de California (margen continental mexicano y península de Baja California) (Ferrari et al. 2018). Hacia la parte sur del Golfo, entre Puerto Vallarta y Tepic (Nayarit) también aparece actividad volcánica, pero que hace parte del *Cinturón Volcánico Transmexicano (TMVB)*, el cual no está relacionado con la extensión oblicua (PTG), puesto que está emplazada y separada tectónicamente de la SMO y el Bloque Jalisco (Ferrari et al., 2000, 2001). Este evento está representado por diferentes pulsos ígneos que varían composicionalmente, pero que en general muestran firma de arco magmático, producto de la subducción de la placa Rivera -al norte- y Cocos -al sur- debajo de la placa Norteamérica desde el Mioceno Medio (Ferrari et al., 2000, 2001, 2012).

Actualmente la extensión oblicua del Golfo de California (PTG) se encuentra en etapa temprana de oceanización desde ~3,6 Ma. (Lonsdale, 1991). Lizarralde et al. (2007) ha discutido sobre la geometría y la variación del estilo de este rift actual, determinado que este proceso es asimétrico y diferenciado a lo largo del Golfo, y que la extensión, a pesar de que sucedió contemporánea en toda la zona, no refleja los mismos niveles de formación de suelo oceánico.

2.2. Bases de datos y recopilaciones bibliográficas previas

Existen varios trabajos puntuales sobre la geología sumergida en la porción sur del Golfo de California; muchos de estos publicados en diversos artículos científicos, tesis de posgrado y reportes académicos. Los principales aportes al conocimiento de esta zona son realizados por autores que han trabajado buscando delimitar los tipos de cortezas en el golfo. Entre ellos se puede enumerar a: Lizarralde et al. (2007), quienes usan tomografías sísmicas; Sutherland et al. (2012), quien usa sísmica somera; Lonsdale (1989), Kluesner (2011) y Kluesner et al. (2014), usando geofísica somera y geoquímica; Curray & Moore (1979), Lewis & Robinson (1979) y Yeats & Haq (1978) -Deep Sea Drilling Project Leg 63, 64 y 65, 1978-1979-, quienes recuperaron muestras perforadas y desarrollaron geofísica somera, geoquímica, mapas y perfiles; Piñero Lajas (2007) y Hernández (2010), utilizando sísmica de reflexión 2D; Duque Trujillo et al. (2014), quienes recuperaron muestras submarinas; y entre muchos otros autores quienes publican información relevante a la geología y evolución del occidente mexicano y de cuyos trabajos se puede extraer información relevante.

En la actualidad no existe una base de datos que recopile la información geocientífica disponible para la parte sumergida de la porción sur del Golfo de California. La principal fuente para adquisición de datos en el Golfo son los artículos científicos, reportes o proyectos investigativos, de los cuales muy pocas veces se presentan repositorios para tener acceso directo a los datos. Dentro estos documentos, algunos pueden ser recopilaciones bibliográficas que sintetizan la información de varios autores en modelos, o bases de datos personales (e.g. Ferrari et al. 2018; Umhoefer et al, 2018).

Recientemente se ha vuelto más común que los autores anexen en repositorios los datos asociados a sus trabajos, sin embargo, existen varios problemas en la forma en la que se comparten los datos: i) que se compartan los datos pero con restricciones, en este caso la información requiere permisos o es limitada, haciendo que su recopilación sea complicada; ii) que se compartan solamente los metadatos, en este caso solo se comparten las referencias de donde fueron tomados los datos pero no la base de datos (e.g. Bryan et al., 2014); iii) que se compartan solo una parte de los datos, excluyendo los demás, muchas veces solo se comparten los archivos de puntos espaciales con información, pero no se suelen compartir los límites o cartografías realizadas (e.g. Deep Sea Drilling Project Leg 63, 64 y 65, 1978-1979); iv) no se comparten los datos crudos, siendo accesibles solamente por georreferenciación de imágenes u otros medios de extracción de datos en documentos (e.g. Ferrari et al., 2018; Piñero Lajas, 2008; Hernández, 2010). En estos casos los métodos de adquirir la información como georreferenciación pueden generar pérdida o deformación de la información debido a la escala o la calidad del documento (e.g. Lonsdale, 1989, 1991).

Algunas bases de datos globales han estado almacenando información bibliográfica de la geología submarina de la porción sur del Golfo de California en formatos digitales; estas plataformas suelen compartir directamente los archivos extraídos de otros autores, ya sean añadidos por estos u otros, o recibidos de todo un proyecto investigativo (e.g. cruceros completos patrocinados por National Science Fundation). El problema con estas bases de datos es que restringen el tipo de datos que aceptan, por lo que no suelen contemplar mucha información geológica variada. Además de esto, almacenan los datos

sin utilizar estándares, lo que hace que el recopilar de diferentes bases de datos sea complejo y dificulte la gestión y el análisis.

La base de datos más completa sobre el golfo de California es de la Interdisciplinary Earth Data Alliance (IEDA), que puede ser consultada por medio de la aplicación GeoMapApp de la misma plataforma (<http://www.geomapapp.org/>). En esta base de datos se pueden conseguir los datos crudos de los instrumentos de batimetría, sísmica, magnetometría, puntos espaciales de muestras, etc. de cruceros e investigaciones internacionales. Sin embargo, la información almacenada carece de estándares de almacenamiento apropiados o de revisiones, obteniéndose a veces información errónea, desordenada y con importantes gaps. Otras bases de datos no son tan completas y por lo general se centran en un tipo único de dato (e.g. NOAA; USGS; DSDP). El servicio Geológico Mexicano (SGM) también ha construido una base de datos importante en el Golfo para descargar información geológica continental, e información sobre algunas muestras submarinas, aunque varios de los archivos no son muy actuales, y aún hace falta información por almacenar disponible en la bibliografía.

Los proyectos de bases de datos geológicos interactivas y de fácil acceso no son un tema nuevo en las cercanías de del Golfo de California. Ferrari, Orozco Esquivel, et al. (2018) y Ferrari, Castillo-Reynoso, et al. (2018) son ejemplos de la recolección y síntesis de datos geológicos en el Cinturón Volcánico Transmexicano FVTM y la porción sur de la SMO respectivamente. Estas bases de datos son un referente importante para este trabajo, puesto que representan el creciente interés en México de plataformas geocientíficas por almacenar la información de manera digital para que la comunidad científica pueda

interactuar con esta eficientemente (e.g. Terra Digitalis, revista electrónica de mapas interactivos -http://terradigitalis.igg.unam.mx/html/ojs3/index.php/terra_digitalis/about-).

3. Capítulo III:

Metodología

El desarrollo de la base de datos que unifica la información geológica submarina de la porción sur del Golfo de California se llevó a cabo en tres etapas que fueron diseñadas siguiendo los objetivos específicos planteados en el trabajo (**FIGURA 4**). La primera etapa consistió en la búsqueda, extracción y organización de los datos submarinos presentes en la porción sur del Golfo de California; enseguida -segunda etapa- se procedió a la visualización y procesamiento de estos, por medio de SIG, para que la información tuviesen un formato estándar y pudiera ser unificada. La tercera y última etapa del trabajo fue la integración de la información en una sola base de datos internamente estructurada para mantener un orden lógico y óptimo.

3.1. Limitaciones y condicionantes previos

Uno de los factores que más influyó en el desarrollo de la base de datos de la porción sur del Golfo de California fue el tiempo. Debido a este, no fue posible efectuar una recopilación exhaustiva de la bibliografía submarina, por lo que se tuvo que limitar el tipo y la cantidad de datos que serían recolectados. Puesto que la base de datos contemplaría el poder generar una cartografía generalizada de la geología submarina y redefinir la posición del límite de las cortezas oceánica y continental en la porción sur del Golfo de California, la información geológica recopilada se centró fundamentalmente en dicha

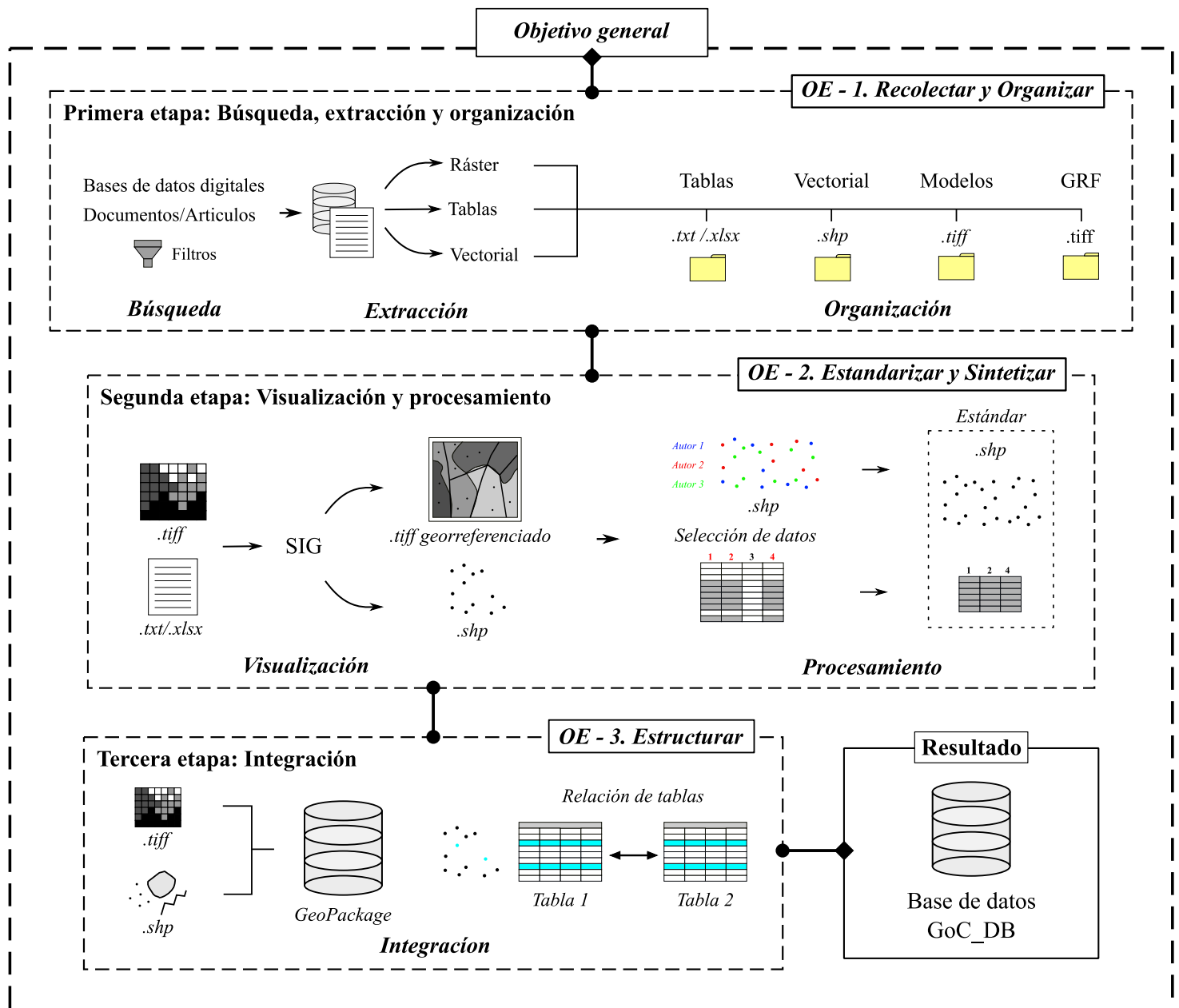


FIGURA 4. Metodología empleada en la elaboración de la base de datos geocientíficos de la porción sur del Golfo de California; dividida en tres etapas que fueron establecidas a partir de los objetivos específicos planteados en el presente trabajo.

finalidad. De esta manera, los datos y los condicionantes para su recolección fueron los siguientes:

Muestras litológicas submarinas (puntos) recolectadas en la porción sur del Golfo de California que al menos contaran con: coordenadas (incluyendo profundidad), tipo de roca; y, en lo posible, temporalidad (fecha y método de datación) y método de adquisición. Se priorizaron todos aquellos datos que provenían de los anexos o bases de datos digitales en formato vectorial como [.shp] o en tablas ya sea [.xlsx] o [.txt], aunque la información referente a estas muestras que se encontraba dentro del texto de los documentos también debía ser extraída en estos últimos formatos.

Mapas, perfiles o diagramas en los que se representaran características geológicas y geomorfológicas submarinas de la porción sur del Golfo de California, tales como: estructuras, nombre de unidades, provincias/terrenos, cuencas, geoformas, cartografía geológica, límites de cortezas, perfiles topográficos, etc. Siempre se debía tener prioridad a los archivos vectoriales (e.g. [.shp]) o formatos ráster (e.g. [.tiff]) referenciados espacialmente. En caso de solo tener acceso a los diagramas de los documentos bibliográficos, estos debían tener un sistema de coordenadas definido y al menos cuatro puntos con coordenadas claras para ser georreferenciados, además de presentarse buena calidad, en donde se detallarán bien las características representadas.

Modelos digitales de elevación (DEM) de batimetría de la porción sur del Golfo de California con buen nivel de detalle de las estructuras submarinas (resolución) y lo más actual que estuviese disponible. Se tuvo en cuenta únicamente los modelos en formatos ráster (e.g. [.tiff]), ya sea de proyectos globales que integraron tanto datos satelitales y/o de barco, o expediciones locales de alta resolución. Los mapas que

representaran batimetría encontrados en la bibliografía y que debían ser georreferenciados también se debían tener en cuenta, pero únicamente como referencia visual para los modelos DEM.

Modelos geofísicos de anomalía magnética, gravitacional o perfiles sísmicos de la porción sur del Golfo de California previamente procesados e interpretados. Estos, al igual que la batimetría, debían tener la mejor resolución posible a la fecha. Para la anomalía magnética y gravitacional se debían tomar exclusivamente los modelos [.tiff] unibanda ya georreferenciados, mientras que para los perfiles sísmicos sólo era necesario guardar la imagen sin deformar, y generar un archivo vectorial [.shp] que representara su posición geográfica.

3.2. Primera etapa: Búsqueda, extracción y organización

El primer paso para construir la base de datos de la porción sur del Golfo de California consistió en la búsqueda de los datos geológicos submarinos que serían integrados en esta, siguiendo los condicionantes previamente establecidos (**sección 3.1**) (**FIGURA 4**). Como se explicó en la **sección 2.2**, la información submarina del golfo se puede encontrar principalmente en documentos bibliográficos publicados, o en bases de datos digitales de plataformas que recopilan información geocientífica. Utilizando filtros temáticos (geología, batimetría, geofísica, muestras submarinas, datación, etc.) en buscadores bibliográficos como: Google Académico, ResearchGate o el Descubridor de la biblioteca de la Universidad EAFIT; se separaron todos los documentos de la literatura

en cuyo alcance y localización estuviese contemplada la porción sur del Golfo de California. Con el software Mendeley se gestionaron las publicaciones y documentos escritos, y la información referente a todas estas fuentes de datos geológicos submarinos - título, autor, año de publicación, tipo de documento, enlace web, doi, etc.- se organizó en una tabla digital [.xlsx] que más adelante serviría para el desarrollo de un componente fundamental de la base de datos, conocida como la tabla de metadatos bibliográficos. Una vez se determinó qué información sería incorporada en la base de datos, el siguiente paso consistió en la extracción de los datos de las fuentes encontradas. En esta parte se aplicaron una vez más las condicionantes previamente descritas en la **sección 3.1**. Esta operación resultó extensa para los documentos bibliográficos, dado que era necesario exportar imágenes, guardar tablas y consultar repositorios para obtener los datos; mientras que las bases de datos digitales facilitaban su descarga en formatos apropiados. Por último, todos los datos extraídos fueron organizados según la información que representaban en diferentes carpetas alusivas, con el fin de facilitar el desarrollo de las etapas posteriores.

3.3. Segunda etapa: Visualización y procesamiento

A pesar de que los datos habían sido extraídos y organizados, aun no estaban preparados para ser integrados en una base de datos, puesto que, dependiendo del autor, estos se almacenaban de diferentes formas y con estructuras internas incompatibles. Además, los filtros aplicados anteriormente solo separaron la información general de la porción sur del Golfo de California, y aún había que seleccionar solo los datos necesarios.

Esta segunda etapa se ocupó de simplificar los datos recolectados, y prepararlos para la etapa final (**FIGURA 4**). Lo primero era visualizar y analizar cada uno de los datos para planear la manera en la que serían editados. Esta visualización se realizó a través de un SIG, el cual también permitió su respectiva modificación. En este trabajo se utilizó el software libre *QGIS* como esta herramienta para modificar, analizar y gestionar los datos espaciales. Los diagramas extraídos de la bibliografía tenían que ser georreferenciados para poder ser visualizados junto con los demás datos de la base de datos. Para esto se utilizó el georreferenciador de *QGIS*, asignándoles sus respectivas proyecciones y posicionándolos en sus coordenadas correspondientes. En el caso de los puntos de muestreo almacenados en tablas [.txt]/[xlsx], se añadieron al programa como capa delimitada por texto utilizando las columnas de latitud y longitud previamente establecidas como condicionante. El resto de los datos recolectados ya se encontraban espacialmente localizados en sus formatos ([.shp]/[.tiff]) y podían ser visualizando simplemente con añadirlos directamente al programa. Una vez que se tenían dispuestos los datos en el software, el siguiente paso era hacerles modificaciones para adecuarlos a la siguiente etapa, en donde serían unificados en una base de datos. Las modificaciones se planearon para que los datos se acoplaran a estándares únicos dependiendo del formato y la información representada. Estos estándares determinaban las características que debían tener todos los archivos de datos que representarían lo mismo; por ejemplo, todos los archivos vectoriales de puntos de muestreo submarino debían tener las mismas columnas: localización, profundidad de recolección, método de obtención, nombre de muestra, tipo de roca, método de datación y notas originales. Cualquier otra columna o información

extra debía ser eliminada. También era necesario eliminar los puntos que no se encontraran dentro del área de interés: la porción sur del Golfo de California. Este procedimiento se aplicó a todos los datos recolectados, y una vez fueron estandarizados, ya podían ser unificados en una base de datos.

3.4. Tercera etapa: Integración

La última etapa para la creación de la base de datos de la porción sur del Golfo de California consistió en la unificación de toda la información previamente recolectada y preparada en un sistema de almacenamiento ordenado que permitiera administrarla eficientemente (**FIGURA 4**). La gran mayoría de los datos, salvo los rásters, estaban almacenados a manera de tablas ligadas, o no, a entidades espaciales (puntos, líneas o polígonos). Dado que los datos geológicos podían presentar relaciones directas e indirectas unos con otros, lo ideal era poder almacenarlos en un sistema que plasmara dichas relaciones, además de evitar la redundancia de datos entre diferentes tablas (e.g. los puntos de muestreo con la bibliografía del autor que los recolectó). Teniendo presente lo anterior, se optó por establecer un modelo relacional, explicado brevemente en la **sección 1.3**, para desarrollar la estructura de la base de datos. Por comodidad, para el diseño físico de la base de datos se utilizó el formato *GeoPackage* del sistema de gestión de bases de datos *SQLite*, encargado de almacenar y gestionar datos espaciales. Sin embargo, existen varios formatos digitales para gestionar bases de datos espaciales (e.g. *ESRI geodatabase*, *PostgreSQL*, *Spatialite*); lo más importante era adaptar los datos a cualquiera de estos para que, si en futuro fuese necesario mejorar o cambiar el formato, la estructura ordenada se mantuviese sin depender de este. Debido a que muchos formatos

de bases de datos no están adaptados para separar los archivos internamente en carpetas, como si lo hacen las geodatabase de ESRI por ejemplo, se debía tener en cuenta que los datos iban a estar todos juntos independientemente si eran tipo ráster vector o tablas. De esta manera, cada entidad (tablas) de la base de datos debía tener un nombre específico que se encargara de describir las características que representaba su contenido. Así pues, se nombraron los archivos siguiendo un sistema de codificación personalizado alusivo. Con la estructura definida y la información almacenada en el formato GeoPackage, el ultimo procedimiento fue crear las relaciones entre las entidades establecidas en el modelo estructural de la base de datos con el software QGIS. Las relaciones se crearon teniendo en cuenta la dependencia de unas entidades con respecto a otras, evitar reescribir datos y editar los registros de manera óptima, como sería el caso de los metadatos bibliográficos con respecto al resto de datos de la base de datos. Una vez establecidas las relaciones, estaría diseñada y terminada el primer acercamiento a una base de datos de la porción sur del Golfo de California.

4. Capítulo IV:

Resultados

4.1. Introducción a la base de datos - (GoC_DB)

Un total de 125 fuentes bibliográficas fueron utilizadas para la construcción de la base de datos geológicos submarinos de la porción sur del Golfo de California (**ANEXO 1 - B**).

A partir de estas se extrajeron y organizaron 1.200 muestras litológicas del fondo marino, de las cuales 170 presentaban dataciones; junto con 19 perfiles sísmicos interpretados y 20 diagramas cartográficos del Golfo de California. Adicionalmente se adquirieron modelos de anomalía magnética; modelos de anomalía gravitacional con corrección de aire libre y Bouguer; modelos de batimetría; cartografía geológica continental en formato vectorial; entre otros (**TABLA 1**). La estructura de la base de datos está definida principalmente por la codificación de los nombres de las entidades (**FIGURA 5, A**).

Dado que el primer carácter del nombre hace referencia al tipo de archivo, esta característica es la que define el primer nivel de organización de la base de datos. Se optó por esta característica como separación principal porque es la primera diferenciación visual que hacen los SIG entre diferentes formatos. El segundo carácter hace referencia al siguiente nivel de distinción, el cual define la información general que representan las entidades (geológica continental, geología submarina, batimetría, etc.), mientras que los dos últimos, detallan la información específica de cada entidad (**FIGURA 5, A**). El modelo establecido para la estructura de la base de dato se enfoca en las relaciones que

TABLA 1. Contenido de la base de datos geocientíficos submarinos de la porción sur del Golfo de California - (GoC_DB).

| Dato | Tipo | Origen | Código del archivo |
|---|------|--|---|
| <i>Geografía (0_gg)</i> | | | |
| Limite geográfico de los Estados Unidos Mexicanos | Pl | Marco Geoestadístico (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019) | v0_gg_limite-geografico(INEGI-2019)_MX |
| Área de la porción sur del Golfo de California | Pl | - | v0_gg_porcion-sur-GC |
| <i>Geología submarina (1_gos)</i> | | | |
| Puntos de muestreo (coordenadas/roca/datación) | P | ANEXO 1 - A | v1_gos_m-litologia_SGC |
| Límites y estructuras tectónicas | L | An updated digital model of plate boundaries (Bird, 2003) | v1_gos_limites-tectonicos(bird-2003)_SGC |
| <i>Geología continental (2_goc)</i> | | | |
| Cartografía geológica continental | Pl | Cartografía geológica 1:250.000 (Servicio Geológico Mexicano, 1980 - 1990) | v2_goc_geologia(sgm80-90)_SGC |
| Estructuras en el margen continental | L | Cartografía geológica 1:250.000 (Servicio Geológico Mexicano, 1980 - 1990) | v2_goc_estructuras(sgm80-90)_SGC |
| <i>Batimetría (3_bat)</i> | | | |
| Modelo digital de elevación (DEM) | R | Global Multi Resolution Topography (GMRT) v3.6, 2018 (Ryan et al., 2009) | r3_bat_gmrt2018(ryan-2009)_SGC |
| | | Global bathymetry and topography at 15 arc seconds (Tozer et al., 2019) | r3_bat_gb&t-15arc(tozer-2019)_SGC |
| <i>Anomalía magnética (4_amg)</i> | | | |
| Modelo de anomalía magnética | R | Magnetic Anomaly Map of North America (Bankey et al., 2002) | r4_amg_mamna(bankey-2002)_SGC |
| | | EMAG2-V2 - NOAA (Meyer, 2017) | r4_amg_emag2-v2(Meyer-2017)_SGC |
| <i>Anomalía gravitacional (5_agr)</i> | | | |
| Modelo de anomalía gravitacional | R | Marine Gravity Map v23,1 – (Sandwell et al., 2014) | r5_agr_airelibre-mgm(sandwell-2014)_SGC |
| | | Anomalía de aire libre - WGM2012 (Bonvalot et al., 2012 (IGB)) | r5_agr_airelibre(Bonvalot-2012)_SGC |
| | | Anomalía de Bouguer - WGM2012 (Bonvalot et al., 2012 (IGB)) | r5_agr_bouguer(Bonvalot-2012)_SGC |
| <i>Modelos georreferenciados (6_grf)</i> | | | |
| Imágenes georreferenciadas | R | ANEXO 1 – A | r6_grf_*nombre del figura(autor y fecha)*_SGC |
| Posición de los perfiles interpretados | L | ANEXO 1 - A | v6_grf_perfiles_SGC |
| <i>No espaciales (7_ne)</i> | | | |
| Bibliografía del golfo | T | ANEXO 1 - B | t7_tns_bibliografia_GC |

Nota: esta tabla solo muestra la información general almacenada en la base de datos con su respectiva codificación y referencias. Para interactuar con los datos, o consultar el repositorio completo ver **ANEXO 1 - A**. P – archivo vectorial de puntos; L – archivo vectorial de líneas; Pl- archivo vectorial de polígonos; R- archivo ráster; T – archivo de tabla. IGB – International Gravimetric Bureau.

A. Estructura de la base de datos

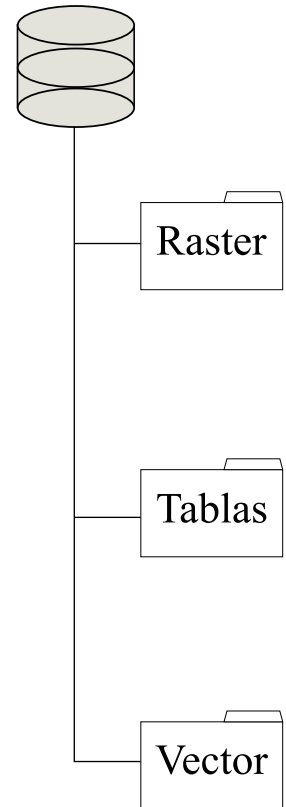
Códigos de almacenamiento

a **b** **c** **d**

- a.** Tipo de archivo:
- v - Vectorial
 - r - Ráster
 - t - Tabla
- b.** Información almacenada:
- 0_gg - Geográfica
 - 1_gos - Geología submarina
 - 2_goc - Geología continental
 - 3_bat - Batimetría
 - 4_amg - Anomalía magnética
 - 5_agr - Anomalía gravitacional
 - 6_grf - Modelos georreferenciados
 - 7_ne - No espaciales
- c.** Nombre del archivo:
nombre-simplificado(**autor**-**año**)
- d.** Localización:
SGC - Porción sur del Golfo de California
GC - Golfo de California

e.g. **r3_bat_gmrt(mgds-2018)_SGC**

GoC_DB



B. Relaciones en la base de datos

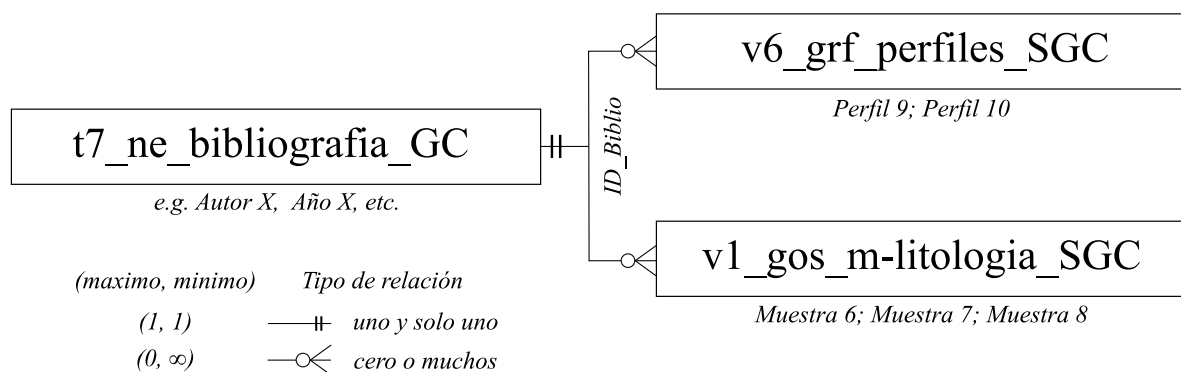


FIGURA 5. Características estructurales de la base de datos de la porción sur del Golfo de California (**A**). Relación entre la tabla de metadatos bibliográficos y los archivos vectoriales de muestreo submarino y localización de perfiles sísmicos interpretados (**B**).

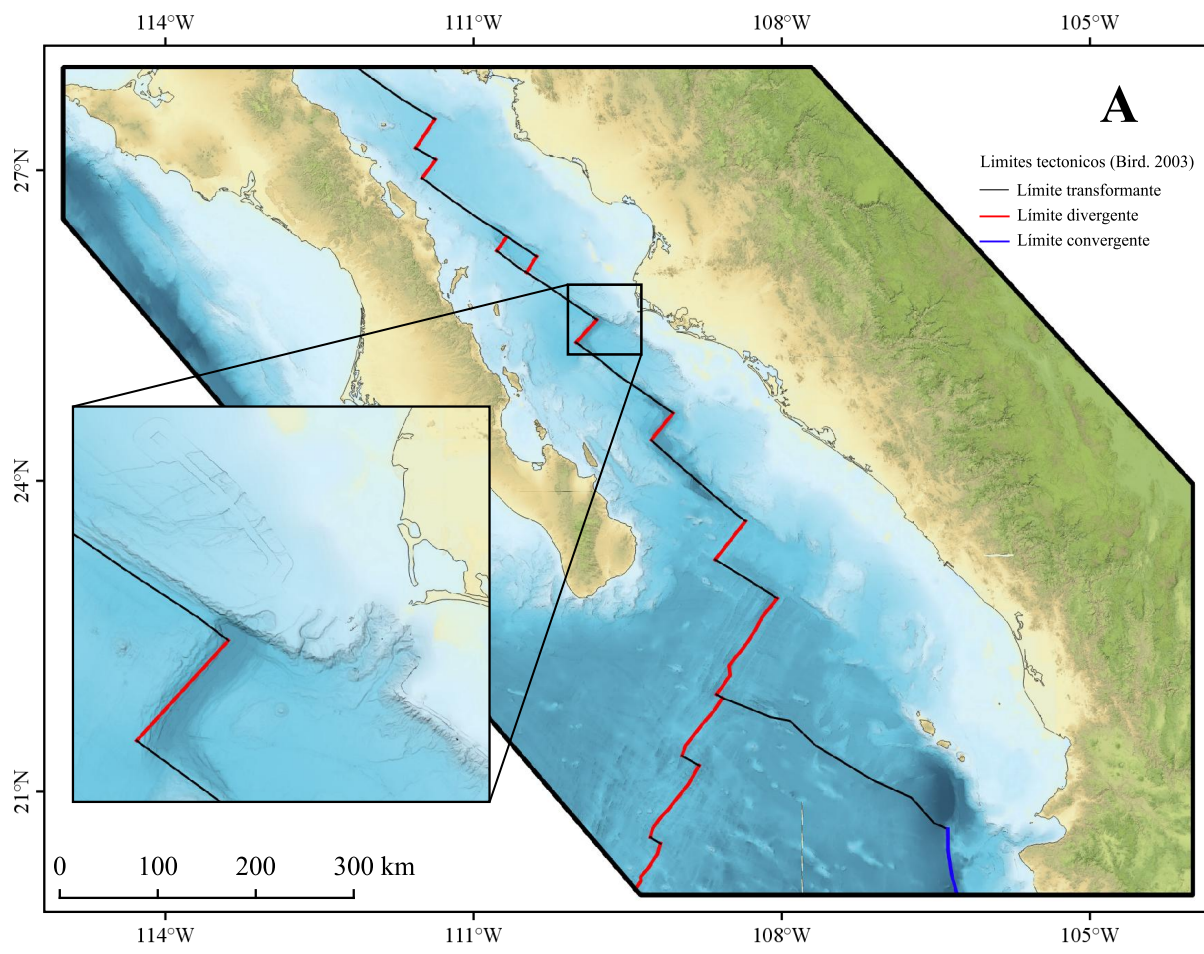
tienen las entidades entre sí (**sección 3.4**). Se desarrollaron en total dos relaciones entre entidades, siendo el conector principal la tabla de metadatos bibliográficos donde se almacenaron las referencias de cada uno de los datos unificados en la base de datos (*t7_tns_bibliografia_GC*). Dicha tabla se relacionó con los puntos de muestreo submarino y con la posición de los perfiles interpretados en la bibliografía (**TABLA 1**), teniendo en cuenta que varias muestras o perfiles se corresponden con solo un autor respectivo (**FIGURA 5, B**).

4.2. Contenido de la base de datos - (GoC_DB)

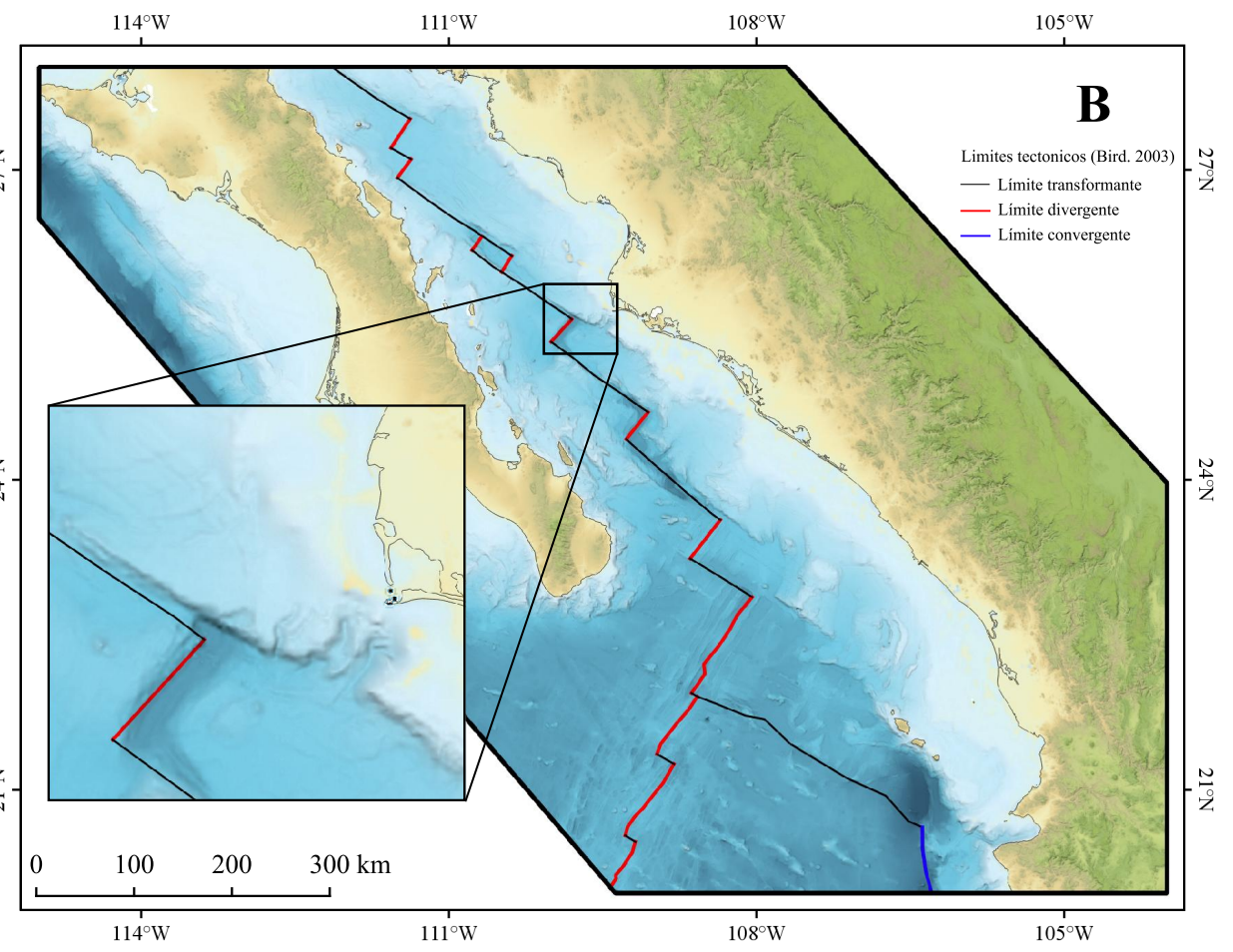
Para la descripción del contenido de la base de datos de la porción sur del Golfo de California solo se tendrá en cuenta el segundo nivel de organización, puesto que el primero es principalmente para los SIG.

4.2.1. Geografía (0_gg)

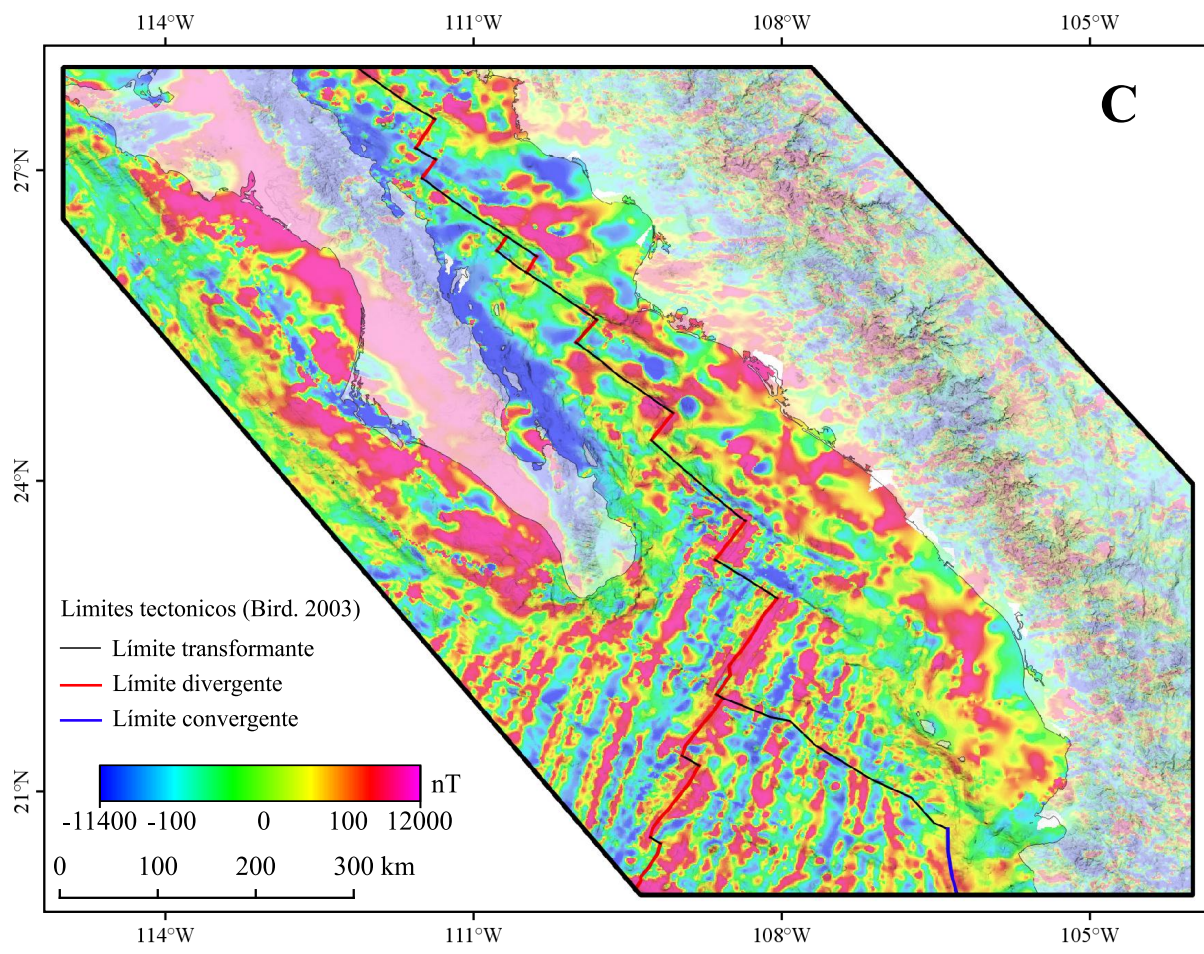
Los archivos guardados con el código “0_gg” representan información espacial referente a los elementos cartográficos naturales o políticos, tales como: ríos, límites territorios, centros poblados, caminos, etc. Se almacenaron en la base de datos de la porción sur del Golfo de California como archivos geográficos: el marco geoestadístico de los Estados Unidos Mexicanos del INEGI para el 2019, el cual integra los datos espaciales del territorio Mexicano (e.g. *v0_gg_limite-geografico(INEGI-2019)_MX*) y la división de la porción sur del Golfo de California establecida en este trabajo -entre 28 - 20° N de latitud- (*v0_gg_porcion-sur-GC*) (**FIGURA 6**). Estos archivos son necesarios para identificar la relación territorial de los datos geológicos integrados en de la base de datos.



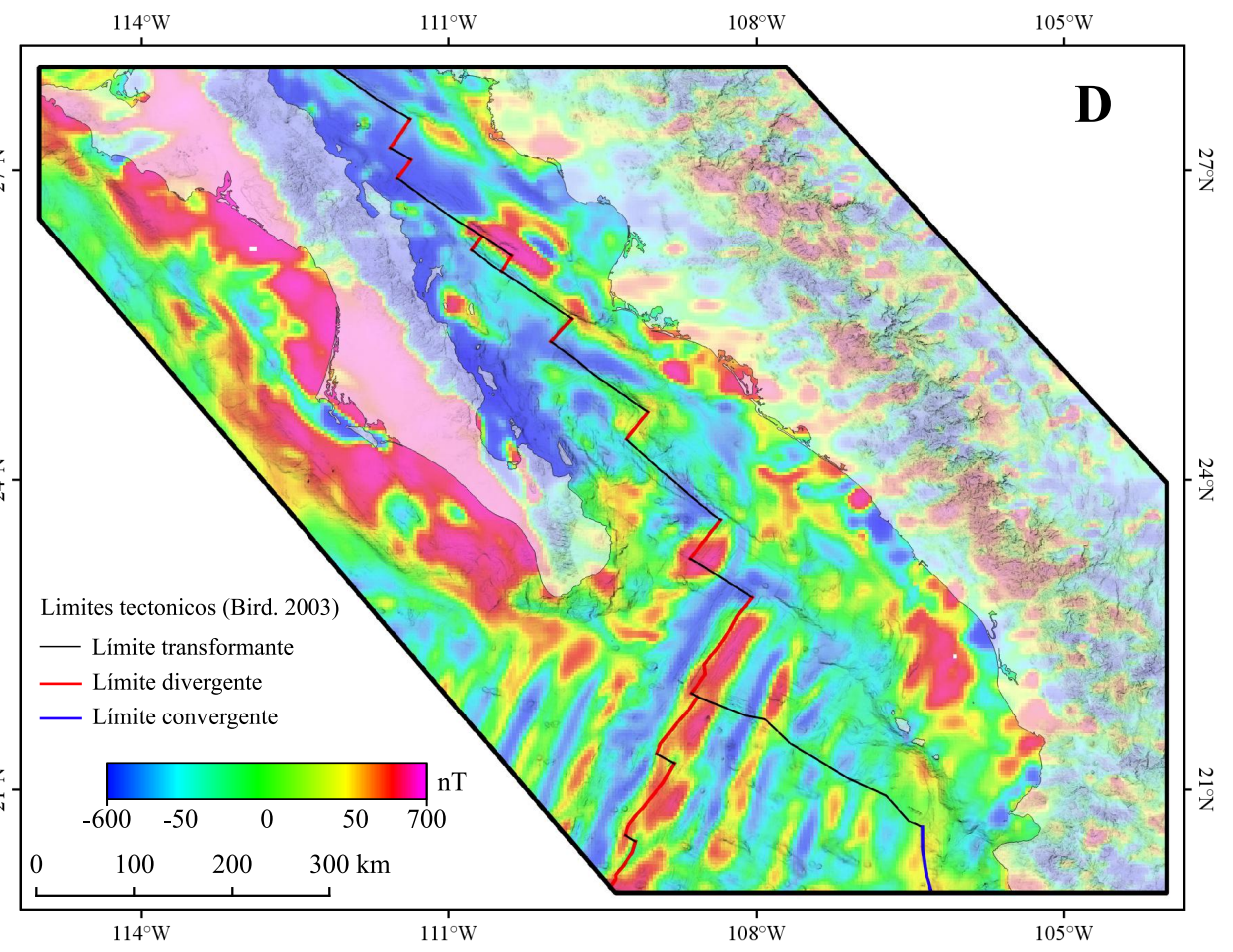
Global Multi Resolution Topography (GMRT) v3.6, 2018
r3_bat_gmrt(mgds-2018)_SGC



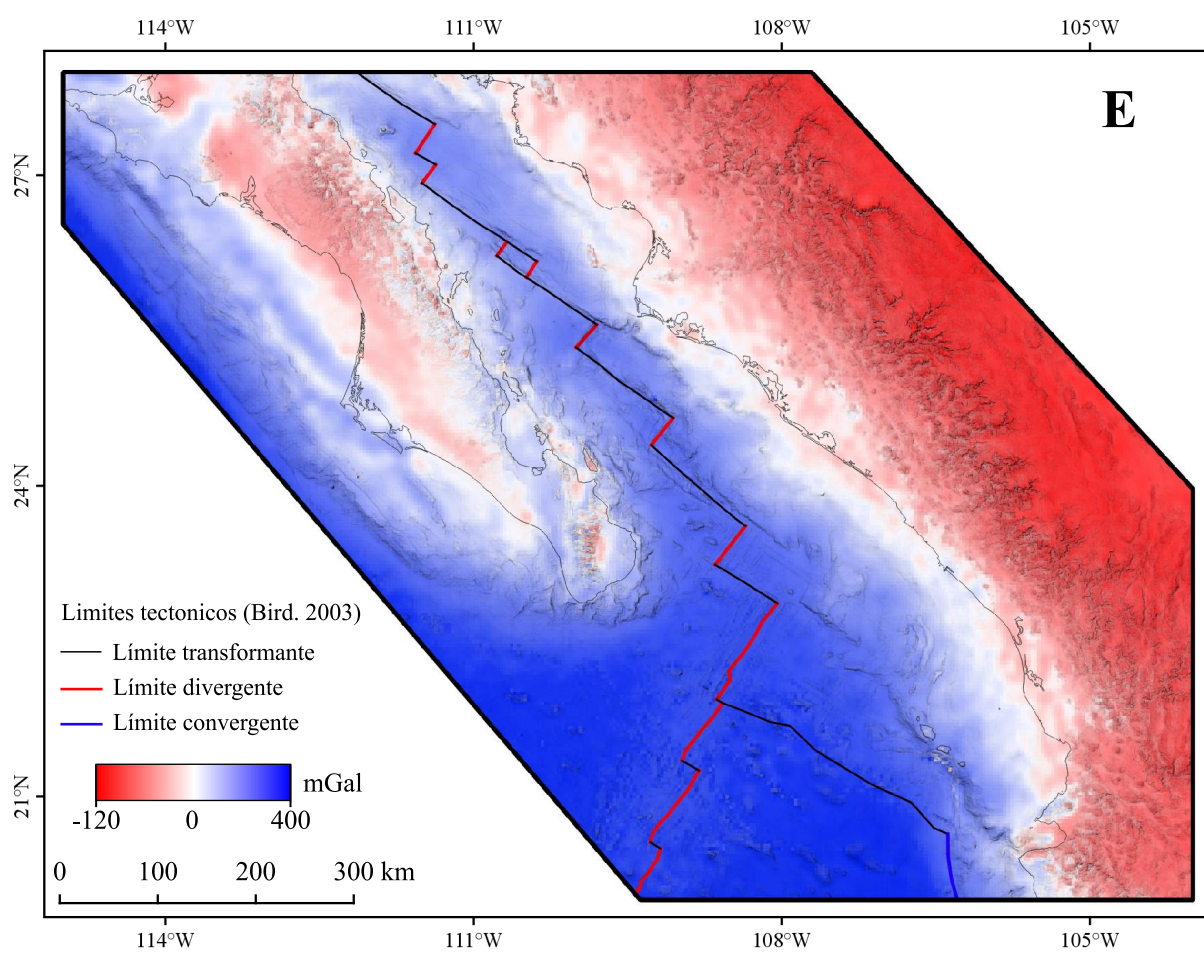
Global bathymetry and topography (Tozer & Sandwell, 2019)
r3_bat_gb&t-15arc(sandwell-2019)_SGC



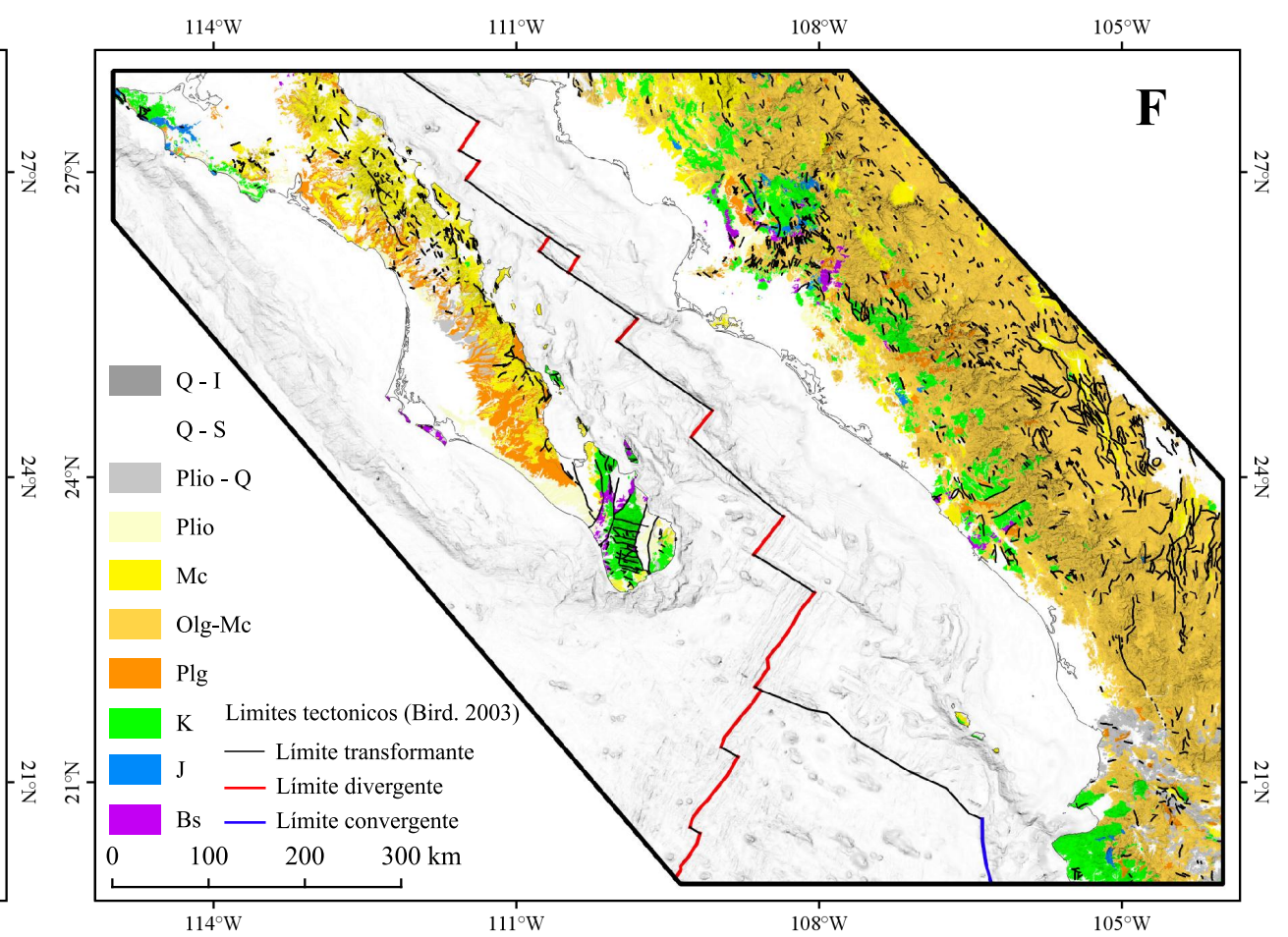
Magnetic Anomaly Map of North America (U.S.G.S, 2002)
r4_amg_mamna(usgs-2002)_SGC



Anomalia magnética - EMAG2-V2 (NOAA-2017)
r4_amg_emag2-v2(noa-2017)_SGC



Anomalia de Bouguer - WGM2012 (IGB)
r5_agr_bouguer(wgm-2012)_SGC



Cartografía geológica continental 1:250.000 (SGM, 1980 - 1990)
v2_goc_geologia_SGC

(descripción de la imagen en la siguiente página)

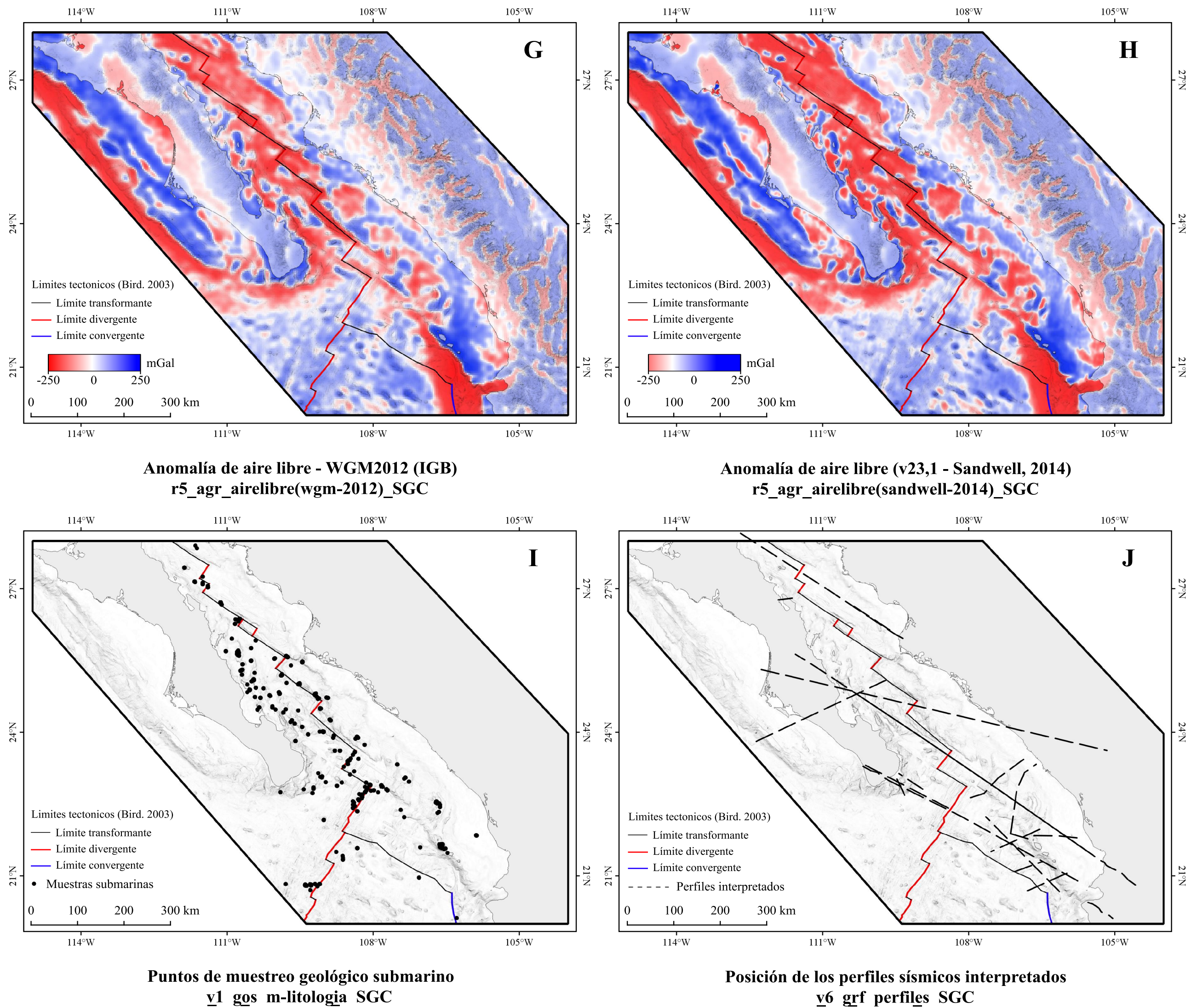


FIGURA 6. Representación espacial de las entidades almacenadas en la base de datos de la porción sur del Golfo de California. Los datos espaciales del territorio Mexicano (e.g. v0_gg_limite-geografico(INEGI 2019)_MX), la división de la porción sur del Golfo de California establecida en este trabajo (v0_gg_porcion-sur-GC) y los límites de placas de Bird, 2003 sin modificar (v1_gos_limites-tectonicos(bird-2003)_SGC) están presentes en todas las representaciones. Q-I – Cuaternario ígneo; Q-S – Cuaternario sedimentario; Plio – Plioceno; Mc – Mioceno; Olg – Oligoceno; Plg – Paleoceno; J – Jurásico; K – Cretácico; Bs – Basamento.

4.2.2. Geología submarina (1_gos)

El código “1_gos” es referente de todos aquellos archivos almacenados en la base de datos que representan información geológica del fondo marino de la porción sur del Golfo de California. Se clasificaron dos archivos vectoriales con esta referencia: los puntos de muestreo geológico submarino recopilados de varios autores (*v1_gos_m-litologia_SGC*); y el modelo de los límites de placas establecidos por Bird, 2003 (*v1_gos_limites-tectonicos(bird-2003)_SGC*) (**FIGURA 6, I**). Con esta información geológica almacenada se pueden hacer relaciones espaciotemporales para diferenciar la composición de la corteza y analizar la distribución de los eventos geológicos del margen marino. La mayoría de los datos de muestreo del fondo marino -56% de las muestras- proviene de una base de datos personal a la cual se tuvo acceso, con información de las expediciones ROCA (2008); DANA (2004) y BEKL (2009) realizadas por diferentes cruceros a lo largo de la porción sur del Golfo de California, y que actualmente no se encuentran fácilmente en la literatura. El resto de los datos de muestreo submarino fueron adquiridos de las bases de datos EarthChem - <https://www.earthchem.org/>; Marine Geoscience Data System -<http://www.marine-geo.org/index.php>; y de algunos proyectos que han trabajado en la parte sur del Golfo como el Deep Sea Drilling Project (DSDP), Leg 63, 64 y 65 entre los años 1978 – 1979 (Curry & Moore, 1979; Lewis & Robinson, 1979; Yeats & Haq, 1978) (ver: **ANEXO 1 - A**). Las muestras fueron recolectadas principalmente a partir de tres métodos: por medio de vehículos operados remotamente “*ROV*” (Remote Operated Vehicles); perforaciones del lecho submarino; y dragados; siendo el último el más utilizado entre diferentes excursiones. El método de recolección se tuvo en cuenta puesto que define la confiabilidad de la posición de cada muestra. Los dos primeros

métodos toman las muestras en una posición específica, brindando las coordenadas únicas de cada muestra recolectada; mientras que el último adquiere una gran cantidad de muestras en un rango determinado, sin saber exactamente la posición de muestras individuales.

Clasificando la distribución espacial de la composición geológica de las muestras submarinas se pueden diferenciar diferentes regiones inmersas en el golfo con predominancia de composición máfica, félsica o intermedia (**FIGURA 7**). Las muestras de composición máfica coinciden con el fondo de las cuencas submarinas principales a lo largo de la porción sur del Golfo de California; siendo en su mayoría de tipo volcánico. Cerca de las pendientes topográficas que delimitan dichas cuencas los ejemplares se tornan una mezcla de rocas de diferentes tipos y composiciones, y a medida que estos se encuentran cerca del margen continental se vuelven predominantemente félsicos. Las muestras de composición intermedia se encuentran estrechamente asociadas con las félsicas. Dicha asociación evidencia un contraste entre el margen oriental y occidental de la porción sur del Golfo de California. En el margen oriental, la proporción de muestras intermedias es relativamente baja, variando entre 10 - 30% en relación con las muestras félsicas; mientras que hacia el margen occidental la predominancia de ejemplares de composición intermedia es bastante mayor (40 - 65%). Por otro lado, las rocas volcánicas y volcanoclásticas parecen ser más frecuentes en la parte central y hacia el margen oriental de la porción sur del Golfo de California (Cuencas Pescadero - Farallón); mientras que las rocas plutónicas se manifiestan mayormente al occidente y hacia el sur. Las islas que se encuentran dentro del Golfo se disponen principalmente en proximidad con el margen continental. En síntesis, estas presentan un carácter félsico/intermedio, de

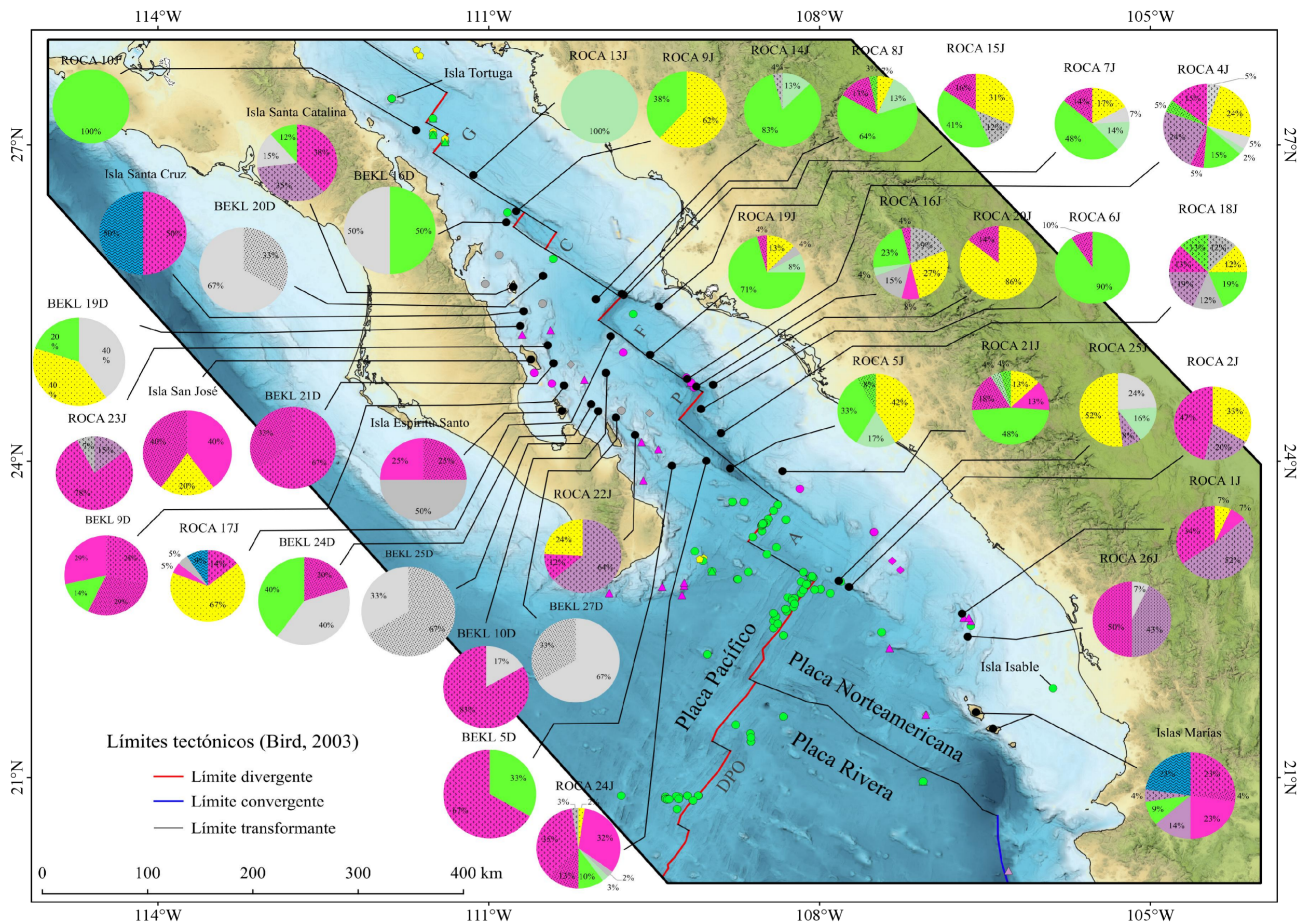


FIGURA 7. Distribución espacial de las muestras submarinas recopiladas y los límites tectónicos planteados por Bird, 2003 en la porción sur del Golfo de California (v1_gos_m-litología_SGC & v1_gos_límites-tectonicos(bird-2003)_SGC). La clasificación se enfocó principalmente en las muestras de tipo ígneas. Los diagramas circulares fueron implementados en las zonas donde se superponen las muestras, ya sea por la escala (e.g. muestras ROCA) o por métodos de recolección que incurre en múltiples muestras en un solo trayecto; por ejemplo, los dragados (e.g. BEKL). DPO – Dorsal del Pacífico Oriental: A – Cuenca Alarcón; P – Cuenca Pescadero; F – Cuenca Farallón; C – Cuenca Carmen; G – Cuenca Guaymas.

rocas plutónicas/volcanoclásticas, y algunas ocasiones con registro metamórfico de basamento. En contraste, las islas Tortuga e Isabel son las únicas que posee una composición completamente máfica-volcánica. De las 1200 muestras submarinas recopiladas, 611 tienen un valor de edad asignado; sin embargo, solo 173 de estos valores son de dataciones radiométricas confiables proporcionadas por sus respectivos autores; el resto de las muestras con edades (440) corresponden a basaltos del suelo oceánico a los cuales se les atribuyó la edad de las isócronas establecidas por el DSDP Leg 63, 1978 (Yeats & Haq, 1978) a partir del registro de anomalía magnética. La distribución espaciotemporal de las muestras se explica en el siguiente sección (**sección 4.2.3**), correlacionándose con la geología del margen continental.

En cuanto a los límites tectónicos de la parte sur del Golfo de California, se utilizaron los establecidos por Bird (2003). Este autor implementó tanto fuentes bibliográficas, como elementos cartográficos, sísmicos, estructurales y geológicos para determinar los límites tectónicos activos a escala global. Debido a la magnitud de esta escala, la posición de dichos límites en la porción sur del Golfo de California no es completamente acertada (e.g. no coincide correctamente con la batimetría) (**FIGURA 6, A y B**), pero sirve como referencia de la localización de los bordes de placa a lo largo del Golfo. Principalmente los bordes de tipo divergente son los que afectan la porción sur del Golfo de California; se localizan en el centro de las cuencas submarinas, y sus ejes se disponen en dirección noreste. Hacia la boca del Golfo de California estos límites son alargados -alrededor de ~90 km-; se encuentran poco fragmentados por fallas transformantes (límites transformantes), y en promedio se encuentran separados entre ~10 - 30 km. En contraste, dentro del Golfo los límites transformantes se vuelven los más relevantes, desplazan alrededor de ~80 km las

pequeñas porciones de límites divergentes de no más de ~60 km de longitud. Los bordes de placas de tipo convergente sólo aparecen hacia el suroriente de la porción sur del Golfo de California, donde se encuentra prolongada la zona de subducción de la placa Rivera y Cocos, con la placa Norteamérica (Bird, 2003).

4.2.3. Geología continental (2_goc)

Como referencia a los datos geológicos del margen continental en la base de datos de la porción sur del Golfo de California se utilizó el código “2_gos”. La cartografía geológica continental integrada fue la 1:250.000 del servicio geológico mexicano (SGM) realizada entre los años 1980 y 1990 (**FIGURA 6, F**). Esta cartografía se encontraba dividida en 33 mapas, cada uno con sus archivos vectoriales de estructuras y cobertura geológica correspondientes, los cuales fueron unificados en dos archivos respectivos:

v2_goc_geologia(sgm)_SGC: corresponde a polígonos que delimitan las unidades geológicas cartografiadas en el margen continental del Golfo de California (porción sur). Los principales atributos son el tipo de roca, y la edad.

v2_goc_estructuras(sgm)_SGC: polilíneas que representan las estructuras existentes en el margen continental de la porción sur del Golfo de California. Entre estas destacan las fallas inversas, normales y de rumbo; las fracturas; los pliegues y los diques. Adicionalmente utilizando la calculadora de campos de software libre QGIS se determinó la dirección con respecto al norte -rumbo- de las fallas, y se almacenó en un nuevo atributo llamado “*strike*” en la tabla de atributos de este archivo vectorial.

La cartografía geológica continental se agregó a la base de datos de la porción sur del Golfo de California para correlacionar e interpretar con la información del margen marino. Por lo anterior, tanto el registro geológico continental como el submarino se organizó de manera preliminar por edades, teniendo en cuenta especialmente el registro ígneo -volcánico; volcanoclástico y plutónico-, con el fin de encontrar relaciones en la distribución espaciotemporal de los eventos magmáticos entre ambos márgenes (**FIGURA 8**). Como referencia para la cartográfica continental se utilizaron las unidades geológicas descritas en la **sección 2.1** a partir de Ferrari et al. (2018); Bryan et al. (2014) y Duque-Trujillo et al. (2015). Las rocas Mesozoicas constituyen el 15,33% de la geología superficial continental registrada en la porción sur del Golfo de California. En esta era, las rocas del **Basamento pre-Cretácico (2.1.1)** representan lo más antiguo en el registro. Aparecen principalmente desde los alrededores de la ciudad de Culiacán, especialmente hacia el norte, y se despliegan hasta la ciudad de Mazatlán (**FIGURA 8**). Junto a estas rocas se observan cuerpos ígneos plutónicos Cretácico – Paleoceno y actividad volcánica/volcanoclástica del Cretácico y Paleoceno – Eoceno; Esta actividad ígnea se corresponde con la unidad del **Magmatismo Laramide (0)**, y representa el **Complejo Volcánico Inferior (CVI)** de la SMO (**FIGURA 8**). Este sector del Golfo de California se nombrará en este trabajo como la *porción mesozoica al occidente de la Sierra Madre Occidental (PM - WSMO)* por su posición geográfica, y está conformada por el CVI y el Basamento Pre-Cretácico. La actividad magmática Laramide es lo más representativo del mesozoico del margen continental en la porción sur del Golfo de California. Aparece adicionalmente como plutonismo Cretácico y Cretácico – Paleoceno por los

alrededores de Puerto Vallarta al sur del Golfo; y entre La Paz - Los Cabos San Lucas, con algunas manifestaciones al norte de Loreto, en la península de Baja California (**FIGURA 8**). Estas unidades plutónicas se les conoce como el Bloque Jalisco (BJ) y el Bloque Los Cabos (BC) respectivamente. De esta manera, el magmatismo Laramide está conformado por los Batolitos de Sonora, Sinaloa, Nayarit y Jalisco (BSSNJs) y el CVI en el margen continental mexicano; y los Batolitos de la Sierra Peninsular (BSP) en la península de Baja California. Las muestras submarinas de esta era son mayoritariamente plutónicas, y aparecen relativamente cerca de los registros continentales respectivos; principalmente por los alrededores del Bloque Los Cabos y sur de Loreto; y hacia el noroeste del Bloque Jalisco y sur de Mazatlán (**FIGURA 8**).

En cuanto a la geología cenozoica del registro continental, es mucho más amplia y compleja; representando el 84,66% de la cartografía superficial de la porción sur del Golfo de California. Los primeros eventos ígneos del cenozoico aparecen principalmente en la PM – WSMO asociados con los cuerpos plutónicos Cretáceos. Este vulcanismo y plutonismo Paleoceno - Eoceno representa la parte final del registro magmático Laramide, y hace parte del CVI de la SMO. La cobertura geológica en la Sierra Madre Occidental y la península de Baja California desde el Oligoceno hasta finales de Mioceno hace referencia a la unidad del *Vulcanismo de extensión temprana (2.1.3)* de la porción sur del Golfo de California. En la SMO los eventos volcanoclásticos del Oligoceno – Mioceno (primer pulso) dominan la región norte, mientras que en la parte central y al sur, predomina la actividad volcánica y volcanoclástica más joven -Mioceno - Mioceno Temprano- (segundo pulso) (**FIGURA 8**). Estos dos eventos volcánicos-volcanoclásticos

representan el ***Super Grupo Volcánico Superior*** de la SMO. A lo largo de la porción sur de la península de Baja California se registran rocas volcánicas, volcanoclásticas y volcanosedimentarias (estas últimas combinadas en el mapa con la simbología de las rocas volcanoclásticas) del Oligoceno – Mioceno (**FIGURA 8**). Estos eventos volcanosedimentarios hacen referencia a la ***Grupo Comondú (2.1.3)***. Al noroeste y en la parte sur de la Sierra Madre Occidental; y al norte de la PM – WSMO también aparece actividad volcánica del mioceno, sin embargo, este registro hace parte de los inicios del ***Vulcanismo Trastensional (2.1.4)*** de la porción sur del Golfo de California. Los últimos registros del cenozoico corresponden a edades Pleistoceno-Cuaternario, se constituyen de rocas volcánicas distribuidas a lo largo del margen continental mexicano; al noroeste del Grupo Comondú; y entre el Bloque Jalisco y el sur de la SMO (**FIGURA 8**). Las dos primeras localidades también corresponden con el Vulcanismo Transtensional del Golfo de California, mientras que la actividad volcánica entre el bloque Jalisco y el sur de la SMO esta correlacionado con el ***Cinturón Volcánico Transexicano (CVTM) (2.1.4)***. Al igual que en el registro Mesozoico, las muestras submarinas del Cenozoico también se correlacionan con la actividad continental contemporánea. La edad de las muestras submarinas Cenozoicas comienza a partir de aproximadamente ~19 Ma, limite en el que comienza a aparecer el ***Grupo Comondú – unidad media y superior (FIGURA 8, Eventos Ígneos)***. Estas muestras se encuentran relativamente dispuestas en una posición centra respecto a la porción sur del Golfo de California, y no se han reportado registros hacia el sur, o más allá de la Cuenca Guaymas. En cuanto a las muestras volcánicas más jóvenes (Plioceno - Cuaternario), cuyas edades se tomaron a partir de líneas de anomalía

magnética en corteza oceánica, están relacionadas con el vulcanismo transtensional más reciente y formación de suelo oceánico en la porción sur del Golfo de California.

Con respecto a las fallas del margen continental de la porción sur del Golfo de California, el valor de rumbo calculado permitió organizarlas en un diagrama de rosas para clasificar su tendencia general, y poder estimar la dirección de los esfuerzos que han afectado el margen continental (**FIGURA 8**). Solamente se clasificaron las fallas normales y de rumbo, que estarían relacionadas con la fase de extensión del margen continental en el golfo. Las fallas normales tienen una orientación preferencial hacia el norte y el noroeste; mientras que las fallas de rumbo tienen una tendencia principalmente hacia el noroeste, aunque minoritariamente algunas hacia el noreste.

4.2.4. Batimetría (3_bat)

Los elementos de la base de datos de la porción sur del Golfo de California que representan información batimétrica o de relieve submarino se clasificaron con el código “3_bat”. Para la batimetría del Golfo de California se tomaron dos modelos rásters de diferentes fuentes: el Global Multi Resolution Topography (GMRT) v3.6, 2018 producto del Marine Geoscience Data System (MGDS) (Ryan et al., 2019) (*r3_bat_gmrt(Ryan-2009)_SGC*); y el Global Bathymetry and Topography at 15 Arc Seconds, de Tozer et al. (2019) (*r3_bat_gb&t-15arc(tozer-2019)_SGC*) (**FIGURA 6, A y B**). Cada uno de los modelos digitales de elevación agregados presentan ventajas y desventajas con respecto al otro. El modelo *GMRT, 2018* posee mejor detalle de las estructuras submarinas debido a sus 60 metros de resolución; este detalle se alcanza gracias a que la interpolación de dicho modelo integra los datos multibeam de cruceros alrededor del Golfo de California.

No obstante, puesto que aún falta bastante terreno dentro del Golfo por ser cartografiado por los cruceros, se pueden encontrar porciones borrosas en la modelo, siendo fácilmente reconocible el límite entre las zonas con datos de cruceros, y las zonas con datos de otras fuentes (**FIGURA 6, A**). Esto se resume en varios errores que generan anomalías en la topografía que dificultan la manipulación del ráster. Las ventajas del modelo de elevación digital *GMRT, 2018* radican en su resolución, permitiendo analizar las peculiaridades del fondo marino a pequeña escala; sin embargo, para análisis, representaciones de mayor escala o procesamiento ráster (adquisición de curvas de nivel o pendientes) no es muy adecuado. Por otro lado, aunque el modelo *Global Bathymetry and Topography at 15 Arc Seconds*, tiene una resolución menor (450 m), la interpolación complementa los datos de cruceros con satélites de alta precisión, logrando cubrir las áreas sin detalle del fondo marino con una transición más suave (**FIGURA 6, B**). Por lo anterior, este modelo es más apropiado para el análisis a gran escala y el procesamiento digital del relieve, gracias a la continuidad y buena calidad de la interpolación. Estos modelos de elevación digital fueron agregados a la base de dato porque son fundamentales para la delimitación y descripción del fondo marino. A partir de estos se puede asociar la geología con el relieve; diferenciar patrones estructurales y cuerpos tectónicos; e identificar y caracterizar la geomorfología submarina.

4.2.5. Anomalía magnética (4_amg)

El código “4_amg” hace referencia a los archivos de anomalía magnética a lo largo de la porción sur del Golfo de California. Esta anomalía se tuvo en cuenta debido a que permite diferenciar las composiciones de las cortezas y cuerpos subsuperficiales del

fondo marino, teniendo en cuenta el patrón bandeado que refleja la corteza oceánica, y la heterogeneidad de la de las anomalías de la corteza continental (Lowrie, 2007). Dos modelos ráster de dicha anomalía fueron agregados en la base de datos: el primer modelo es el Magnetic Anomaly Map of North America, generado en conjunto por el Servicio Geológico de Canadá (Geological survey of Canadá - GSC), el Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S. Geological Survey - USGS) y el Consejo de Recursos Minerales de México, en el 2002 (Bankey et al., 2002) (*r4_amg_mamna(bankey-2002)_SGC*); y el segundo modelo es el Earth Magnetic Anomaly Grid de la NOAA (Meyer et al., 2017) (*r4_amg_emag2-v2(meyer-2017)_SGC*) (**FIGURA 6, C y D**). El primer modelo es el que cuenta con mayor resolución -1 km-. La adquisición de la información fue a través de medios marinos y aéreos a alturas de entre 150 y 300 metros, siendo lo más cercano que se ha medido en un modelo de tal escala, (U.S.G.S, Consejo de Recursos Minerales de Mexico, GSC, North American Magnetic Anomaly Group. 2002) (**FIGURA 6, C**). Este modelo se encontraba disponible en formato [.grd], el cual solo podía ser leído por los softwares de la compañía Geosoft; sin embargo, estos mismos proveedores ofrecen un software gratuito con el cual se puede visualizar y convertir el formato a uno compatible por otros programas, incluidos SIG (en el siguiente enlace se encuentra una guía hecha por el USGS para acceder y procesar la información <https://pubs.usgs.gov/of/2002/ofr-02-414/>). En este caso se optó por transformar el archivo [.grd] a [.tiff], para poder ser manipulado y evitar la pérdida de resolución por compresión. El segundo modelo, EMAG-V2 tiene una resolución de 3,5 km; esta no es comparable con la del Magnetic Anomaly Map of Norte América del 2002, puesto que

solo resalta las anomalías más representativas (**FIGURA 6, D**). Por lo anterior, el segundo modelo solo se tiene como respaldo o complemento del primero. A simple vista se puede diferenciar la corteza oceánica en la boca del Golfo de California por el patrón bandeado típico (Winter, 2010; Lowrie, 2007), y la corteza continental como una masa difusa de múltiples anomalías. Adicionalmente se observa un fenómeno de anomalías contrastantes a lo largo del margen continental de la península de Baja California, y la falta de un patrón de corteza oceánica definido en las cuencas submarinas al interior del Golfo (**FIGURA 6, C y D**). La ventaja de tener estos modelos en formato ráster, es la posibilidad de hacer perfiles en cualquier disposición requerida para poder relacionar la anomalía magnética de la corteza con cualquier otro parámetro.

4.2.6. Anomalía gravitacional (5_agr)

Para los archivos de anomalía gravitacional de la porción sur del Golfo de California se estableció el código “5_agr”. Fueron tenidos en cuenta dos métodos de corrección diferentes de esta anomalía. La primera corrección es la de aire libre; de esta se añadieron dos modelos a la base de datos: el modelo Marine Gravity Map de Sandwell et al., 2014 (*r5_agr_airelibre-mgm(sandwell-2014)_SGC*) y el World Gravity Model (WGM) con corrección de aire libre diseñado del instituto Bureau Gravimétrique International (Bonvalot et al., 2012) (*r5_agr_airelibre(bonvalot-2012)_SGC*) (**FIGURA 6, G y H**). Al igual que en la anomalía magnética, el primer modelo es de mayor resolución -2 km- y detalle, mientras que el otro es para complementar -3,5 km de resolución-, salvo que en este caso la diferencia en la calidad de las resoluciones no es tan marcada. Con esta anomalía se soportan las distinciones topográficas de los modelos

batimétricos, puesto que la corrección de aire libre no tiene en cuenta los valores de gravedad que proporcionan las masas que se encuentran fuera del modelo de referencia (el geoide), siendo sensible al exceso o déficit de gravedad producto los cambios en la batimetría con respecto al nivel del mar (Lowrie, 2007). En estos modelos, los valores negativos (rojo) representan déficit de masa, mientras que los valores positivos (azules), representan exceso (**FIGURA 6, G y H**). La segunda corrección implementada en la base de datos es la de bouguer. Para esta corrección de anomalía gravitacional solo se utilizó nuevamente el World Gravity Model (WGM) con 3,5 km de resolución, del instituto Bureau Gravimétrique International (Bonvalot et al., 2012) pero con dicha corrección (*r5_agr_bouguer(bonvalot-2012)_SGC*) (**FIGURA 6, E**). Este modelo tiene en cuenta la corrección de aire libre, pero adicionalmente resta o añade las anomalías gravitacionales producto de las masas que se encuentren por debajo, o por encima del modelo de referencia respectivamente; de esta manera se observaría el contraste de las densidades de la corteza a profundidad (Lowrie, 2007). Los valores positivos (azules) indican la presencia de cuerpos cercanos de mayor densidad, mientras que los negativos (rojos) ausencia de masas densas o presencia de cuerpos gruesos de baja densidad. Las anomalías gravitacionales son una herramienta fundamental en la delimitación de cuerpos y masas corticales (Lowrie, 2007); es por esto por lo que fueron integradas en la base de datos de la porción sur del Golfo de California.

4.2.7. Modelos georreferenciados (6_grf)

Uno de los motivos para integrar la información disponible en la porción sur del Golfo de California en una base de datos es poder disminuir la objetividad y aumentar la

calidad de los análisis. Esto se logra considerando la mayor cantidad de datos de la literatura como sea posible. Debido a que muchos de estos datos solo se encuentran disponibles en mapas o diagramas dentro de los documentos bibliográficos, fue necesario georreferenciar y almacenar dichos productos para extraer la información única que estos aportan. Diferentes diagramas interpretados en la bibliografía a lo largo del fondo marino de la porción sur del Golfo de California fueron integrados en la base de datos (**TABLA 2**). Todos estos se reconocen por el código “6_grf”, y solamente se tuvo en cuenta dos tipos de diagramas: los mapas con información de distribución geológica o

TABLA 2. Diagramas geológicos y perfiles interpretados extraídos de la bibliografía e integrados en la base de datos de la porción sur del Golfo de California.

| Documento | Perfiles localizados | Mapas georreferenciados |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Balestrieri et al., 2017 | Figura 9/7 | Figura 2 |
| Bennett et al., 2016 | | Figura 1 |
| Brothers et al., 2012 | Figura 2 | |
| Dañobeitia et al., 2016 | Figura 10/11/12/13 | |
| Yeats & Haq, 1978 | | Figura f38b |
| Curry & Moore, 1979 | Figura 5a (50)/9a(69) | Figura f50 |
| Duque-Trujillo et al., 2015 | | Figura 1/2 |
| Ferrari et al., 2013 | | Figura 1/2 |
| Ferrari et al., 2018 | | Figura 1/Plate I/13 |
| Fletcher et al., 2007 | | Figura 3/5 |
| Housh et al., 2010 | | Figura 1 |
| Kluesner et al., 2011 | | Figura 2-2/2-3 |
| Lizarralde et al., 2007 | Figura 2 | Figura 1 |
| Miller et al., 2013 | Figura 2 | |
| Paramo et al., 2008 | Figura 2 | |
| Piñero-Lajas., 2008 | | Apéndice I |
| Pompa-Mora et al., 2013 | | Figura 1 |
| Sutherland et al., 2012 | Figura 6 | Figura 3/4/5 |

cartográfica (código general: *r6_grf_*nombre del figura(autor y fecha)*_SGC*) y la posición de los perfiles sísmicos interpretados (*v6_grf_perfiles_SGC*) (**FIGURA 6, J**). A partir de estos modelos se pueden digitalizar los datos únicos que se requieran de un autor en concreto, como es el caso de las provincias geológicas estructurales del margen continental de Ferrari et al. (2013), o compararse directamente con los otros datos espaciales de la base de datos, todo esto con el fin de evaluar los resultados desde diferentes puntos de vista.

4.2.8. Tablas no espaciales (7_ne)

El código “7_ne” de la base de datos se diseñó para almacenar tablas que no contengan valores geométricos, pero que tengan una relación directa con otros datos espaciales. La única tabla no espacial incorporada en la base de datos fue el registro bibliográfico que almacena los metadatos de proyecto e investigaciones cuyo alcance abarca la porción sur del Golfo de California (*t7_tns_bibliografia_GC*) (**ANEXO 1 - B**) (**TABLA 3**). El concepto de esta tabla es reducir la repetición de información innecesaria en otros archivos de la base de datos y optimizar el análisis y edición por medio de relación de tablas, aparte de brindar una referencia de los trabajos que se han realizado en la porción sur del Golfo de California. Esto se logra generando un código de identificación *-ID_bibliografia-* para cada referente bibliográfico, el cual solo es necesario añadir en otras tablas para que luego el software -en este caso QGIS- interprete la relación de cada dato con su respectiva fuente. Los únicos archivos que cuentan con dicho código en la base de datos de la porción sur del Golfo de California son: las muestras submarinas (*v6_gos_m-litologia_SGC*) y la posición de los perfiles.

TABLA 3. Estructura de la tabla de metadatos bibliográficos integrada en la base de datos de la porción sur del Golfo de California (t7_tns_bibliografia_GC).

| Atributo | Contenido | Descripción |
|--------------------|---|--|
| ID_bibliografía | numero entero irrepetible (arbitrario) | Código de referencia del documento. |
| titulo | texto sin restricción | Título del documento. |
| autor | texto sin restricción | Autor principal, el resto se agregan como secundarios (et al.). |
| año | numero entero de 4 dígitos | El año de publicación del documento. |
| doi_link | texto sin restricción | DOI o link de referencia del documento. |
| tipo_documento | texto sin restricción | El tipo de documento: articulo, tesis, reporte, etc. |
| tipo_investigacion | recopilación/simple/completo | recopilación: investigación que analiza los datos de diferentes autores y genera nuevas hipótesis a partir de estos; simple: investigación que solo analiza los datos propios; completa: investigación que analiza tanto sus datos, como los de otros autores para hacer análisis más complejos. |
| resumen | texto sin restricción | El abstract del documento. |
| margen | marino/continental/marino & continental | En qué margen se encuentra la investigación con respecto al golfo. |
| direcon_golfo | N/NW/NE/S/SW/SE/E/W/All | Dirección de localización del documento respecto al golfo. |
| foco_estudio | texto sin restricción | Cuerpo, o tema principal estudiado en el documento. |
| info-sub | si/no | El documento tiene información submarina en el golfo de california? |
| alcance-golfo | local/regional/global | Alcance de la investigación con respecto al golfo de california. |
| mapas_usables | si/no | El documento presenta mapas georreferenciables para extraer información? |
| datos | Gq/Lt/Gf/Go/Ag/Ge/St | Gq: Contiene datos geoquímicos; Lt: Contiene datos relacionados con la roca y análisis de muestras; Gf: Contiene datos geofísicos; Go: Contiene datos geológicos en general (Columnas, perfiles, datos geológicos específicos); Ag: Contiene datos de datación y edades en muestras; Ge: Contiene datos de evolución e historias tectónicas; St: Contiene datos estructurales. |
| tipo_datos | sp/nsp/md | sp: datos espaciales; nsp: datos no espaciales; md: modelos en formato ráster. |

interpretados (*v6_gg_perfiles_SGC*). De esta manera, ambas entidades de la base de datos no requieren gestión de la información de autores correspondientes, puesto que esto se lleva controlado en la tabla de metadatos de la bibliografía de la porción sur del Golfo de California. Aunque directamente la tabla de bibliografía no sea un factor que permita determinar la posición o características de las cortezas o la geología submarina de la porción sur del Golfo de California, su función es indispensable para mantener orden y consistencia entre los archivos almacenados en la base de datos.

5. Capítulo V

Discusión y Conclusiones

5.1. Discusión

En el presente trabajo se propone, mediante la construcción de una base de datos de información bibliográfica, un acercamiento a lo que podría ser el mapeo generalizado de la disposición tectónica y la geología submarina en porción sur del Golfo de California (FIGURA 9).

5.1.1. Refinamiento del límite corteza oceánica – corteza continental de la porción sur del Golfo de California a partir de la base de datos desarrollada

Los primeros estudios de caracterización del fondo marino de la porción sur del Golfo de California que se han utilizado como referencia cartográfica en la bibliografía son los realizados por el Deep Sea Drilling Project - Leg 63, 64 y 65 (1978 - 1979); Moore (1973) y Lonsdale (1989, 1991). La disponibilidad a estos modelos y mapas en formato digital o a los datos implementados por dichos autores no se suele encontrar de manera libre, o si existe acceso a estos, es complejo y limitado. Esta situación deja a la georreferenciación de imágenes como la única alternativa que se tiene de interactuar con dichos datos, a pesar de ser un método poco recomendado debido a la posibilidad de perder información y calidad en la precisión de la cartografía. Pese a que estos autores hayan realizado una delimitación de las cortezas bastante aproximada a partir de diferentes métodos geocientíficos (e.g. geofísica, muestreo y descripción litológica,

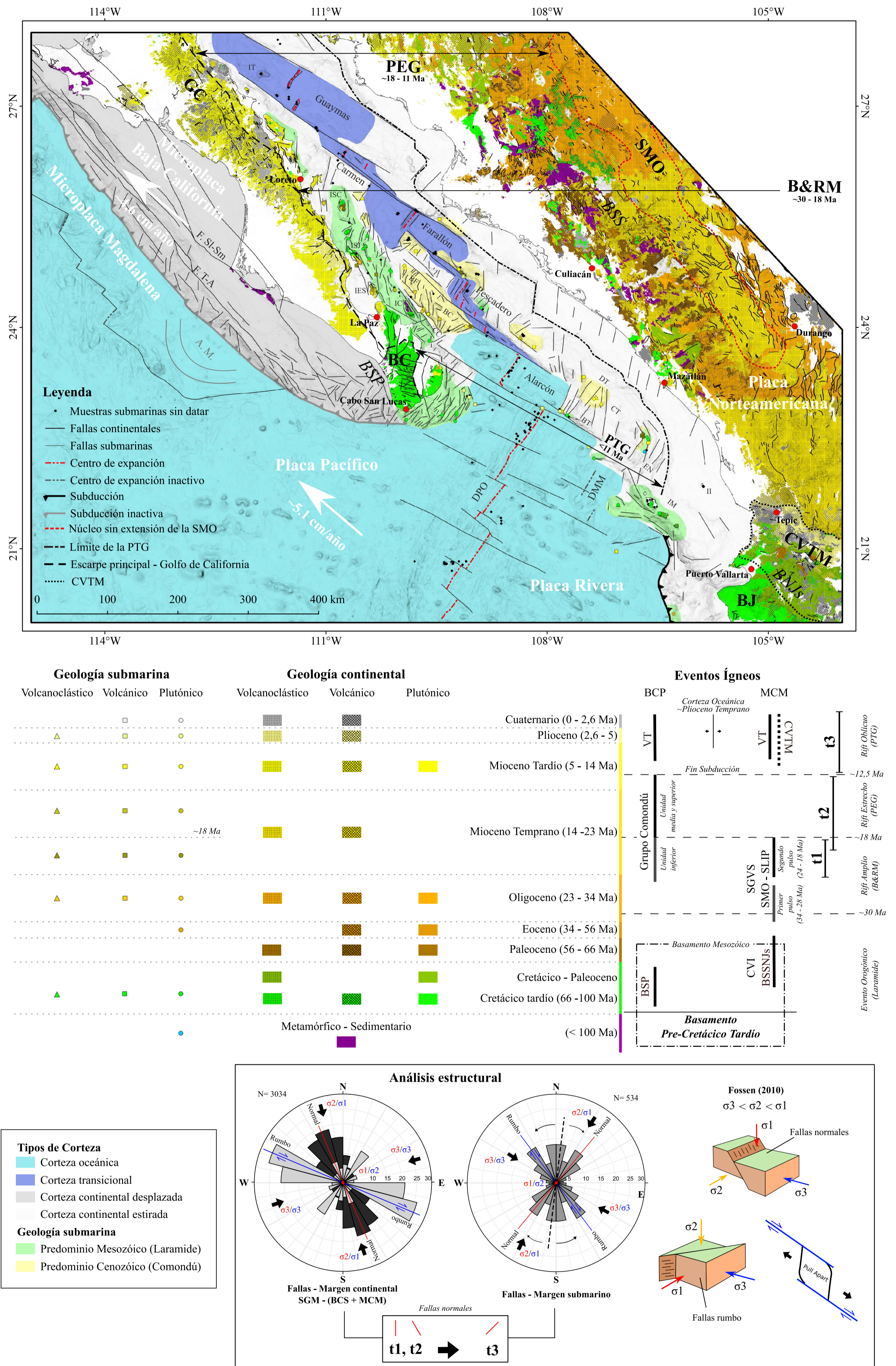


FIGURA 9. Resumen y análisis de la información integrada en base de datos de la porción sur del Golfo de California desarrollada en el presente trabajo: delimitación de las cortezas oceánica y continental; distribución espaciotemporal de la geología submarina; y relación estructural entre las fallas del margen marino y continental con las posibles disposiciones de los esfuerzos principales. Los límites Provincia Extensional del Golfo (PEG) y la Sierra Madre Occidental (SMO) – Núcleo sin extensión, son modificados de Ferrari et al., 2013. La carta de eventos fue reutilizada de la **sección 2.1**, realizada a partir de Ferrari et al, 2018; Duque-Trujillo et al., 2015 y Bryan et al., 2014. La cinemática actual de las placas fue tomada de Plattner et al., 2007 y DeMets, 1995. CVTM – Cinturón Volcánico Transmexicano; SMO – Sierra Madre Occidental; GC – Grupo Comondú; BC – Bloque Los Cabos; BJ – Bloque Jalisco; BCS – Baja California Sur; BCP – Península de Baja California; MCM – Margen Continental Mexicana; BSP – Batolitos de la Sierra Peninsular; BSSNJs – Batolitos de Sonora, Sinaloa, Nayarit y Jalisco; CVI – Complejo Volcánico Inferior; SGVS - Super Grupo Volcánico Superior; VT – Vulcanismo Transensional; SGM -Servicio Geológico Mexicano; DT – Domo de Tamayo; BT – Banco de Tamayo; CT – Cañón de Tamayo; EN – Escarpes de Nayarit; IM – Islas Marias; II – Isla Isabel; IC – Isla Cerralvo; IES – Isla Espíritu Santo; ISI – Isla San José; ISC – Isla Santa Catalina; IT – Isla Tortuga; BC – Banco Cerralvo; BF – Banco Foca; CC – Cañón Cerralvo; DPO – Dorsal del Pacífico Oriental; DMM – Dorsal de María Magdalena; F. T-A – Sistema de fallas Tosco-Abreojos; F. Sl-Sm – Sistema de fallas San Lorenzo-Santa Margarita; B&RM – Basin & Range Mexicano; PTG –Provincia transensional del Golfo de California; PEG – Provincia extensional del Golfo de California.

geoquímica); hoy en día también se han llevado a cabo nuevos proyectos que hacen aportes claves en la caracterización del fondo marino en el Golfo de California, los cuales podrían proporcionar mayor precisión a la hora de delimitar estas cortezas (e.g. Lizarralde et al., 2007; Dañobeitia et al., 2016; Sutherland et al., 2012; Hernández, 2010 y Piñero Lajas, 2008). Con ayuda de la base de datos desarrollada en el presente trabajo se unificaron los datos disponibles en la literatura, tanto directos, como georreferenciados, para proporcionar un refinamiento de los límites tectónicos en la porción sur del Golfo de California en formato digital, el cual brindaría un acceso eficiente a esta información.

Antes de poder redefinir el límite entre las cortezas a lo largo de la porción sur del Golfo de California con la base de datos, es necesario establecer las características generales que diferencian a cada una de estas. En la **TABLA 4.** se compilaron las principales características de cada corteza descritas por diferentes autores; la **FIGURA 10.** sintetiza lo anterior en un diagrama representativo. Comparando las descripciones recopiladas, se pudo inferir que: la corteza oceánica es principalmente de composición máfica; en promedio de 7 km de espesor, el cual no suele cambiar en el tiempo (Condie, 2016); y según sus propiedades físicas se comporta como un cuerpo denso y homogéneo. Al ser delgada, el manto se encuentra más cerca de la superficie, por lo que los valores de anomalía de Bouguer son altos -más de 300 mGal-. La simetría en el proceso de extensión y formación de suelo oceánico desde las dorsales y la composición principalmente ferromagnética hacen que se registre un patrón bandeado en la anomalía

TABLA 4. Recopilación de las características distintivas de la corteza oceánica y continental entre diferentes autores.

| Corteza Oceánica | | | | | |
|-----------------------|--------------|--|---|------------------------|---|
| Autor | Espesor | Composición general | Anomalía magnética | Anomalía gravitacional | Notas |
| Winter, 2010 | ~ 10 km | Basáltica | Patrón bandeado | | Homogénea |
| Condie, 2016 | ~ 7 - 10 km | Basáltica | | 250 mGal (Bg) | Homogénea |
| Roberts & Bally, 2012 | ~ 7 km | Basáltica | | | Homogénea |
| Meissner, 1986 | ~ 5 km | Máficas | Patrón bandeado | | Homogénea |
| Lowrie, 2007 | ~ 6 - 8 km | | Patrón bandeado | 300 - 400 mGal (Bg) | D: 2900 kg/m ³ |
| Corteza Continental | | | | | |
| Autor | Espesor | Composición general | Anomalía magnética | Anomalía gravitacional | Notas |
| Winter, 2010 | ~ 36 km | Granodiorítica | | | Heterogénea |
| Condie, 2016 | ~ 40 km | Granodiorítica (superior: félsica / inferior: máficas) | | -100 mGal (Bg) | Heterogénea |
| Roberts & Bally, 2012 | ~ 35 - 40 km | Granítica | | | Múltiples eventos; Heterogénea |
| Meissner, 1986 | ~ 20 - 70 km | Granítica | Difuso; heterogéneo; sin ningún patrón en particular | | Heterogénea |
| Lowrie, 2007 | ~ 38 - 40 km | | Difuso; heterogéneo; sin ningún patrón en particular | -150 - -200 mGal (Bg) | D: superior - 2800 kg/m ³ ; inferior - 2900 kg/m ³ |

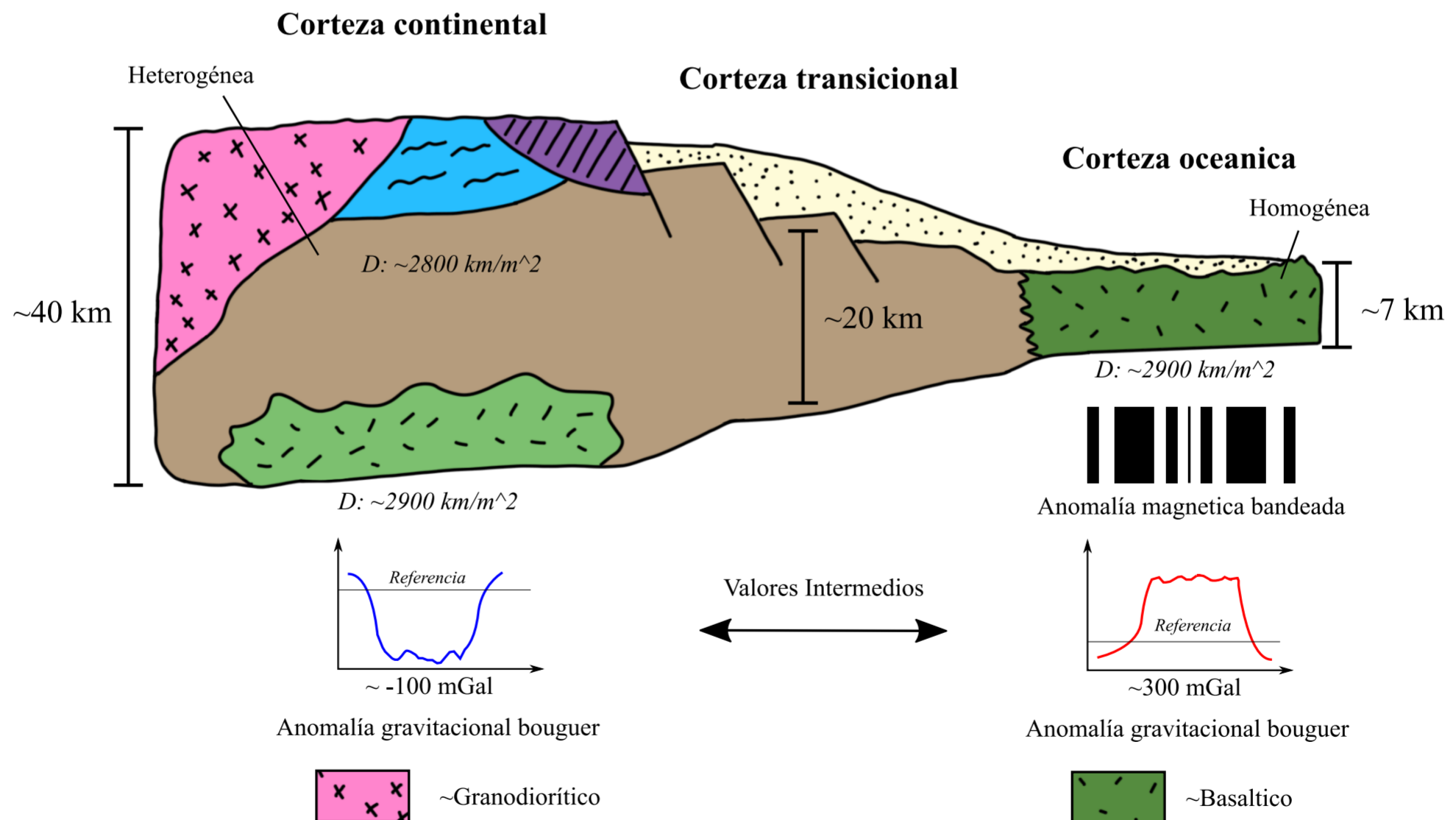


FIGURA 10. Esquema generalizado de los tipos de cortezas y sus características, ambientado en el Golfo de California según el ambiente tectónico actual -extensión-. El diagrama se realizó a partir de la bibliografía resumida en la TABLA 4., la cual resume las propiedades distintivas de las corteza oceánica y continental. El concepto de una corteza transicional de características intermedias entre las cortezas principales es tomado de Condie, 2016.

magnética, producto de la inversión de los polos magnéticos terrestres a lo largo del tiempo (Lowrie, 2007). En contraste, la heterogeneidad en la composición de la corteza continental hace que sus propiedades sean mucho más variables. Esta corteza se puede subdividir en dos porciones: la superior, que es aproximadamente félsica -en general granodiorítica-; y la inferior, que debido a su densidad y evidencias mineralógicas como xenolitos y productos corticales profundos que llegan a la superficie, se plantea que presenta afinidad máfica (Condie, 2016). El espesor promedio es de 40 km; sin embargo, la corteza continental se puede estirar y engrosar, variando entre 20 y 70 km respectivamente (Condie, 2016; Roberts & Bally, 2012). Esta variación en el espesor también se refleja en los rangos de anomalía de Bouguer, los cuales suelen ser mucho menores que en la corteza oceánica ~ 100 mGal-, y siguen disminuyendo entre más gruesa sea la corteza, debido al efecto isostático que desplaza el manto denso que se encuentra por debajo (Lowrie, 2007). En cuanto a la anomalía magnética, la heterogeneidad composicional produce un patrón difuso (manchas), que también puede variar a patrones uniformes o estructuras claras a partir de la forma, profundidad y orientación de los diferentes cuerpos con propiedades magnéticas al interior de la corteza continental (Lowrie, 2007; Meissner, 1986).

El procedimiento llevado a cabo para la delimitación y reconocimiento de las cortezas en la porción sur del Golfo de California a partir de los datos unificados en la base de datos desarrollada en el presente trabajo se basó en la relación, evaluación y jerarquización de datos geológicos mediante la superposición y comparación en el software QGIS. Dicho procedimiento se puede dividir en tres etapas fundamentales: i)

Análisis de perfiles transversales de la corteza; ii) Interpolación de las interpretaciones de los perfiles en el plano geográfico; y iii) Correlación con los modelos establecidos en la bibliografía. En la primera etapa se generaron perfiles batimétricos a lo largo de la extensión submarina de la porción sur del Golfo de California. A estos perfiles se les sobrepusieron datos de muestreo geológico submarino, anomalías magnéticas y gravitacionales, perfiles sísmicos interpretados y cartografía geológica georreferenciada, con el fin de identificar los tipos de cortezas y los límites entre estas desde una perspectiva transversal. Para visualizar esto de mejor manera, se usará como ejemplo el perfil realizado en la boca del Golfo de California (Cabo San Lucas - Puerto Vallarta) (**FIGURA 11**). En esta región, la corteza oceánica se encuentra en la parte central de la sección realizada. Esta corteza se diferencia por los valores de anomalía de Bouguer elevados (300 – 350 mGal), un patrón de anomalía magnética bandeado, y la predominancia de muestras litológicas máficas (basaltos). Comparando la anomalía de aire libre con la batimetría, es posible detectar dos secciones montañosas en dicha corteza, que en la literatura se han descrito como dorsales (e.g. Lonsdale, 1989). La Dorsal del Pacífico Oriental (DPO) se encuentra al occidente del perfil, entre los ~160 y ~270 km, y comprende una extensión aproximada de ~110 km (**FIGURA 11, e**). El centro de expansión de esta dorsal se encuentra en los 220 km, donde se observa una amplia zona de anomalía magnética positiva (color rojo con valores de ~180 nT), junto con la predominancia de muestras máficas recolectadas. Hacia el este de dicha dorsal, la corteza oceánica corresponde a la llamada Placa Rivera, mientras que la parte oeste

Sección transversal – Boca del Golfo de California

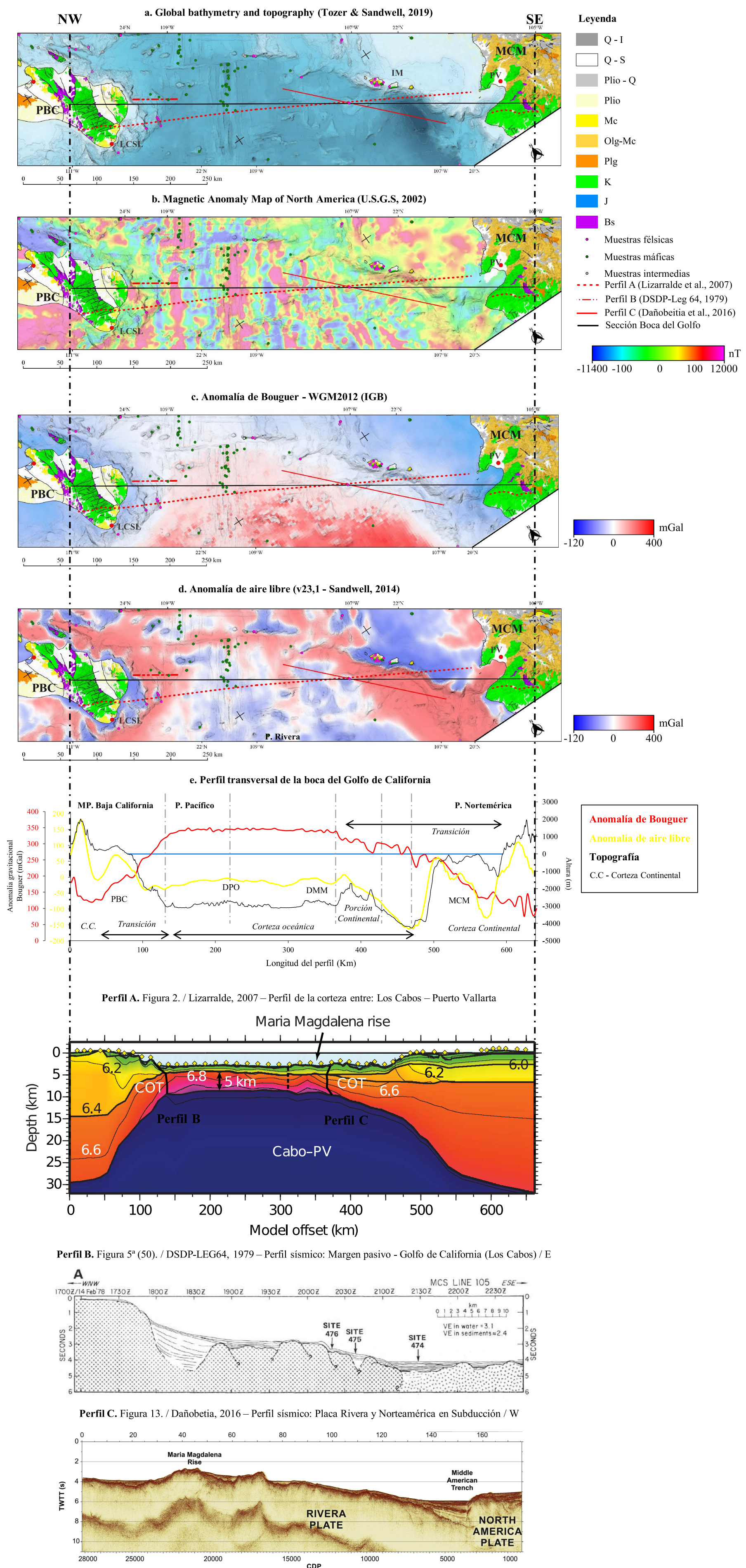


FIGURA 11. Identificación del tipo y los límites de cortezas en la boca del Golfo de California (Los Cabos – Puerto Vallarta) a través de la correlación transversal de la información integrada en la base de datos de la porción sur del Golfo de California desarrollada en presente trabajo. PBC – Península de Baja California; MCM – Margen Continental Mexicano; PV – Puerto Vallarta; LCSL – Cabos San Lucas; IM – Islas Mariás; DPO – Dorsal del Pacífico Oriental; DMM – Dorsal de Maria Magdalena; M-F – muestras félsicas; M-I – muestras intermedias; M-M – muestra máficas; Q-I – Cuaternario ígneo; Q-S – Cuaternario sedimentario; Plio – Plioceno; Mc – Mioceno; Olg – Oligoceno; Plg – Paleoceno; K – Cretácico; Bs – Basamento.

corresponde a la Placa Pacífico (Lonsdale, 1989; Yeats & Haq, 1978). La segunda dorsal que se describe en el perfil realizado en la boca del Golfo de California es la Dorsal de María Magdalena (DMM) (Lonsdale, 1989; Yeats & Haq, 1978). Esta aparece hacia el este de la DPO, entre los ~320 y ~360 km (**FIGURA 11, e**). Tanto la anomalía de aire libre como la batimetría evidencian la existencia de esta extensión montañosa submarina de aproximadamente ~80 km de extensión. La anomalía de Bouguer deja ver que ambas dorsales tienen una composición similar, debido a que los valores se mantienen constante (~350 mGal); aunque la falta de muestras en la Dorsal de María Magdalena pone duda cual es con certeza su composición. El patrón bandeado de anomalía magnética se corta entre estas dos dorsales, y se vuelve menos reconocible en la DMM, pero se puede seguir distinguiendo de la corteza continental.

Hacia ambos extremos del perfil -este y oeste- la anomalía de Bouguer comienza a disminuir gradualmente producto del cambio en la densidad del material con respecto al centro. Esto concuerda con la aparición de corteza continental, que es menos densa (**TABLA 4**), del margen mexicano al este, y la península de Baja California al oeste, respectivamente. Esta disminución gradual es asimétrica entre ambos extremos del perfil, siendo abrupta en el extremo occidental, y suave en el oriental (**FIGURA 11, e**). La región de margen continental del extremo oeste del perfil corresponde con la Microplaca de Baja California. El límite entre esta placa y la corteza oceánica referente a la Placa Pacífico está determinado por el cambio abrupto en la pendiente tanto del perfil topográfico, como de la anomalía de aire libre (**FIGURA 11, e**); el perfil sísmico interpretado por Yeats & Haq (1978), establece que dicho contacto es de tipo margen

pasivo (**FIGURA 11, perfil B**). El rango en aumento de anomalía de Bouguer desde la Microplaca Baja California hacia la Placa Pacífico -entre los 50 y 130 km- permite inferir que la corteza en esta zona puede ser continental transicional debido al estiramiento. La parte este del perfil en la boca del Golfo de California se puede dividir en dos porciones. La primera porción corresponde a un alto de aproximadamente 50 km de extensión al este de la Dorsal de María Magdalena -entre 360 y 420 km- (**FIGURA 11, e**). Este cuerpo se respaldada por la muestra de material félsico presente, la disminución de la anomalía de Bouguer, y el corte en el patrón de anomalía magnética, que reflejan una afinidad continental. Debido a que la anomalía no disminuye considerablemente, se concluye que este fragmento de corteza continental no tiene un espesor considerable. Dicho fragmento ya había sido identificado previamente por Lonsdale, (1989) en su cartografía del fondo marino del Golfo de California. La segunda porción de corteza continental al este del perfil en la boca del Golfo de California está representada por valores bajos de anomalía de Bouguer $\sim 100 - 50$ mGal- y un patrón de anomalía magnética difuso. Esta porción de corteza es correlacionable con la geología continental del margen occidental de la placa Norteamérica (**FIGURA 11, e**). El cambio abrupto en la batimetría, que también es reflejado en la anomalía de aire libre, se atribuye a la depresión submarina, la cual se puede relacionada con la Fosa Mesoamericana. La investigación de Dañobeitia et al., 2016, determinó por medio de sísmica de reflexión (**FIGURA 11, perfil C**) que en el margen continental al occidente de México se encuentra la Placa Rivera en subducción con el Bloque Jalisco, reafirmando lo planteado por Ferrari et al. (2000, 2001). Una porción de corteza continental tipo transicional estirada está localizada entre los 350 y los

590 km del perfil, integrando el bloque continental fragmentado, puede ser inferida por medio de la gradación de la anomalía de Bouger.

Una vez interpretados los cortes transversales a lo largo de la porción sur del Golfo de California (etapa 1), la siguiente etapa consistió en reconocer e interpolar cada cuerpo y límite definido en los perfiles en el plano geográfico. La correlación de varios límites en dichos perfiles transversales paralelos con diferentes coberturas del plano geográfico permitió determinar la manera en la que se debían extender los límites entre las cortezas, tal y como se observa en la **FIGURA 12, B - d**. En esta etapa la base de datos desempeñó un papel fundamental integrando la información de diversos autores, sin embargo, el pensamiento crítico geológico fue importante al momento de seleccionar y jerarquizar la información que mejor representaba la posición de los límites. Finalmente se obtuvo una representación preliminar de los tipos y los bordes de corteza para la porción sur del Golfo de California, el cual se evaluó junto a los modelos y mapas diseñados e interpretados por otros autores (etapa 3) para conseguir el refinamiento de la posición de los límites corticales en un nuevo archivo de la base de datos: límite de cortezas de la porción sur del Golfo de California (v1_gos_limites-tectonicos_SGC) (**FIGURA 12, B**) (**ANEXO 1 - A**).

5.1.2. Resumen de las características geológicas principales del fondo marino a partir de la base de datos de la porción sur del Golfo de California

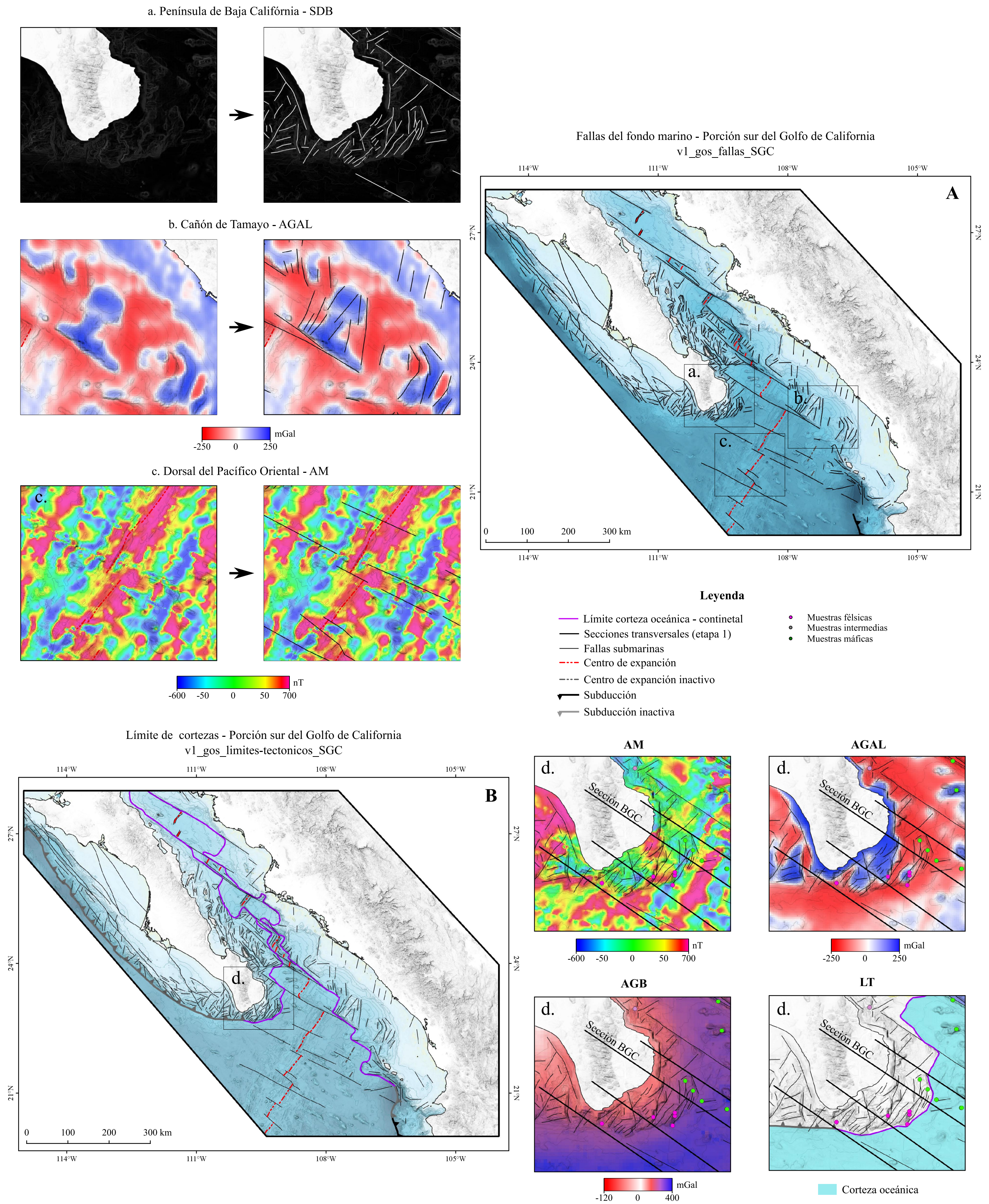


FIGURA 12. Representación espacial de los nuevos archivos vectoriales desarrollados a partir de la información integrada en la base de datos de la porción sur del Golfo de California del presente trabajo: fallas submarinas (v1_gos_fallas_SGC) (A), y límites tectónicos entre la corteza oceánica y continental (v1_gos_limites-tectonicos_SGC) (B). La anomalía magnética, la batimetría, la anomalía gravitacional con corrección de aire libre y con corrección de Bouguer corresponden a los modelos agregados a la base de datos, tomados de Bankey et al., 2002; Tozer et al., 2019; Sandwell et al., 2014; Bonvalot et al., 2012; respectivamente. SDB – Filtro sobel del DEM de batimetría; AGAL — Anomalía gravitacional con corrección de aire libre; AGB – Anomalía gravitacional con corrección de Bouguer; AM – Anomalía magnética; LT – Límites tectónicos; BGC – Boca del Golfo de California.

5.1.3. Análisis estructural de la porción sur del Golfo de California

El límite entre la placa oceánica y continental (v1_gos_limites-tectonicos_SGC) fue uno de los datos que se pudo desarrollar a partir de la información almacenada en la base de datos. Otro de estos parámetros asociados con la tectónica son las fallas del margen submarino. Prácticamente la cartografía de las fallas submarinas está limitada a algunos artículos con dicha cartografía (e.g. Duque-Trujillo et al., 2015; Ferrari et al., 2013; Lonsdale, 1998), y en algunos casos solo se muestran las principales (**FIGURA 2**), y adicionalmente no se ha encontrado un análisis estructural de estas.

Con la información de la base de datos también fue posible delimitar estas fallas en un nuevo archivo disponible en la base de datos: fallas submarinas de la porción sur del Golfo de California (v1_gos_fallas_SGC) (**FIGURA 12, A**) (**ANEXO 1 - A**). Para crear esta entidad se utilizó principalmente la batimetría en la identificación de geoformas submarinas estructurales que evidencian discontinuidad, potenciada con el filtro de bordes sobel (**FIGURA 12, A - a**). También se utilizó la anomalía gravitacional de aire libre, la cual permitió localizar discontinuidades que se encuentran enterradas bajo capas de sedimentos (Sandwell et al., 2014) (**FIGURA 12, A - b**); mientras que la anomalía magnética se empleó principalmente para cartografiar las fallas del suelo oceánico, en donde se observaba la discontinuidad en el patrón bandeado (**FIGURA 12, A - c**). Al igual que con las estructuras continentales se sacó el rumbo de estas y se creó un diagrama de rosas correspondiente. Debido a que las fallas submarinas se localizan principalmente en el área de la extensión más reciente que dio origen al Golfo de California (PTG), utilizando la forma de las cuencas sumergidas -cuencas pull-apart y de

terminación de fallas de trastensión (Umhoefer et al, 2007; Van Wijk et al., 2017)-, junto con evidencias cinemáticas establecidas por varios autores en dichas cuencas (e.g. Lonsdale 1989, Umhoefer et al., 2011; Bennett & Oskin, 2014; Miller et al., 2013) y la dirección de desplazamiento de las placas(Plattner et al. 2007), se pudo atribuir al diagrama de rosas diseñado que la dirección actual de estiramiento (y por ende del menor esfuerzo σ_3) en el Golfo de California -rift oblicuo- es NW-SE, justo despues después de los ~12,5 Ma. A partir de lo anterior, y que en la cartografía submarina las fallas transformantes identificadas tienen dirección NW-SE (Lonsdale, 1989), se determinó la configuración de los esfuerzos en el margen submarino usando como referencia los diagramas de esfuerzos modificados de Fossen (2010) (**FIGURA 9 – análisis estructuralError! Reference source not found.**). De esta manera, las fallas con dirección ~NW-SE tendrían una componente principal de rumbo, mientras que las fallas con dirección ~NE-SW una componente normal. Las fallas dispuestas entre estas dos direcciones principales podrían estar experimentando una combinación de estas componentes.

A el diagrama de rosas de las fallas continentales del INEGI (1980 - 1990), descrito en la **sección 4.2.3**, también se le definió dichos esfuerzos principales, pero esta vez únicamente a partir de la disposición de los tipos de fallas del cual ya se tenía conocimiento, utilizando nuevamente los diagramas de esfuerzos en fallas normales y de rumbo establecidos por Fossen (2010) (**FIGURA 9 – análisis estructuralError! Reference source not found.**). La posible disposición del menor esfuerzo σ_3 que afecta entonces a estas las fallas continentales podría estar aproximadamente en dirección NE-

SW. Adicionalmente Duque-Trujillo et al., 2014 concluyó con la cartografía y datación de fallas e indicadores cinemáticos en la porción sur de la SMO (margen continental mexicano), que existen dos principales eventos de estiramiento en la Golfo: un primer evento de fallas normales con dirección N-S con edad entre 24 - 18Ma (3 - E-W); y un segundo evento con fallas normales en dirección NNW-SSE (3 - ENE-WSW) y con edades entre 21 - 11 Ma. Este aporte concuerda con la disposición de las fallas del INEGI 1980-1990, y por lo tanto puede ser correlacionado; sin embargo, el último evento es el que más sobresale en la tendencia general de diagrama de rosas continental, teniendo el estiramiento (y menor esfuerzo 3) en dirección ~NNW-SSE, mientras que el primer evento estaría opacado u obscurecido posiblemente por la diferencia en la cantidad de datos de cada uno.

Comparando los diagramas de rosas de ambas márgenes en la porción sur del Golfo de California se puede observar una diferencia en la configuración de los esfuerzos principales. Las fallas submarinas muestran el estiramiento principal (esfuerzo menor 3) al NW-SE, mientras que las fallas continentales de la cartografía del INEGI hacia el NE-SW. A partir de este contraste, principalmente evaluado desde el punto de vista de las fallas normales, se pueden diferenciar 3 eventos de cambio en los esfuerzos, teniendo en cuenta las edades correlacionadas de Duque-Trujillo et al., 2014. De esta manera, el orden de los eventos serían: **t1** para las fallas continentales N-S (24 - 18 Ma.); **t2**, las fallas NNW-SSE (21 -11 Ma.); y las fallas submarinas ~NE-SW representan el último tiempo, puesto que se desarrollaron en la PTG (12,5 Ma - Presente) (**t3**). Existe una relación directa entre estos eventos de cambio de dirección de esfuerzos y los eventos

geológicos de extensión recopilados en la carta de eventos desarrollada (**FIGURA 9 – Eventos Ígneos**). La extensión del B&RM es contemporánea con las fallas normales del evento **t1**; la extensión de la provincia del golfo (PEG) se relacionaría en mayor medida con el evento **t2**, aunque este pudo haber empezado un poco antes; y por último, la extensión oblicua (PTG) controla las fallas submarinas del golfo (**t3**) (Ferrari et al., 2018; Duque-Trujillo et al., 2014).

5.1.4. Geología submarina de la porción sur del Golfo de California

En cuanto a la geología de la porción sur Golfo de California, se diferenció la distribución de las muestras submarinas según la predominancia de las rocas de una cierta edad. De esta manera se identificaron dos tendencias principales con continuidad de los eventos continentales en el margen submarino: muestras con edades del evento *Magmático Laramide (2.1.2)*, y muestras con edades el evento del *Grupo Comondú (2.1.3)* (**FIGURA 9**).

Las muestras del evento Laramide son principalmente plutónicas -graníticas-, con rangos de edades entre los 100 - 67 Ma. Se localizan por los alrededores del bloque los Cabos, extendiéndose al sur en contacto con la corteza oceánica del margen pasivo, y hacia el norte como un posible cuerpo alargado de dirección NW-SE en el margen marino al este de la península de Baja California (Balestrieri et al., 2017; Ferrari et al., 2018) (**FIGURA 9**). Este cuerpo alargado también se correlaciona con las anomalías magnéticas contrastantes de la península de Baja California (**FIGURA 6, C y D**). Estas anomalías se pueden producir por la presencia de cuerpos alargados altamente ferromagnéticos, siendo uno de ellos -la anomalía oriental- de composición granítica en el

límite de magnetita según García-Abdeslem (2014) y Gastil (1990). Adicionalmente estos cuerpos Cretácicos también aparecen hacia el sur de la porción sur del Golfo de California. En esta parte los cuerpos del magmatismo Laramide no muestran un patrón en específico, y las muestras encontradas solo permiten diferenciar algunas porciones submarinas. Se podrían ver como continuidad de los batolitos de Nayarit, Jalisco y Sinaloa en el margen submarino, los cuales fueron separados. Varios autores determinan que: reconstruyendo el estiramiento del golfo, se puede identificar un cinturón magmático en dirección NW-SE que se formaría por el proceso de subducción de la placa Farallones en los tiempos de la orogenia Laramide, y que posteriormente se disgregaría por las extensiones cenozoicas (e.g. Busby, 2004; Alsleben et al., 2014).

Con respecto a la actividad Cenozoica Media, esta se concentra principalmente en la parte central de la porción sur del Golfo de California, limitando con las cuencas Farallón al norte y Alarcón al sur. Debido a que las muestras presentan rangos de edades entre 20 - 19 Ma., y mayoritariamente se caracterizan por ser de tipo volcánico/plutónico intermedio a félsico -andesitas, granitos, dacitas, riolitas, ignimbritas- se pueden correlacionar con el evento magmático del Grupo Comondú - Miembro medio y superior (Balestrieri et al., 2017; Ferrari et al., 2018) (**FIGURA 9, eventos ígneos**).

Ferrari et al. (2018) determina que el cinturón Cretácico Laramide submarino al este de la península de Baja California se pudo haber comportado como un bloque divisor del evento del Grupo Comondú continental y submarino puesto que no se encuentra recubierto por la actividad Cenozoica, y además se pueden identificar focos de

magmatismo del grupo Comondú restringidos únicamente al margen continental, y otros al submarino.

5.1.5. Características del rift oblicuo actual (PTG)

Con la base de datos también se puede caracterizar la configuración dimensional del rift oblicuo del Cenozoico temprano y la formación de suelo oceánico de la PTG (**FIGURA 13**).

En la boca del Golfo de California se tiene como centros de expansión la DPO y la DMM (e.g. Lonsdale, 1989). Varios estudios han determinado que la DMM representó las primeras etapas de formación de suelo oceánico en esta zona, aproximadamente ~1 Ma antes que la DPO, y esta última, se ha determinado por medio de anomalía magnética una edad máxima de ~3,5 Ma (Yeats & Haq, 1978; Lizarralde et al., 2007; Lonsdale, 1989). La extensión de suelo oceánico desarrollada por la DPO es de ~185 Km; mientras que la DMM alcanzó a desarrollar ~75 km, dando una extensión total de ~255 km en la boca del golfo (**FIGURA 13**). Seguido de esta cuenca, continúan la cuenca Alarcón con 175 km de extensión de suelo oceánico desde los ~2 - 3 Ma (Yeats & Haq, 1978; Lizarralde et al., 2007) (**FIGURA 13**). Estas tres cuencas principales son las únicas en la porción sur del Golfo de California que presentan características típicas de corteza oceánica fácilmente diferenciables, como anomalía magnética con patrón de bandeas (**FIGURA 14, B**) o valores altos de anomalía de Bouguer >300 mGal- (**FIGURA 14, A**) (ver: **TABLA 4**).

De las cuencas al interior del golfo, la Cuenca Guaymas es la única con estimaciones de edad de estiramiento de la corteza, siendo desde los ~6 Ma que sucedió la ruptura

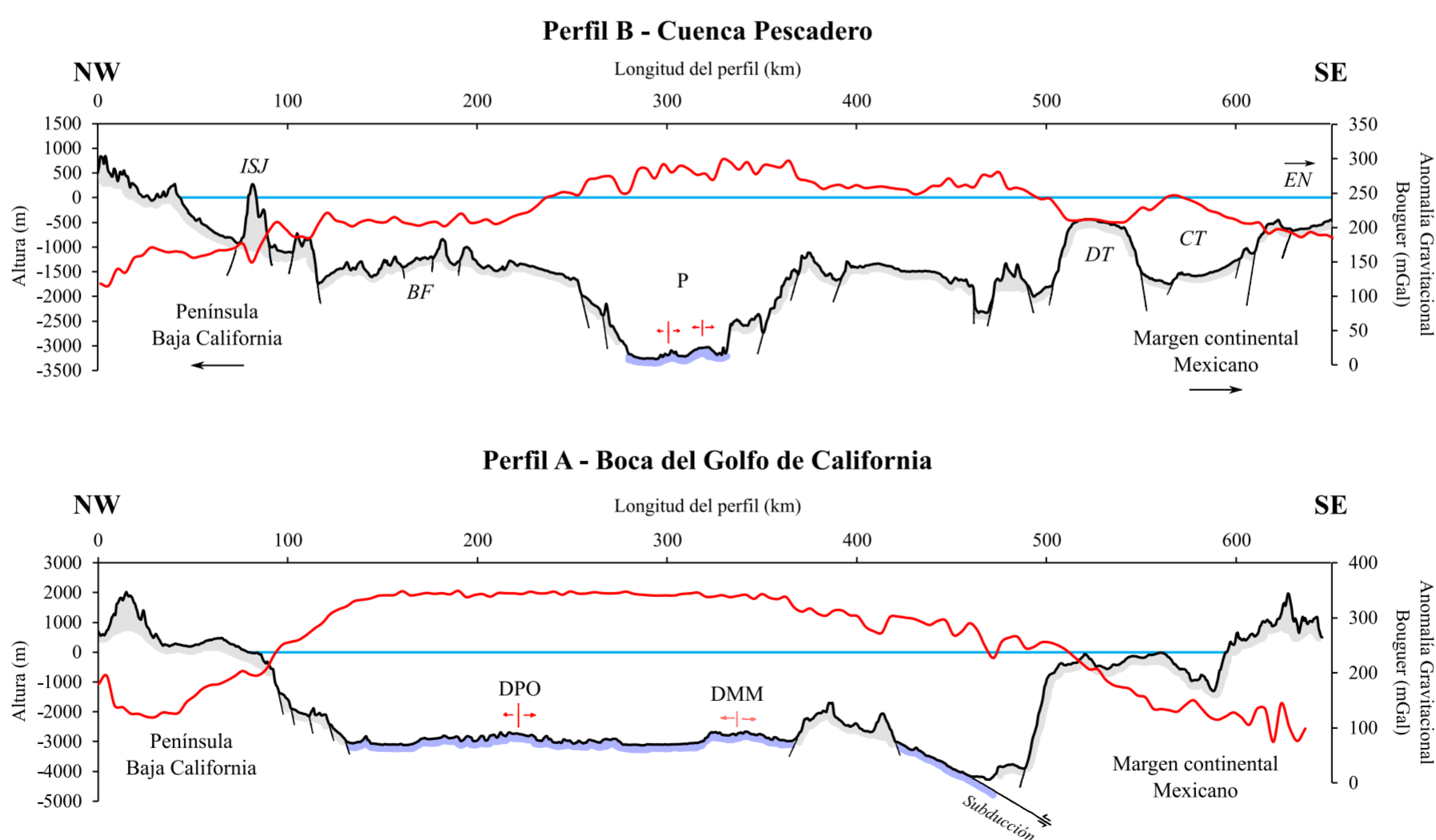
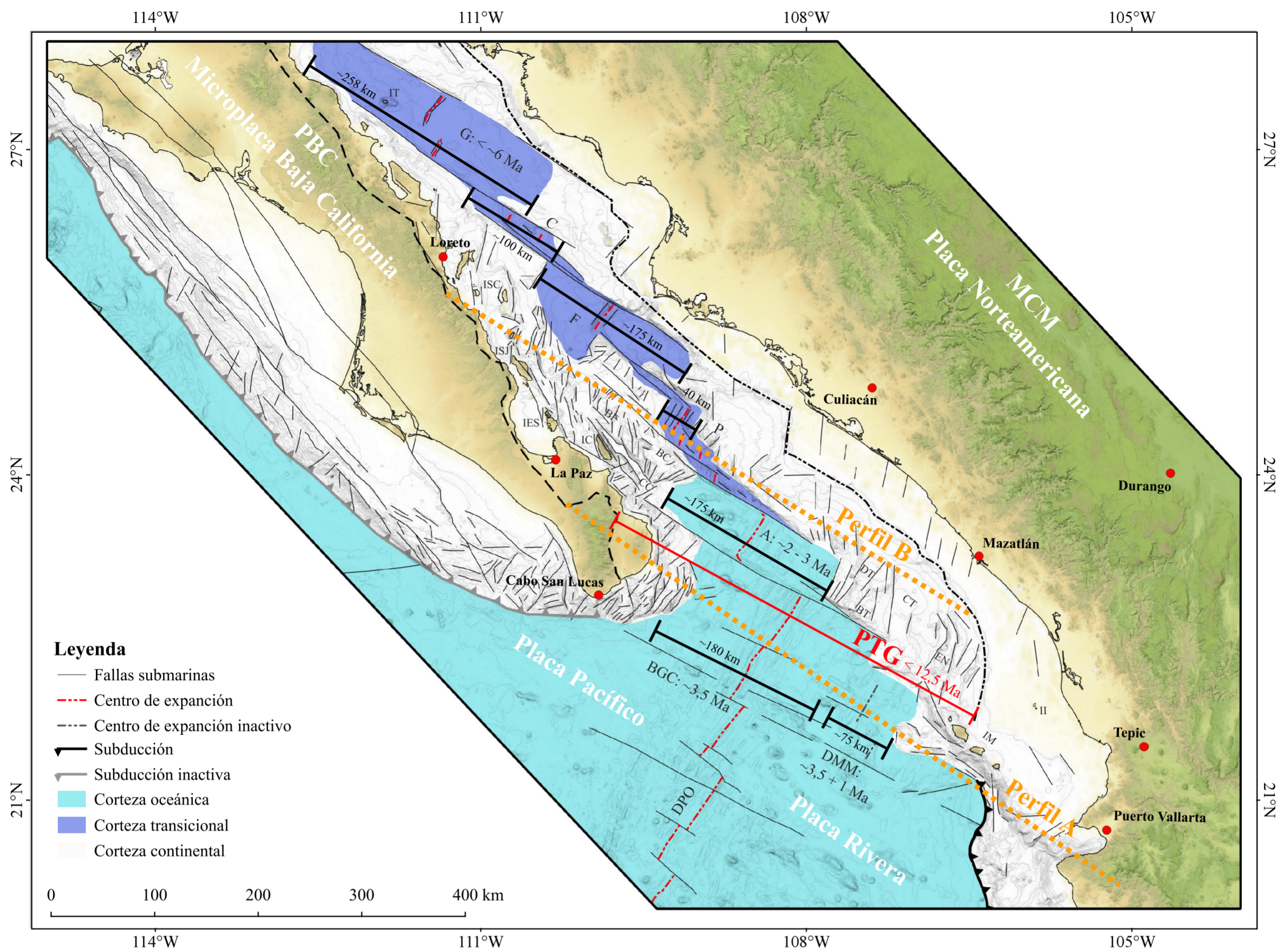


FIGURA 13. Heterogeneidades en la simetría y temporalidad de formación de corteza de afinidad oceánica entre los diferentes sistemas de expansión de la porción sur del Golfo de California. Las edades de la formación de corteza oceánica fueron tomadas de Lizarralde et al., 2007. La delimitación espacial y temporal de la Provincia Transensional del Golfo de California (PTG) fue tomada de Ferrari et al., 2018. G — Cuenca Guaymas; C — Cuenca Carmen; F — Cuenca Farallón; P — Cuenca Pescadero; A — Cuenca Alarcón; BGC — Boca del Golfo de California; MCM — Margen Continental Mexicana; DT — Domo de Tamayo; BT — Banco de Tamayo; CT — Cañón de Tamayo; EN — Escarpes de Nayarit; IM — Islas Mariás; II — Isla Isabel; IC — Isla Cerralvo; IES — Isla Espíritu Santo; ISI — Isla San José; ISC — Isla Santa Catalina; IT — Isla Tortuga; BC — Banco Cerralvo; BF — Banco Foca; CC — Cañón Cerralvo; DPO — Dorsal del Pacífico Oriental; DMM — Dorsal de María Magdalena; PBC — Península de Baja California.

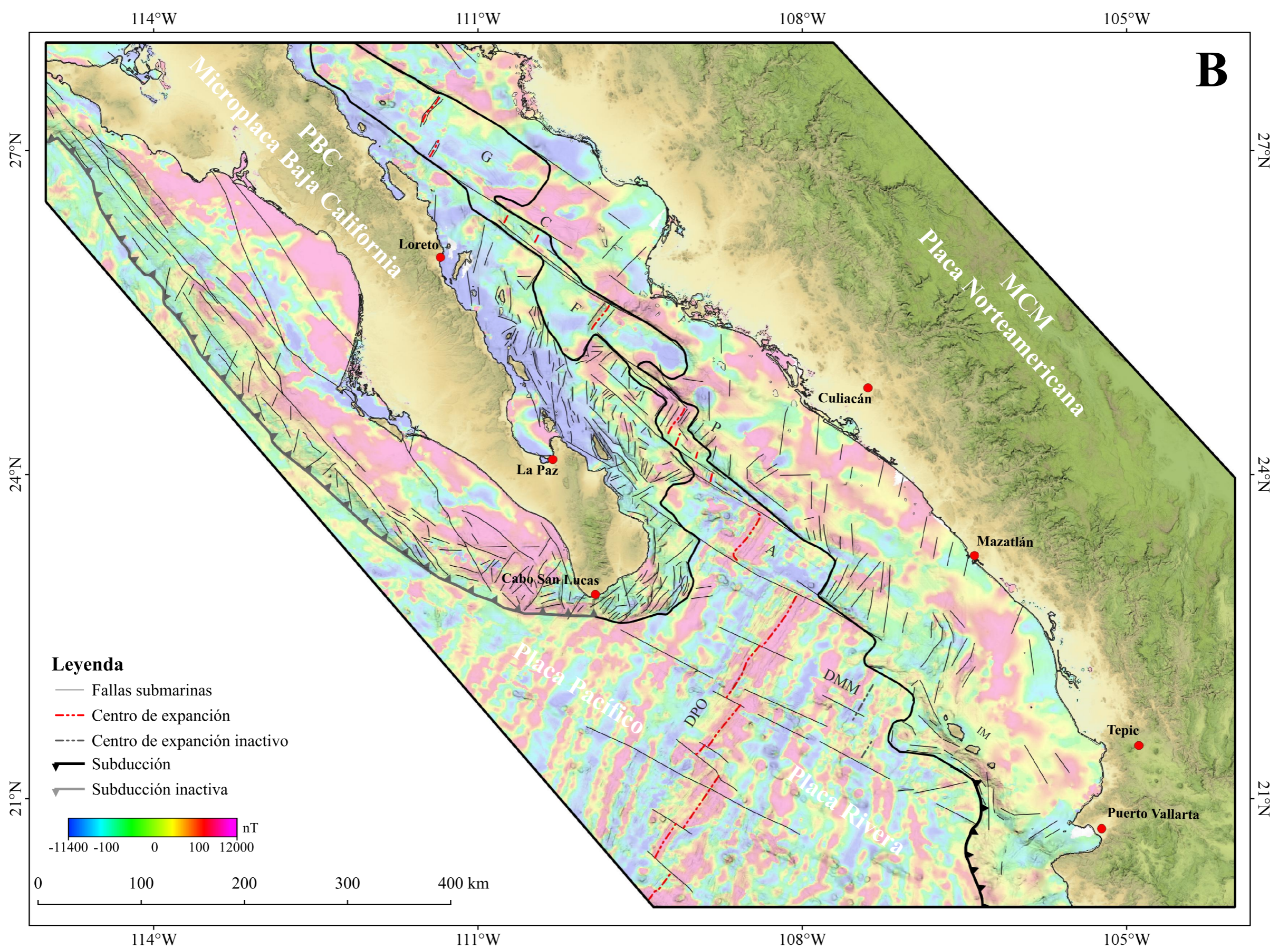
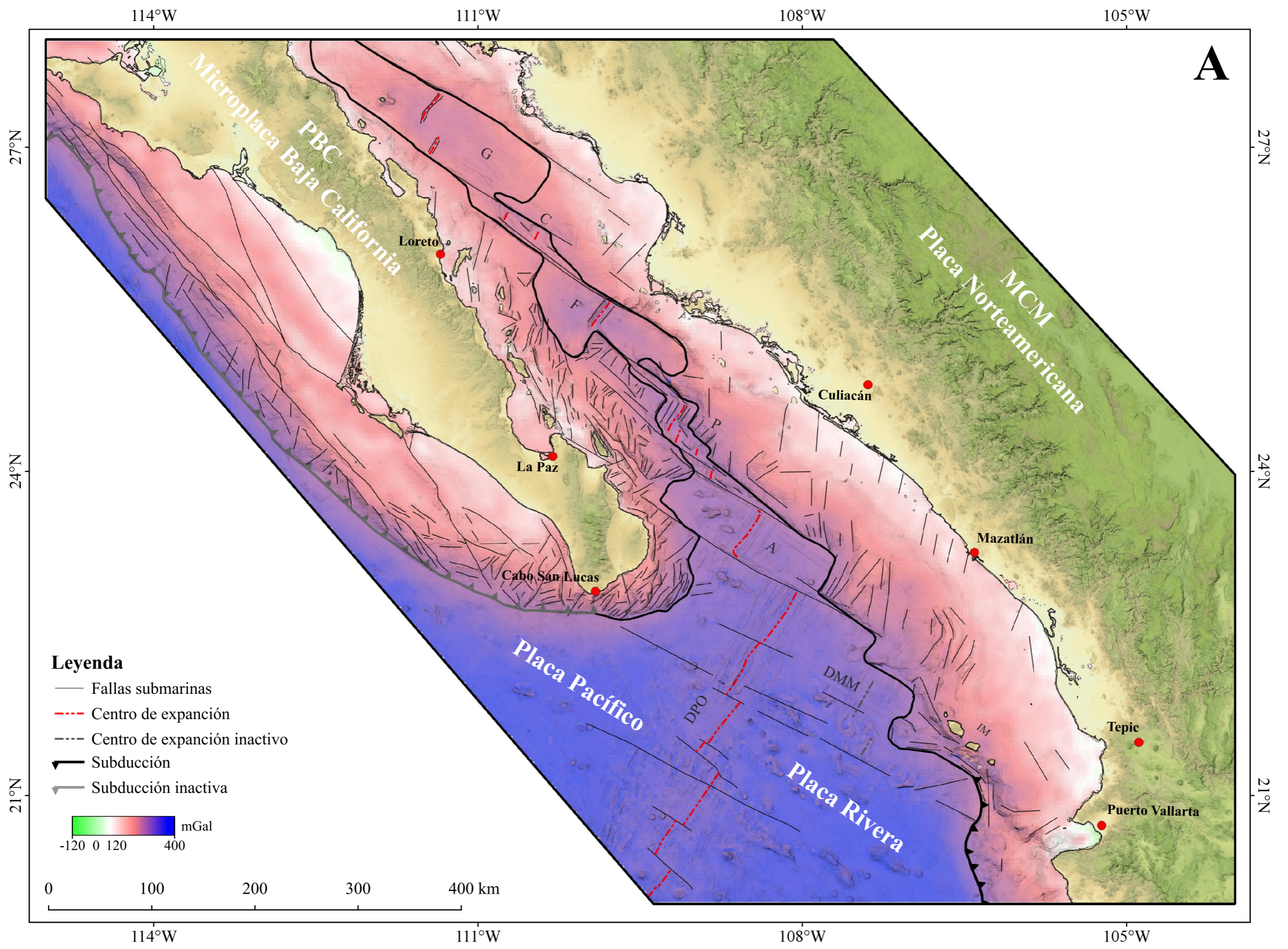


FIGURA 14. Heterogeneidades en la anomalía gravitacional con corrección de Bouguer (A) y anomalía magnética (B) a lo largo del fondo marino de la porción sur del Golfo de California. Para representar estas anomalías se utilizaron los modelos integrados en la base de datos de (Bonvalot et al., 2012) y (Bankey et al., 2002) respectivamente. G – Cuenca Guaymas; C – Cuenca Carmen; F – Cuenca Farallón; P – Cuenca Pescadero; A – Cuenca Alarón; BGC – Cuenca de la boca del Golfo de California; DMM – Dorsal de María Magdalena; DPO – Dorsal del Pacífico Oriental; IM – Islas María

cortical (Lizarralde et al., 2007), aunque aún no se sabe con exactitud cuando se empezó a desarrollar los ~258 km de suelo oceánico estimados. En las cuencas centrales de la porción sur del golfo no se han reportado edades, pero con la sísmica (e.g. Hernández, 2010; Piñero, 2008) se ha detectado la extensión de corteza de afinidad oceánica de ~100 km en Carne; ~175 km en Farallón y ~44 km en pescadero; siendo esta última la menor de las extensiones oceánicas en el Golfo (Lonsdale, 1989).

Estas cuencas al interior del golfo no presentan el patrón típico de anomalía magnética (**FIGURA 14, B**), ni una diferencia clara en los valores de anomalía de Bouguer -los valores se encuentran entre los 250 -300 mGal- (**FIGURA 14, A**). Las muestras submarinas al interior de estas cuencas de composición predominantemente máfica -basáltica- (**FIGURA 7**) y los perfiles sísmicos que han identificado corteza un poco más densa y delgada (e.g. Hernández, 2010; Piñero Lajas, 2007; Lizarralde et al., 2007; Sutherland et al., 2012), o fuentes hidrotermales típicas de dorsales de extensión (Paduan et al., 2018 en la Cuenca Pescadero) son las pocas evidencias que se tienen para diferenciar estas cuencas como zonas de extensión de afinidad oceánica. La falta de distinción en sus propiedades geofísicas de anomalía magnética y gravitacional podría estar indicando que las cortezas al interior del golfo aún no se han desarrollado completamente como corteza oceánica "típica", por lo que varios autores la definen como de tipo oceánica transicional (e.g. Ferrari et al., 2018) (**FIGURA 13**); aunque Lizarralde et al. (2007) proponen que estas cuencas poseen corteza oceánica, en las que sus propiedades han sido oscurecidas por la alta disposición de sedimentos y la historia magmática de la región.

Analizando las cuencas de la porción sur del Golfo de California a escala general, se puede inferir que existe una asimetría y diferenciación clara en el comportamiento de la extensión a lo largo de la región (Lizarralde et al., 2007) (**FIGURA 13**). Tanto la Cuenca Guaymas como las cuencas de la boca del Golfo parecen tener una extensión de suelo oceánico parecidas -258 km y 250 km (180 + 75 km) respectivamente-. Si se establece que el estiramiento transtensional del golfo se restringe al área de la PTG definida por Ferrari, 2018 (**FIGURA 13**), estas dos regiones del golfo se habrían comportado parecido a un rift de tipo estrecho, en donde la ruptura y el estiramiento de la corteza continental se concentra una zona concreta -< 200 km- (Corti et al., 2003) (**FIGURA 13, perfil A**).

En contraste, las cuencas centrales del golfo, principalmente Pescadero, parecen estar empezando a formar corteza oceánica recientemente (Lizarralde et al, 2007; Lonsdale, 1989). Este acontecimiento deja ver que el proceso de rift en esta zona sería parecido al tipo amplio (Corti et al., 2003) (**FIGURA 13, perfil B**), donde la corteza acomodó la deformación estirándose a lo largo de la PEG, formando diferentes altos y bajos (Banco de Tamayo, Cañón de Tamayo) antes que romper y formar corteza oceánica.

Esta variación en el estilo del rifting en la porción sur del Golfo de California fue caracterizada primeramente por Lizarralde et al. (2007). Estos autores distingue en la parte central del golfo poca actividad magmática en comparación con la cuenca Guaymas y la boca del golfo. A partir de lo anterior concluyó que dicha diferenciación se puede deber a la fertilidad e hidratación del manto, el cual es más fértil en zonas con disposición

de sedimentos -al norte, en la Cuenca Guaymas-, puesto que promueven la extracción de fundido del manto, y en la zona cercanas la DPO; y se ve empobrecido en la región central posiblemente por el magmatismo localizado del mioceno (SMO y Grupo Comondú) (**FIGURA 9**); dando lugar a diferentes comportamientos de la corteza frente al estiramiento.

Con respecto a la delimitación de la corteza continental submarina, esta solo se dividió en dos grupos principales: corteza estriada y corteza desplazada (**FIGURA 9**). Se denominó corteza estriada a aquella donde la deformación está determinada directamente por el adelgazamiento que se da en el proceso de extensión; se encuentra localizada dentro de la PTG, en la porción sur del Golfo de California (**FIGURA 9**). La corteza desplazada es aquella donde solo hay desplazamiento de bloques con poca modificación de masa o adelgazamiento, y se localiza mayoritariamente al occidente de la península de Baja California (**FIGURA 9**). En dicha zona no hay mucho estiramiento o adelgazamiento por extensión, pero la “fricción” entre la placa Pacífico y la Microplaca Baja California genera una zona de cizalla que deforma la corteza -desplazamiento-, la cual es evidenciada por un sistema de fallas transformantes (Tosco-Abreojos, San Lorenzo-Santa Margarita) y cuencas pull-apart a lo largo de la antigua zona de subducción (**FIGURA 9**), que también pueden ser visibles con la anomalía gravitacional con corrección de aire libre (**FIGURA 6, G y H**), y de la cual se han reportado actividad tectónica cuaternaria (Plattner et al., 2007; Dixon et al. 2000; Hauksson et al., 2014; Fletcher & Munguia 2000; Brothers et al., 2012; Michaud et al. 2004; Yeats & Haq, 1978; Lonsdale, 1989; Fletcher et al., 2007).

5.2. Recomendaciones

A pesar de que la integración de los datos geológicos disponibles la porción sur del Golfo de California permitiera desarrollar un referente de la cartografía geológica submarina generalizada, como se explicó en la **sección 3.1**, no se desarrolló una recopilación exhaustiva de la bibliografía disponible, por lo que aún hay varios datos que podían ser integrados y que ayudarán a perfeccionar los planteamientos discutidos en el presente trabajo (e.g. Umhoefer 2018; Bennett et al., 2017; Mark et al., 2017; van Wijk et al. 2017; proyecto PESCADERO, 2002; Base de datos GEOROC - <http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>; Base de datos MARGINS - <http://www.nsf-margins.org/RCL/GoC/GOC.html>). Adicionalmente, está claro que se pueden llevar a cabo análisis más rigurosos con la base de datos, puesto que en este trabajo solo interpretaron los datos para dar una introducción a la geología submarina de la porción sur del Golfo de California, y no se contaba con un manejo geológico multidisciplinario.

Con los modelos de elevación digital se puede hacer una caracterización geomorfológica del fondo marino, y de esa manera se podrían identificar con mayor detalle las fallas submarinas y su cinemática, para generar un análisis estructural más completo. La caracterización de las cortezas a partir de los datos geofísicos no fue muy detallada, y se realizó con modelos globales simples; sin embargo, en el Golfo de California también se registran datos geofísicos puros (directos de los sensores) que pueden ser tratados y manejados para obtener modelos con mayor resolución, y así profundizar en estas propiedades. Además, la información geofísica referente a sísmica

debe de ser agregado a la base de datos, puesto que es necesaria para determinar los espesores y la composición en profundidad de las cortezas. Para caracterizar el proceso de rifting submarino, no solo se debe determinar las propiedades físicas y los tipos de cortezas involucradas en el proceso, también se requiere estudiar la evolución desde el punto de vista geoquímico, por lo que se propone integrar toda esta información referente en la base de datos. La relación entre la geología continental y la submarina es sumamente importante para poder entender la historia tectónica de la zona e interpolar información geológica continental en el fondo marino, del cual aún falta mucho territorio por ser estudiado. Por lo anterior, como siguiente paso también se recomienda actualizar la base de datos para que se empiece a recopilar la información geológica de este margen. Es importante que esta vez la recopilación sea más robusta, y que además se continúe alimentando y perfeccionando la base de datos desarrollada en el presente trabajo, puesto que, entre más datos disponibles, mejores es la caracterización realizada. Otro punto para tener en cuenta es la delimitación de las provincias y eventos geológicos registrados en ambas márgenes del golfo. Estos aún se encuentran en discusión, y la cartografía no es muy precisa; hay que hacer recopilaciones y estudios individuales más profundos para cada una de estas.

Asimismo, existen zonas de interés en el Golfo que se determinaron a partir de la síntesis de la información en la base de datos presentada. A continuación se proponen algunos puntos que se pueden desarrollar en futuras investigación en la porción sur del golfo de California: Análisis y caracterización de las anomalías magnéticas contrastantes en la península de Baja California (**FIGURA 6, C y D**); Cartografía de la zona de

Tamayo y los alrededores de las islas Mariás; Correlación de la geología continental y submarina y las islas del Golfo de California; Cartografía y análisis estructural al occidente de la península de baja california (la zona de cizalla) (**FIGURA 9**).

Un aspecto para mejorar de la base de datos de la porción sur del Golfo de California construida en el presente trabajo son las relaciones planteadas entre las entidades. Pese a que solo se hayan realizado dos relaciones que optimizan la gestión de la base de datos, poder crear nuevas conexiones, como sería el caso de eventos tectónicos, con las evidencias geológicas contemporáneas, y teniendo en cuenta los autores, le darían un mayor poder de análisis a la base de datos. De igual manera, esta base de datos se diseñó para facilitar el desarrollo de futuras investigaciones, por lo que es importante brindar acceso y servicio a la comunidad, y seguir ampliando el alcance de esta, integrando de igual manera la porción norte.

5.3. Conclusiones

En este trabajo se presenta la primera unificación de los datos geocientíficos del fondo marino de la porción sur del Golfo de California disponibles en la bibliografía, en una base de datos de tipo relacional. Con dicha base de datos se diseñó la cartografía y caracterización geológica submarina generalizada, que además muestra la posición del límites tectónicos, dos aspectos que hacían falta en la literatura. La ventaja principal de tener la información organizada en este sistema de gestión digital de datos es la capacidad de análisis que le brinda a los usuarios al interactuar con los diferentes datos entre sí por medio de la relación, superposición y comparación de los mismo, tal y como se pudo

observar en la caracterización de las cortezas (**sección 5.1.1**). De igual manera, comprender la disposición de los datos también permite observar las debilidades y falencias informativas del área de estudio, permitiendo gestionar la planeación de futuras investigaciones (ver **sección 5.2**). También es importante resaltar que a partir del análisis y manipulación de los datos disponible es posible adquirir nueva información que no ha sido registrada por los sensores o en la literatura. A pesar de que estos nuevos datos sean dependientes de la información disponible, pueden ser modificados y perfeccionados con facilidad a medida que se mejoren las capacidades de la base de datos, como sería el caso de las fallas submarinas o la delimitación tectónica de la porción sur del Golfo de California, los cuales fueron creados a partir la base de datos desarrollada (**sección 5.1.3 y 5.1.1**) (**FIGURA 12**).

Normalmente diseñar un sistema que permita gestionar la información suele requerir de softwares especializados con licencias costosas. Esta es una limitante para muchos proyectos de pequeño o mediano impacto, los cuales no siempre tienen acceso a buen financiamiento. En este trabajo se llevó a cabo la gestión eficiente de la información geológica de la porción sur del Golfo de California y su sinterización en un modelo cartográfico simple utilizando solamente softwares de código libres. Esto deja claro que se puede gestionar grandes volúmenes de datos sin ninguna limitante económica, y únicamente con la disposición de los científicos. Además, al momento de tomar decisiones sobre el desarrollo de proyectos e investigaciones en áreas donde inclusive es difícil obtener datos de campo, como sería el fondo marino, esta metodología de

recopilación bibliográfica de datos virtuales que se ha venido implementando con el avance tecnológico, se vuelve poderosa e indispensable.

Hoy en día, a pesar de que las bases de datos geocientíficas están creciendo e incorporando datos variados de diversas partes del mundo, aún se sigue almacenando mucha información de manera ineficiente, ya sea solo en formato texto e imágenes, sin anexar la información cartográfica o espacial en repositorios o bases de datos; o simplemente la falta de estándares globales para la gestión universal de esta, que genera incompatibilidad entre diversas plataformas. El desarrollo de bases de datos digitales que incorporen la información de determinadas regiones es una forma de empezar a administrar la información geológica, y preparar el campo para futuras metodologías que podrían ser implementadas en las geociencias, como el análisis de Big Data, Machine Learning o Data Mining. Por lo anterior, es muy importante recalcar a la comunidad que no solo se deben realizar publicaciones mostrando los análisis de los datos encontrados, sino integrar toda la información adquirida o manipulada en bases de datos, o en su defecto repositorios.

Referencias

- Alles, D. L. (2007). The Sea of Cortez. Retrieved from <http://fire.biol.wvu.edu/trent/alles/>
- Alles, D. L. (2011). Geology of the Salton Trough. Retrieved from <http://fire.biol.wvu.edu/trent/alles/>
- Alsleben, H., Wetmore, P. H., & Paterson, S. R. (2014). Structural evidence for mid-Cretaceous suturing of the Alisitos arc to North America from the Sierra Calamajue, Baja California, Mexico. *Memoir of the Geological Society of America*, 211(3), 691–711. [https://doi.org/10.1130/2014.1211\(22\)](https://doi.org/10.1130/2014.1211(22))
- Aragón-Arreola, M., & Martin-Barajas, A. (2007). Westward migration of extension in the northern Gulf of California, Mexico. *Geology*, 35(6), 571–574. <https://doi.org/10.1130/G23360A.1>
- Atwater, T., & Stock, J. (1998). Pacific-north america plate tectonics of the neogene southwestern united states: An update. *International Geology Review*, 40(5), 375–402. <https://doi.org/10.1080/00206819809465216>
- Balestrieri, M. L., Ferrari, L., Bonini, M., Duque-Trujillo, J., Cerca, M., Moratti, G., & Corti, G. (2017). Onshore and offshore apatite fission-track dating from the southern Gulf of California: Insights into the time-space evolution of the rifting. *Tectonophysics*, 719–720, 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.05.012>
- Bankey, V., Cuevas, A., Daniels, D., Finn, C. A., Hernandez, I., Hill, P., ... Ravat, D. (2002). Digital data grids for the magnetic anomaly map of North America. In *U.S. Geological Survey Open-File Report*. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/of/2002/ofr-02-414/>
- Bennett, S. E. K., Darin, M. H., Dorsey, R. J., Skinner, L. A., Umhoefer, P. J., & Michael, E. (2016). *Animated tectonic reconstruction of the Lower Colorado River region : implications for Late Miocene to Present deformation*. 73–86.
- Bennett, S. E. K., & Oskin, M. E. (2014). Oblique rifting ruptures continents: Example from the Gulf of California shear zone. *Geology*, 42(3), 215–218. <https://doi.org/10.1130/G34904.1>
- Bennett, S. E. K., Oskin, M. E., Iriondo, A., & Kunk, M. J. (2016). Slip history of the La Cruz fault: Development of a late Miocene transform in response to increased rift obliquity in the northern Gulf of California. *Tectonophysics*, 693, 409–435. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.06.013>

- Bird, P. (2003). An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(3), 1–52. <https://doi.org/10.1029/2001GC000252>
- Bonham-Carter, G. F. (1994). *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. Oxfordshire, U.K.: Elsevier Science Ltd.
- Bonvalot, S., Balmino, G., Bariais, A., Kuhn, M., Peyrefitte, A., Vales, N., ... Sarrailh, M. (2012). World gravity map. *Commission for the Geological Map of the World*.
- Brothers, D., Harding, A., Gonzalez-Fernandez, A., Holbrook, W. S., Kent, G., Driscoll, N., ... Axen, G. (2012). Farallon slab detachment and deformation of the Magdalena Shelf, southern Baja California. *Geophysical Research Letters*, 39(9), 1–7. <https://doi.org/10.1029/2011GL050828>
- Bryan, S. E., Orozco-Esquivel, T., Ferrari, L., & López-Martínez, M. (2014). Pulling apart the mid to late cenozoic magmatic record of the gulf of california: Is there a comondú arc? *Geological Society Special Publication*, 385(1), 389–407. <https://doi.org/10.1144/SP385.8>
- Busby, C. (2004). Continental growth at convergent margins facing large ocean basins: A case study from Mesozoic convergent-margin basins of Baja California, Mexico. *Tectonophysics*, 392(1–4), 241–277. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.04.017>
- Calmus, Thierry, Pallares, C., Maury, R. C., Aguillón-Robles, A., Bellon, H., Benoit, M., & Michaud, F. (2011). Volcanic markers of the post-subduction evolution of Baja California and Sonora, Mexico: Slab tearing versus lithospheric rupture of the gulf of California. *Pure and Applied Geophysics*, 168(8–9), 1303–1330. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0204-z>
- Calmus, Thierry, Poupeau, G., Bourgois, J., Michaud, F., Mercier De Lépinay, B., Labrin, E., & Azdimousa, A. (1999). Late Mesozoic and Cenozoic thermotectonic history of the Mexican Pacific margin (18 to 25°N): New insight from apatite and zircon fission-track analysis of coastal and offshore plutonic rocks. *Tectonophysics*, 306(2), 163–182. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00049-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00049-9)
- Condie, K. C. (2016). *Earth as an Evolving Planetary System*. Elsevier Ltd.
- Corti, G., Bonini, M., Conticelli, S., Innocenti, F., Manetti, P., & Sokoutis, D. (2003). Analogue modelling of continental extension: A review focused on the relations between the patterns of deformation and the presence of magma. *Earth-Science Reviews*, 63(3–4), 169–247. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(03\)00035-7](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(03)00035-7)
- Curry, J. R., & Moore, D. G. (1979). Initial reports of the deep sea drilling project - LEG

64. In *Deep Sea Drilling Project*. Retrieved from http://www.deepseadrilling.org/64/dsdp_toc.htm%0A

- Dañobeitia, J., Bartolomé, R., Prada, M., Nuñez-Cornú, F., Córdoba, D., Bandy, W. L., ... Ortiz, M. (2016). Crustal Architecture at the Collision Zone Between Rivera and North American Plates at the Jalisco Block: Tsujal Project. *Pure and Applied Geophysics*, 173(10–11), 3553–3573. <https://doi.org/10.1007/s00024-016-1388-7>
- DeMets, C. (1995). A reappraisal of seafloor spreading lineations in the Gulf of California: Implications for the transfer of Baja California to the Pacific Plate and estimates of Pacific-North America Motion. *Geophysical Research Letters*, 22(24), 3545–3548. <https://doi.org/10.1029/95GL03323>
- Dixon, T., Farina, F., DeMets, C., Suarez-Vidal, F., Fletcher, J., Marquez-Azua, B., ... Umhoefer, P. (2000). New kinematic models for Pacific-North America motion from 3 MA to present, II: Evidence for a “Baja California shear zone.” *Geophysical Research Letters*, 27(23), 3961–3964. <https://doi.org/10.1029/2000GL008529>
- Drake, W. R. (2005). *Structural analysis, stratigraphy, and geochronology of the San José island accommodation zone, Baja California Sur, Mexico*. Northern Arizona University.
- Duque-Trujillo, J., Ferrari, L., Norini, G., & López-Martínez, M. (2014). Miocene faulting in the southwestern Sierra Madre Occidental, Nayarit, Mexico: Kinematics and segmentation during the initial rifting of the southern Gulf of California. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 31(3), 283–302.
- Duque-Trujillo, J., Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., López-Martínez, M., Lonsdale, P., Bryan, S. E., ... Solari, L. (2015). Timing of rifting in the southern Gulf of California and its conjugate margins: Insights from the plutonic record. *Bulletin of the Geological Society of America*, 127(5/6), 702–736. <https://doi.org/10.1130/B31008.1>
- Fernández, A., & Pérez-Campos, X. (2017). Lithosphere thickness in the Gulf of California region. *Tectonophysics*, 719–720, 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.06.016>
- Ferrari, L., Castillo-Reynoso, J. C., Orozco-Esquivel, T., & Silva-Fragoso, A. (2018). Digital geologic map and geochronologic, geochemical and geothermal database of the south-eastern part of the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Terra Digitalis*, 2(2), 1–6. <https://doi.org/10.22201/igg.25940694.2018.2.53>
- 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>

Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S. E., López-Martínez, M., & Silva-Fragoso, A. (2018). Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province and the Comondú Group with the Gulf of California rift. *Earth-Science Reviews*, 183, 115–152.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.006>

Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., & Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522–523, 122–149. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.09.018>

Ferrari, L., Orozco Esquivel, T., Navarro, M., López-Quiroz, P., & Luna, L. (2018). Digital Geologic Cartography and Geochronologic Database of the Trans-Mexican Volcanic Belt and Adjoining Areas. *Terra Digitalis*, 2(1), 1–8.
<https://doi.org/10.22201/igg.terradigitalis.2018.1.34>

Ferrari, L., Pasquarè, G., Venegas-Salgado, S., & Romero-Rios, F. (2000). Geology of the western Mexican Volcanic Belt and adjacent Sierra Madre Occidental and Jalisco block. *Special Paper of the Geological Society of America*, 334(March), 65–83. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2334-5.65>

Ferrari, L., Petrone, C. M., & Francalanci, L. (2001). Generation of oceanic-island basalt-type volcanism in the western Trans-Mexican volcanic belt by slab rollback, asthenosphere infiltration, and variable flux melting. *Geology*, 29(6), 507–510.
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0507:GOOIBT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0507:GOOIBT>2.0.CO;2)

Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., & Bryan, S. (2005). Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 343–378.
<https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a5>

Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., & Bryan, S. (2007). Magmatism and tectonics of the Sierra Madre Occidental and relation with the evolution of the western margin of North Ame. *Special Paper of the Geological Society of America*, 422(01), 1–39.
[https://doi.org/10.1130/2007.2422\(01\)](https://doi.org/10.1130/2007.2422(01))

Fletcher, J. M., Grove, M., Kimbrough, D., Lovera, O., & Gehrels, G. E. (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 areas. *Bulletin of the Geological Society of America*, 119(11–12), 1313–1336. <https://doi.org/10.1130/B26067.1>

- Fletcher, J. M., & Munguia, L. (2000). Active continental rifting in southern Baja California, Mexico: Implications for plate motion partitioning and the transition to seafloor spreading in the Gulf of California. *Tectonics*, 19(6), 1107–1123.
- Fossen, H. (2010). *Structural Geology*. New York: Cambridge University Press.
- García-Abdeslem, J. (2014). On the significance of magnetic anomalies from the Baja California Peninsula: Its relationship with IOCG deposits and the deep crustal magnetic layer. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 31(2), 270–279. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/285024979_On_the_significance_of_magnetic_anomalies_from_the_Baja_California_Peninsula_Its_relationship_with_IOCG_deposits_and_the_deep_crustal_magnetic_layer
- Gastil, G., Diamond, J., Knaack, C., Walawender, M., Marshall, M., Boyles, C., ... Erskine, B. (1990). The problem of the magnetite/ilmenite boundary in southern and Baja California California. In *The Nature and Origin of Cordilleran Magnetism*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1130/MEM174>
- Gastil, R. G. (1975). Plutonic zones in the Peninsular Range of southern California and northern Baja California. *Geology*, 3(7), 361–363. [https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1975\)3<361:PZITPR>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0091-7613(1975)3<361:PZITPR>2.0.CO;2)
- Gupta, R. P. (2018). Remote sensing geology. In *The Photogrammetric Record* (Third Edit). Retrieved from http://doi.wiley.com/10.1046/j.0031-868X.2003.024_04.x%0Ahttp://link.springer.com/10.1007/978-3-662-55876-8
- Hauksson, E., Kanamori, H., Stock, J., Cormier, M. H., & Legg, M. (2014). Active Pacific North America plate boundary tectonics as evidenced by seismicity in the oceanic lithosphere offshore Baja California, Mexico. *Geophysical Journal International*, 196(3), 1619–1630. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt467>
- Henry, C. D., & Aranda-Gomez, J. J. (1992). The real southern Basin and Range: Mid- to late Cenozoic extension in Mexico. *Geology*, 20(8), 701–704. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0701:TRSBAR>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0701:TRSBAR>2.3.CO;2)
- Henry, Christopher D, McDowell, F. W., & Silver, L. T. (2003). Geology and geochronology of granitic batholithic complex, Sinaloa, México: Implications for Cordilleran magmatism and tectonics. In *Tectonic evolution of northwestern Mexico and the Southwestern USA* (Vol. 374, pp. 237–273). <https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0-8137-2374-4.237>
- Hernández, K. (2010). *Estructura y basamento sísmico del este de la cuenca de farallón*,

golfo de california. CICESE.

- Housh, T. B., Aranda-Gómez, J. J., & Luhr, J. F. (2010). Isla Isabel (Nayarit, México): Quaternary alkalic basalts with mantle xenoliths erupted in the mouth of the Gulf of California. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 197(1–4), 85–107. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.06.011>
- Kluesner, J. (2011). *Marine Geophysical Study of Cyclic Sedimentation and Shallow Sill Intrusion in the Floor of the Central Gulf of California*. University of California.
- Kluesner, J., Lonsdale, P., & González-Fernández, A. (2014). Late Pleistocene cyclicality of sedimentation and spreading-center structure in the Central Gulf of California. *Marine Geology*, 347(January), 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.11.001>
- Larson, R. L. (1972). Bathymetry, Magnetic Anomalies, and Plate Tectonic History of the Mouth of the Gulf of California. *Geological Society of America Bulletin*, 83, 3345–3360.
- Ledesma-vázquez, J., Jhonson, M. E., Gonzalez-Yajimovich, O., & Santamaría-del-Angel, E. (2008). Gulf of California Geography, Geological Origins, Oceanography, and Sedimentation Patterns. In J. L.-V. Markes E. Johnson (Ed.), *Atlas of Coastal Ecosystems in the Gulf of California: Past and Present* (pp. 1–10). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/255992790_Gulf_of_California_Geography_Geological_Origins_Oceanography_and_Sedimentation_Patterns
- Lewis, B. T. R., & Robinson, P. T. (1979). Initial reports of the deep sea drilling project - LEG 65. In *Deep Sea Drilling Project*. Retrieved from http://www.deepseadrilling.org/65/dsdp_toc.htm%0A
- Lizarralde, D., Axen, G. J., Brown, H. E., Fletcher, J. M., González-Fernández, A., Harding, A. J., ... Umhoefer, P. J. (2007). Variation in styles of rifting in the Gulf of California. *Nature*, 448(7152), 466–469. <https://doi.org/10.1038/nature06035>
- Longley, P. a, Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2005). Geographical Information Systems and Science. 2nd Edition. In *John Wiley & Sons, Ltd* (Vol. 83). <https://doi.org/10.2307/215736>
- Lonsdale, P. (1989). Geology and tectonic history of the Gulf of California. In R. W. D. E. L. Winterer, Donald M. Hussong (Ed.), *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii* (pp. 499–521). <https://doi.org/https://doi.org/10.1130/DNAG-GNA-N.499>
- Lonsdale, Peter. (1991). Structural patterns of the Pacific floor offshore of peninsular California. In *The Gulf and Peninsular Province of the Californias* (pp. 87–125).

<https://doi.org/https://doi.org/10.1306/M47542>

- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of geophysics* (Second Edi). New York, U.S.: Cambridge University press.
- Luhr, J. F., Henry, C. D., Housh, T. B., Aranda-Gómez, J. J., & McIntosh, W. C. (2001). Early extension and associated mafic alkalic volcanism from the Southern Basin and Range Province: Geology and petrology of the Rodeo and Nazas volcanic fields, Durango, México. *Bulletin of the Geological Society of America*, *113*(6), 760–773. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2001\)113<0760:EEAAMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2001)113<0760:EEAAMA>2.0.CO;2)
- Mark, C., Chew, D., & Gupta, S. (2017). Does slab-window opening cause uplift of the overriding plate? A case study from the Gulf of California. *Tectonophysics*, *719–720*, 162–175. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.02.008>
- Maus, S., Barckhausen, U., Berkenbosch, H., Bournas, N., Brozena, J., Childers, V., ... Tontini, F. C. (2009). EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, *10*(8), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2009GC002471>
- McDowell, F. W., & Keizer, R. P. (1977). Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango City and Mazatlan, Mexico. *Bulletin of the Geological Society of America*, *88*(10), 1479–1487. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1977\)88<1479:TOMVIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1977)88<1479:TOMVIT>2.0.CO;2)
- McDowell, F. W., & McIntosh, W. C. (2012). Timing of intense magmatic episodes in the northern and central Sierra Madre Occidental, western Mexico. *Geosphere*, *8*(6), 1505–1526. <https://doi.org/10.1130/GES00792.1>
- Meissner, R. (1986). The continental crust: a geophysical approach. In *The dynamic earth*, (Freeman).
- Meyer, B., Chulliat, A., & Saltus, R. (2017). Derivation and Error Analysis of the Earth Magnetic Anomaly Grid at 2 Arc-Minute Resolution Version 3 (EMAG2v3). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, *3*. <https://doi.org/10.1002/2016GC006311>
- Michaud, F., Sosson, M., Royer, J. Y., Chabert, A., Bourgois, J., Calmus, T., Sichler, B. (2004). Motion partitioning between the Pacific plate, Baja California and the North America plate: The Tosco-Abreojos fault revisited. *Geophysical Research Letters*, *31*(8), 3–6. <https://doi.org/10.1029/2004GL019665>
- Miller, N. C., & Lizarralde, D. (2013). Thick evaporites and early rifting in the Guaymas Basin, Gulf of California. *Geology*, *41*(2), 283–286.

<https://doi.org/10.1130/G33747.1>

- Moore, D. G. (1973). Plate-Edge deformation and crustal growth, Gulf of California structural province. *Bulletin of the Geological Society of America*, 84(6), 1883–1906. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1973\)84<1883:PDACGG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1973)84<1883:PDACGG>2.0.CO;2)
- Oskin, M., & Stock, J. (2003a). Marine incursion synchronous with plate-boundary localization in the Gulf of California. *Geology*, 31(1), 23–26. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0023:MISWPB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0023:MISWPB>2.0.CO;2)
- Oskin, M., & Stock, J. (2003b). Pacific-North America plate motion and opening of the Upper Delfin basin, northern Gulf of California, Mexico. *Bulletin of the Geological Society of America*, 115(10), 1173–1190. <https://doi.org/10.1130/B25154.1>
- Paduan, J. B., Zierenberg, R. A., Clague, D. A., Spelz, R. M., Caress, D. W., Troni, G., ... Wheat, C. G. (2018). Discovery of Hydrothermal Vent Fields on Alarcón Rise and in Southern Pescadero Basin, Gulf of California. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(12), 1–32. <https://doi.org/10.1029/2018GC007771>
- Páramo, P., Holbrook, W. S., Brown, H. E., Lizarralde, D., Fletcher, J., Umhoefer, P., ... Axen, G. (2008). Seismic structure of the southern Gulf of California from Los Cabos block to the East Pacific Rise. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(3), 1–19. <https://doi.org/10.1029/2007JB005113>
- Persaud, P., Tan, E., Contreras, J., & Lavier, L. (2017). A bottom-driven mechanism for distributed faulting in the Gulf of California rift. *Tectonophysics*, 719–720, 51–65. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.11.024>
- Piñero Lajas, D. (2008). *Sísmica de reflexión y fechamiento $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ del basamento continental en el margen oeste de la Cuenca Farallón (sur del Golfo de California, México)*. CICESE.
- 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. *Geophysical Journal International*, 170(3), 1373–1380. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03494.x>
- Pompa-mera, V., Schaaf, P., Hernández-treviño, T., Weber, B., Solís-pichardo, G., Villanueva-lascurain, D., & Layer, P. (2013). Geology, geochronology, and geochemistry of Isla María Madre, Nayarit, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 30(1), 1–23.
- Roberts, D. G., & Bally, A. W. (2012). *Regional Geology and Tectonics: Principles of*

Geologic Analysis (Vol. 1A). Elsevier B.V.

- Ryan, W. B. F., Carbotte, S. M., Coplan, J. O., O'Hara, S., Melkonian, A., Arko, R., ... Zemsky, R. (2009). Global multi-resolution topography synthesis. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, *10*(3). <https://doi.org/10.1029/2008GC002332>
- Sandwell, D. T., Müller, R. D., Smith, W. H. F., Garcia, E., & Francis, R. (2014). New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science*, *346*(6205), 65–67. <https://doi.org/10.1126/science.1258213>
- Schaaf, P., Böhnel, H., & Pérez-Venzor, J. A. (2000). Pre-Miocene palaeogeography of the Los Cabos Block, Baja California Sur: Geochronological and palaeomagnetic constraints. *Tectonophysics*, *318*(1–4), 53–69. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00306-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00306-6)
- Silberschatz, A., Korth, H. F., & Sudarshan, S. (2019). Database System Concepts (7th edition). In *McGraw Hill*. <https://doi.org/10.1145/253671.253760>
- Stock, J. M., & Hodges, V. K. (1989). Pre-Pliocene extension around the Gulf of California to the Pacific plate. *Tectonics*, *8*(1), 99–115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/TC008i001p00099>
- Sutherland, F. H., Kent, G. M., Harding, A. J., Umhoefer, P. J., Driscoll, N. W., Lizarralde, D., ... Lonsdale, P. (2012). Middle Miocene to early Pliocene oblique extension in the southern Gulf of California. *Geosphere*, *8*(4), 752–770. <https://doi.org/10.1130/GES00770.1>
- Tozer, B., Sandwell, D. T., Smith, W. H. F., Olson, C., Beale, J. R., & Wessel, P. (2019). Global bathymetry and topography at 15 arc seconds: SRTM15+. *Earth and Space Science*. <https://doi.org/10.1029/2019ea000658>
- Umhoefer, P. J. (2011). Why did the Southern Gulf of California rupture so rapidly?—Oblique divergence across hot, weak lithosphere along a tectonically active margin. *GSA Today*, *21*(11), 4–10. <https://doi.org/10.1130/G133A.1>
- Umhoefer, P. J., Darin, M. H., Bennett, S. E. K., Skinner, L. A., Dorsey, R. J., & Oskin, M. E. (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), 695–698. <https://doi.org/10.1130/G40242.1>
- Umhoefer, P. J., & Dorsey, R. J. (1997). Translation of terranes: Lessons from central Baja California, Mexico. *Geology*, *25*(11), 1007–1010. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1997\)025<1007:TOTLFC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<1007:TOTLFC>2.3.CO;2)

- Umhoefer, P. J., Dorsey, R. J., Willsey, S., Mayer, L., & Renne, P. (2001). Stratigraphy and geochronology of the Comondú Group near Loreto, Baja California sur, Mexico Paul. *Sedimentary Geology*, *144*, 125–147.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00138-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00138-5)
- Valencia-moreno, M., & Ortega-Rivera, A. (2011). Cretácico Tardío–Eoceno medio en el Noroeste de México evolución del Arco Magmático continental y su contexto geodinámico (orogenia Laramide). In T. Calmus (Ed.), *Panorama de la Geología de Sonora, México* (Boletín 11, pp. 2–25). México: Universidad Nacional Autónoma de México,.
- Valencia-Moreno, M., Ruiz, J., Barton, M. D., Patchett, P. J., Zürher, L., Hodkinson, D. G., & Roldán-Quintana, J. (2001). A chemical and isotopic study of the Laramide granitic belt of northern Mexico: Identification of the southern edge of the North American Precambrian basement. *Bulletin of the Geological Society of America*, *113*(11), 1409–1422. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2001\)113<1409:ACAISO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2001)113<1409:ACAISO>2.0.CO;2)
- van Wijk, J. W., Heyman, S., Axen, G., & Persaud, P. (2019). Nature of the crust in the northern Gulf of California and Salton Trough. *Geosphere*, *15*, 1–19.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1130>
- Winter, J. D. (2010). *An introduction to igneous and metamorphic petrology*. New Jersey: Prentice-Hall Inc.
- Yeats, R. S., & Haq, B. U. (1978). Initial reports of the deep sea drilling project - LEG 63. In *Deep Sea Drilling Project*. Retrieved from http://www.deepseadrilling.org/63/dsdp_toc.htm%0A

Anexos

1. A. Base de datos de la porción sur del Golfo de California en formato digital
- B. Tabla con la bibliografía de la porcion sur del Golfo de California en formato [.xlsx]

Enlace de descarga:

https://www.dropbox.com/sh/630gtb82guzavej/AACEvpQhT5Q_dKzmYzkRxf9Qa?dl=0

Autor: *Daniel Enrique Monterrosa Puente*

Correo de contacto: dmonterr@eafit.edu.co