

El graben de Empalme, Sonora, México: magmatismo y tectónica extensional asociados a la ruptura inicial del Golfo de California

**Jaime Roldán-Quintana^{1,*}, Gabriela Mora-Klepeis², Thierry Calmus¹,
Martín Valencia-Moreno¹ y Rufino Lozano-Santacruz³**

¹Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Estación Regional del Noroeste, Apartado Postal 1039, 83000 Hermosillo, Sonora, México

²Geology Department, The University of Vermont, Burlington, VT 05405, EE. UU.

³Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 México D. F., México

* jaimer@servidor.unam.mx

RESUMEN

El graben de Empalme en la costa de Sonora se interpreta como una estructura formada durante la apertura del Golfo de California. Tiene una anchura promedio de 25 km y una longitud aproximada de 50 km, y está delimitado por dos fallas de rumbo general N-S, la primera localizada en la porción oriental de la Sierra de Santa Úrsula y la segunda en la porción oeste de la Sierra del Bacatete. Ambas sierras consisten de rocas volcánicas félsicas a intermedias de edad miocénica (11–23 Ma), que cubren discordantemente a rocas intrusivas del Cretácico tardío (63 Ma), y a su vez están cubiertas por coladas de basalto con una edad de 8.5 Ma. Diques y pequeños troncos de composición riolítica (14 Ma) con textura granofírica intrusionan a una parte de la sección volcánica en los bordes del graben. También se identificaron afloramientos aislados de granofiros dentro del graben, generalmente cubiertos por basaltos. Las rocas más jóvenes son basaltos calcalcalinos y algunos de composición toleítica, con edades entre 8.5 y 10.3 Ma. Las relaciones ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr y ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd sugieren una firma de basaltos toleíticos asociados a estructuras tipo rift. Estos basaltos se encuentran inclinados principalmente al oriente, y desplazados por efecto de fallas normales relacionadas al evento extensivo más reciente en el graben. Debido a la presencia de una extensa cubierta de sedimentos recientes a lo largo de la costa de Sonora, los límites de la Provincia Extensional del Golfo no son bien conocidos. Sin embargo, de acuerdo con nuestras observaciones, en este trabajo proponemos reducir las dimensiones de esta provincia extensional en la costa de Sonora, a una franja de aproximadamente 100 km de ancho, paralela a la costa. Esto se propone debido a que fuera de esta franja no existen evidencias de estructuras relacionadas a la apertura del Golfo de California.

Palabras clave: Sonora, graben, Empalme, Golfo de California, Provincia Extensional.

ABSTRACT

The Empalme graben on the Sonoran coast is interpreted as a structure associated with the opening of the Gulf of California. The graben is approximately 25 km wide and 50 km long, and is limited by two faults striking N-S; one located along the east flank of the Sierra de Santa Úrsula and the other one located along the west side of the Sierra del Bacatete. Both ranges consist of felsic to intermediate volcanic flows and tuffs of Miocene age (11–23 Ma), which unconformably overly late Cretaceous intrusive rocks (63 Ma), and are in turn overlain by 8.5 Ma-old basalts flows. Dikes and small stocks of rhyolitic composition (14 Ma) displaying a granophyric texture intrude the Miocene volcanic section along the edges of the graben. Isolated exposures of granophyre were also identified within the Empalme graben,

which are generally overlain by basaltic flows. The younger rocks correspond to calcalkaline and minor tholeiitic basalts, which range in age from 8.5 to 10.5 Ma. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ isotope ratios suggest rift-related tholeiitic basalt signatures. These basalts are mostly tilted to the east, and were displaced by the normal faults associated with the younger extensional event recorded in the graben. Because of the widespread cover of recent sediments along the Sonoran coast, the limits of the Extensional Province of the Gulf of California are not well known. However, on the basis of our observations, in this work we propose to reduce the size of this extensional province in the Sonoran coast, to an approximately 100 km-wide belt, parallel to the coast. This is proposed because out of this belt there are no evidences of structures related to the opening of the Gulf of California.

Key words: Sonora, Graben, Empalme, Gulf of California, Extensional Province.

INTRODUCCIÓN

La historia tectónica y magmática cenozoica del noroeste de México está estrechamente relacionada a los procesos de subducción de la placa oceánica Farallón y de las microplacas derivadas de la misma (Guadalupe y Magdalena), debajo de la placa de Norteamérica. El estudio del magmatismo cenozoico ha permitido reconocer la coexistencia de diferentes series volcánicas y proponer modelos de evolución tectónica, acordes con la cinemática de las placas y la tectónica extensional terciaria. Durante el Terciario ocurrieron dos fenómenos geológicos importantes: el primero es la construcción de la provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental (McDowell y Clabaugh, 1979), asociada a la subducción de la placa Farallón debajo de la Placa de Norteamérica durante el Oligoceno. El segundo fenómeno ocurrió durante el Mioceno, asociado a un cambio en la geometría de la subducción, cuando el volcanismo migró hacia el oeste formando un nuevo arco magmático a lo largo de la costa actual de Sonora y Baja California, entonces adyacente al continente. Esa migración del arco magmático es contemporánea con una fase de extensión cortical generalizada en la porción oeste y suroeste de la placa de Norteamérica, que generó la morfología típica de Sonora caracterizada por cuencas y sierras paralelas (McDowell *et al.*, 1997; Aranda-Gómez *et al.*, 2000). Estas cuencas fueron rellenadas por sedimentos clásticos de la Formación Báucarit y otras formaciones contemporáneas. Asociado también con este evento se produjo un volcanismo bimodal, con una componente calcalkalina relacionada a subducción, y una de tipo toleítico, relacionada con la extensión. Alrededor de los 12.5 Ma, el cese de la subducción de las microplacas Guadalupe y Magdalena provocó un cambio tectónico mayor, con el inicio de un movimiento lateral derecho a lo largo del sistema de fallas Tosco-Abrejos (Spencer y Normark, 1979; Lonsdale, 1991), así como movimientos de transtensión intracontinental (Gans, 1997). Con base en la interpretación que asocia el volcanismo del Mioceno Medio y Tardío con

una zona de *rifting*, Karig y Jensky (1972) sugirieron que la apertura del Golfo de California inició con la posible formación de un protogolfo. Sin embargo, las primeras incursiones marinas ocurrieron durante el Mioceno Tardío-Plioceno Temprano en diferentes localidades del golfo primitivo, desde las Islas Tres Marías en el sur, hasta el Valle Imperial en el norte (*e.g.*, Carreño, 1985; Martín-Barajas *et al.*, 1997; Helenes y Carreño, 1999; Holt *et al.*, 2000; Ochoa-Landín *et al.*, 2000; Martín-Barajas, 2000; Oskin y Stock, 2003).

La edad de los sedimentos marinos está establecida por el fechamiento radiométrico de tobas y derrames volcánicos intercalados. En la Sierra Santa Rosa, en Baja California (Figura 1), la extensión cortical parece haber iniciado a los 17 Ma (Dokka y Merriam, 1982), evento que podría corresponder a la fase protogolfo propuesta por Karig y Jensky (1972). Estudios detallados más recientes en la región de San Felipe y Puertecitos (Figura 1), proponen que la primera fase extensional inició a los 12–11 Ma (Stock y Hodges, 1990; Martín-Barajas *et al.*, 1995; Nagy, 2000). En la Sierra de San Pedro Mártir y Valle Chico (Figura 1), la extensión inició entre 10 y 6 Ma (Stock, 1989). En la costa oriental de Baja California Sur, en el área de Santa Rosalía (Figura 1), las rocas volcánicas más jóvenes basculadas han dado edades de 11 Ma (Sawlan y Smith, 1984), y de 7.5 a 8 Ma (Conly, 1999; Calmus *et al.*, 2003). Finalmente, en el área de Bahía Concepción y en la Sierra de La Giganta (Figura 1), las unidades volcánicas más jóvenes basculadas tienen edades entre 10 y 8 Ma (McFall, 1968; Sawlan y Smith, 1984).

Hasta ahora, la reconstrucción de la historia geológica de la apertura del Golfo de California se ha basado en datos de la costa oriental de la península (Figura 1), y sólo en fechas recientes se han generado datos de la costa de Sonora, los cuales seguramente ayudarán a entender mejor este fenómeno.

En la porción occidental de la Isla Tiburón (Figura 1), la extensión del Golfo de California inició entre 15 y 13 Ma (Neuhaus *et al.*, 1988). La toba riolítica de San Felipe,

con una edad de 12.6 Ma, ha sido correlacionada sobre una gran extensión (más de 250 km), desde la Isla Tiburón y la costa de Sonora hasta la región de Puertecitos en Baja California (Oskin *et al.*, 2001). En la costa de Sonora, en la región de Guaymas–Empalme (Figura 1), Gastil y Krummenacher (1977) cartografiaron la porción costera entre Punta Lobos y Bahía Kino (Figura 1), proporcionando las primeras fechas de las rocas volcánicas cenozoicas de esta región, la cuales indican un rango entre 22 y 10 Ma. El primer trabajo geológico sobre las rocas volcánicas de la Sierra Libre, en la costa de Sonora central, fue realizado por Cochemé (1981), quien describió la estratigrafía de las rocas volcánicas y reportó la presencia de granófiros en la porción oriental de la Sierra de Santa Úrsula (Figura 2). En la costa entre Empalme y San Carlos (Figura 1), Paz-Moreno (1993) describió la petrografía y composición química de rocas basálticas, y reportó edades isotópicas entre 12 y 8 Ma. Recientemente, Mora-Álvarez y McDowell (2000),

describieron la geología de la Sierra de Santa Úrsula y fecharon rocas volcánicas definiendo edades entre 23 y 8 Ma y consideran que la extensión en la Sierra Santa Úrsula inició a los 14 Ma. Roldán-Quintana (2002) documentó la presencia de una estructura extensiva entre las Sierras de Santa Úrsula y del Bacatete (Figura 2), en el Valle de Empalme, la cual se propone aquí como el graben de Empalme (Figura 2).

En el presente trabajo se aportan nuevas observaciones estructurales y datos petrológicos para documentar, por primera vez, la relación temporal entre las fallas del graben de Empalme y el inicio de la apertura del Golfo de California en la costa de Sonora. Debido a que los afloramientos dentro del graben son escasos, la interpretación de esta estructura se hizo tomando en consideración la geología de los bordes de la misma, así como los datos publicados sobre las relaciones estratigráficas entre las diferentes unidades litológicas, composición geoquímica, datos geofísicos y estudios de aguas termales.

En este trabajo reportamos nuevos datos isotópicos y geoquímicos para muestras de basaltos y granófiros, que documentan los inicios de la historia extensiva en la parte central de Sonora. Así mismo, con base en nuevos datos estructurales se propone definir los límites geográficos para la Provincia Extensional del Golfo de California en Sonora. Respecto a la edad del graben de Empalme, la información disponible únicamente permite establecer que es más joven que 8.5 Ma, que es la edad encontrada en basaltos afectados por el fallamiento normal (Roldán-Quintana, 2002).

MARCO GEOLOGICO REGIONAL

Los límites de la Provincia Extensional del Golfo (Stock y Hodges, 1989) son más difusos en Sonora que en la Península de Baja California, debido a la superposición de las estructuras relacionadas con la apertura del golfo sobre los bloques basculados asociados al evento de Cuencas y Sierras (CS) (Stewart y Roldán-Quintana, 1994). La deformación extensional cenozoica más antigua en Sonora está fechada entre el Oligoceno Tardío y el Mioceno Temprano, y está representada por la formación del cinturón de ‘Núcleos de Complejos Metamórficos’ expuestos en Mazatán (Vega-Granillo y Calmus, 2003; Wong y Gans, 2003) y Magdalena (Nourse, 1989) (Figura 1). Así mismo, en el sureste y el centro–este de Sonora, McDowell *et al.* (1997) identificaron una fase de deformación del Oligoceno–Mioceno, caracterizada por la formación de cuencas con orientación NW–SE.

La orientación de las estructuras extensionales del Cenozoico tardío en las regiones costeras del Golfo de California es generalmente NNW–SSE (Dokka y Merriam, 1982; Henry, 1989; Stock y Hodges, 1989). Las áreas en donde se localizan dichas estructuras, que sugieren una deformación extensional más joven que 12 Ma (Gans *et al.*, 2003), se restringen a una franja paralela a la costa actual

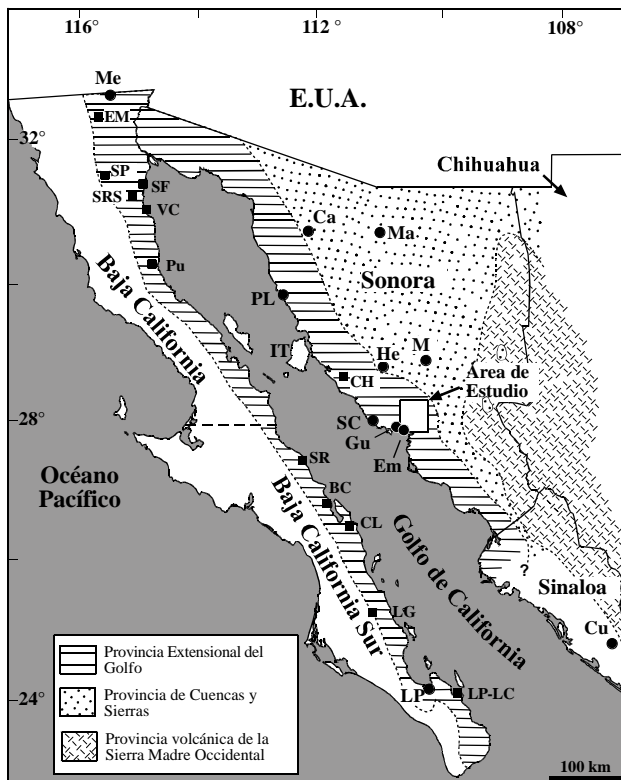


Figura 1. Mapa del noroeste de México mostrando la Provincia de Cuencas y Sierras en Sonora y la Provincia Extensional del Golfo (PEG) en las costas del Golfo de California (modificado de Stock y Hodges, 1989); también se muestra la localización general del área de estudio. (■) BC: Bahía Concepción; CH: Costa de Hermosillo; CL: Cuenca de Loreto; EM: El Mayor; IT: Isla Tiburón; LG: Sierra La Giganta; LP-LC: La Paz–Los Cabos; M: Mazatán; SF: San Felipe; SP: San Pedro Mártir; SR: Santa Rosalía; SRS: Santa Rosa; VC: Valle Chico; Pu: Puertecitos; (•) Ca: Caborca; Cu: Culiacán; Em: Empalme; Gu: Guaymas; SC: San Carlos; He: Hermosillo; LP: La Paz; Ma: Magdalena; Me: Mexicali; PL: Puerto de Lobos.

del Golfo de California de aproximadamente 100 km de ancho, lo cual corresponde a la verdadera extensión geográfica de la Provincia Extensional del Golfo de California en Sonora (Figura 1).

Estratigrafía de los Bloques Levantados

Las rocas más antiguas en la costa de Empalme–Guaymas, afloran a ~12 km al noreste de San Carlos (Figura 1), y consisten en hornfels calcosilicatados de posible edad mesozoica (Johnpeer, 1977). Este conjunto metamórfico se encuentra intrusionado por rocas del Batolito granítico de Sonora del Cretácico Tardío–Eoceno (Figura 3). Las rocas intrusivas laramídicas están ampliamente distribuidas a lo largo de toda la costa de Sonora y Sinaloa y han sido descritas por Damon *et al.* (1983) y Valencia-Moreno *et al.* (2001). Estas rocas consisten en granitos y granodioritas en afloramientos pequeños parcialmente cubiertos por rocas volcánicas o por rocas clásticas y aluviones terciarios.

Afloramientos de rocas graníticas laramídicas se observan al oeste y suroeste de San Carlos, donde forman pequeños remanentes de una superficie de erosión, mayormente cubierta por rocas volcánicas miocénicas (Wilson, 1978). En el área de estudio, estas rocas sólo afloran en la parte norte, al norte de las Sierras de Santa Úrsula y del Bacatete (Figura 4).

Las rocas mesozoicas están sobreyacidas de manera discordante por lavas de edad miocénica, principalmente félsicas, que han sido asignadas al Arco Circum-Golfo (Gastil y Krummenacher, 1977) con edades entre 24 y 11 Ma (Mora-Álvarez y McDowell, 2000). Parte de esta secuencia volcánica se encuentra localmente intrusionada por el Granófiro Ortiz (Figura 3) de edad miocénica, lo cual se observó en los bordes del graben, y localmente dentro del graben. Las rocas volcánicas más jóvenes consisten en basaltos toleíticos y calcialcalinos que cubren la secuencia anterior y afloran en las sierras de Santa Úrsula y del Bacatete, así como a lo largo del graben de Empalme. La mayor parte del área del graben se encuentra cubierta por

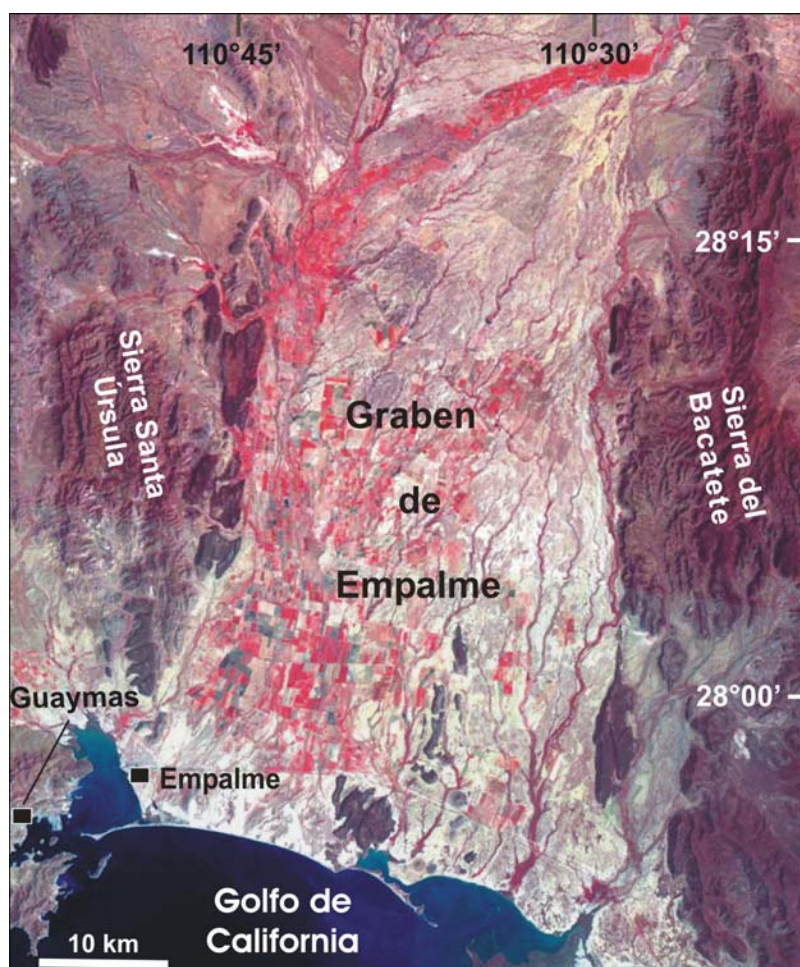


Figura 2. Imagen Landsat-4 MSS, P35R40 Hermosillo, tomada en abril de 1983, bandas 4, 2, 1. Extremo norte del graben de Empalme a lo largo de la costa del Golfo de California, donde se muestran los principales rasgos fisiográficos mencionados en el texto.

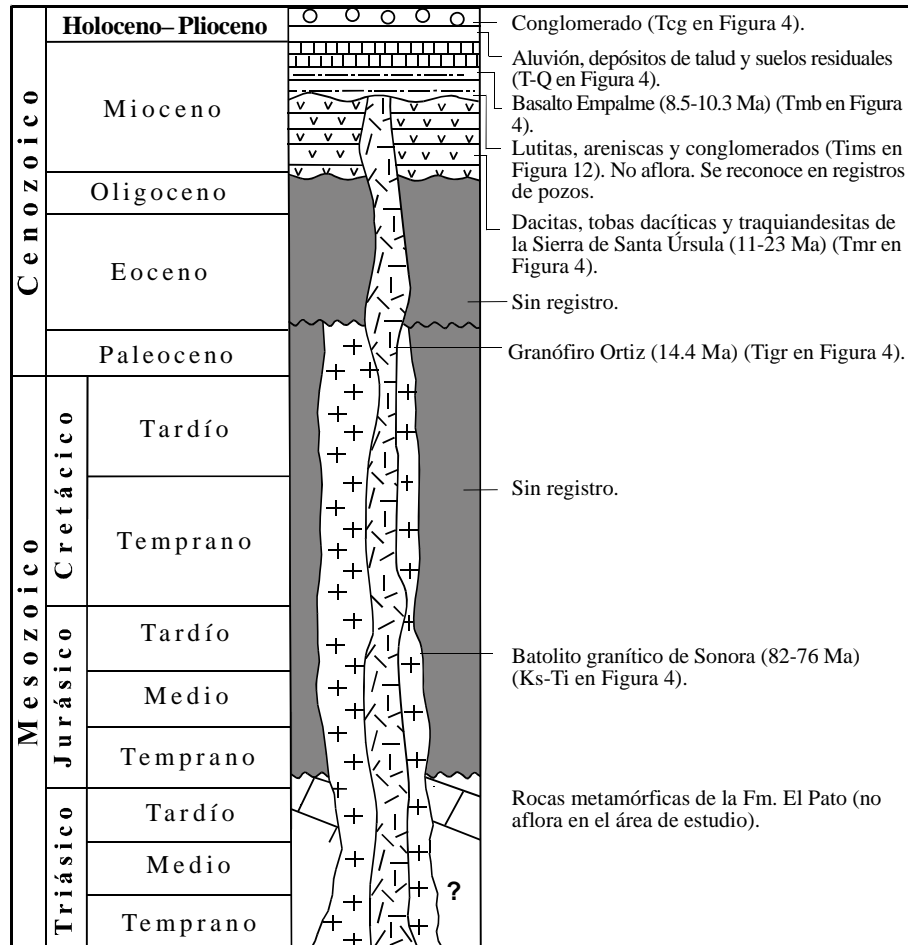


Figura 3. Columna estratigráfica generalizada para la costa de Guaymas. Fuentes: Mora-Álvarez (1993); datos no publicados de F.W. McDowell en Mora-Álvarez (1992); Johnpeer (1977); Mora-Klepeis *et al.* (1997); Mora-Álvarez y McDowell (2000); Roldán-Quintana (2002); y este trabajo.

aluvión y suelos residuales que constituyen terrenos de cultivo (Figura 4).

Estructura Regional

El área de estudio se localiza en una región donde las rocas volcánicas cenozoicas buzaban principalmente hacia el oriente con rumbo general N-S, y están cortadas por fallas N-S que delimitan el graben de Empalme. En su parte norte existe una zona de transferencia y los echados de las rocas volcánicas buzaban hacia el oeste (Stewart y Roldán-Quintana, 1994). Con mayor detalle se ha visto que en la Sierra de Santa Úrsula las rocas más antiguas buzaban hacia el este, pero las de edades más jóvenes que 12 Ma buzaban al oeste. Los derrames de basalto en el borde occidental de la Sierra del Bacatete buzaban hacia el oeste, es decir, hacia el graben. Lo anterior se ha interpretado como un cambio geométrico del patrón de fallas que controla el graben después de 12 Ma, edad que corresponde al fin de la subducción en la parte sur de Baja California.

EL GRABEN DE EMPALME

Estratigrafía del graben en el subsuelo

Con base en datos de pozos y en estudios geofísicos limitados a la porción sur de la cuenca se ha podido definir de manera general la estratigrafía del graben de Empalme (Campos-Coy *et al.*, 1984; Vega-Granillo *et al.*, 2002). De acuerdo con estos trabajos se ha definido un espesor de sedimentos que varía entre 300 y 750 m. Sondeos eléctricos verticales calibrados con los pozos estudiados sugieren la presencia de cuatro unidades estratigráficas (Campos-Coy *et al.*, 1984): 1) La unidad más superficial consiste de conglomerados y arenas en aluviones y suelos residuales con espesor entre 30 y 200 m. Esta unidad es la más extendida en superficie y cubre la mayor parte del valle (Figura 4); 2) Una unidad arcillosa y areno-arcillosa, con horizontes calcáreos, cuyo espesor es de 100–500 m; 3) Probablemente en discordancia sobre rocas del basamento de la cuenca, se identificaron conglomerados y arenas con un espesor de aproximadamente 200 m; 4) Las rocas más

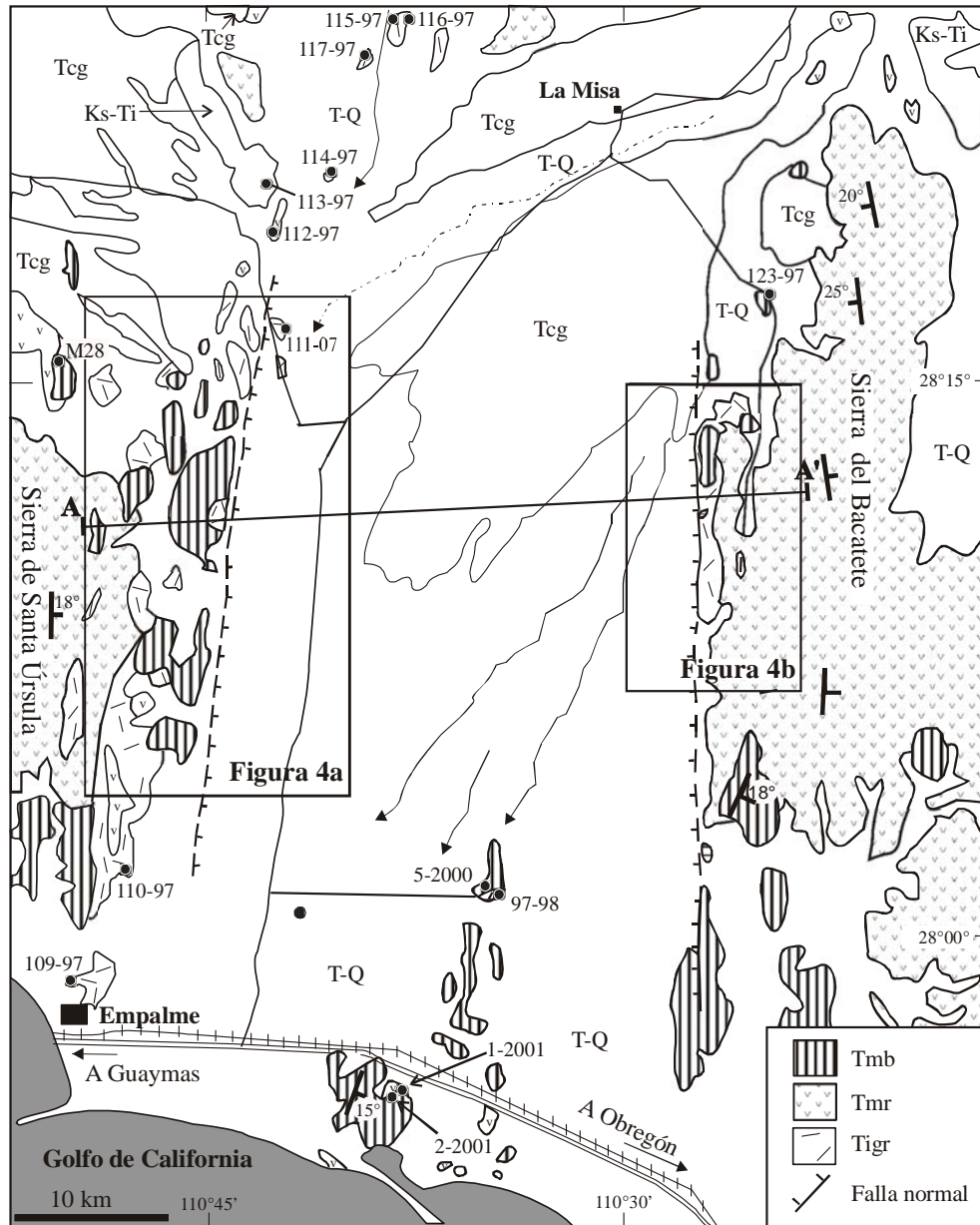


Figura 4. Mapa geológico de la región del Valle de Empalme y áreas vecinas. Los recuadros indican la localización de las Figuras 5 a y b. T-Q: aluvión y depósitos de talud de edad Terciario-Cuaternario; Tcg: conglomerados terciarios; Tmb: Basalto Empalme; Tigr: intrusivos de granófiro de composición riolítica; Tmr: dacitas y tobas andesíticas de edad miocénica; K-Ti: granitos y granodioritas del Cretácico Tardío-Terciario temprano.

antiguas corresponden a rocas volcánicas, incluyendo basaltos, tobas riolíticas y granófiros.

Estructura

En el área del graben de Empalme se han identificado dos eventos extensivos con características geométricas distintivas: el primero se relaciona al evento de Cuencas y Sierras, y se caracteriza por fallas normales de rumbo general N 30–40° W que afectan a la sección volcánica, y

cuyas edades se estiman entre 24 y 11 Ma (Mora-Álvarez y McDowell, 2000). El segundo evento tectónico está relacionado a la apertura del golfo, y se caracteriza por fallas con orientación N–S que presentan un desplazamiento a rumbo sobrepuesto a movimientos de tipo normal. En este trabajo se propone el uso del término “guben de Empalme” para designar a una estructura extensional compleja, que corresponde al rasgo morfológico de 50 km de largo y una anchura de 25 km conocido como Valle de Empalme, el cual está limitado por dos sistemas de fallas normales principales, con orientación N–S (Figura 4). Las fallas normales afectan



Figura 5. a: Mapa geológico del borde occidental del graben de Empalme. T-Q: aluvión y depósitos de talud; Tmb: derrames del Basalto Empalme; Tigr: intrusivos de granófiro; Tmr: rocas volcánicas no diferenciadas principalmente ácidas. b: Mapa geológico del borde oriental del graben de Empalme. Las unidades son las mismas que aparecen en la Figura 5a.

a los basaltos toleíticos del Basalto Empalme y a los diques del granófiro Ortiz, definido más adelante (Figura 4). Los diques también tienen un rumbo general N-S y cortan lavas y tobas de composición riolítica, en la porción oriental de la Sierra de Santa Úrsula y en la porción occidental de la Sierra del Bacatete. Aunque las fallas mayores son inferidas, la presencia de otras fallas secundarias es evidente por las diferencias de elevación de las mesetas de basalto de hasta 200 m, además de inclinaciones en diferentes direcciones en ambos bordes del graben. En el borde oriental del graben,

así como en la Sierra de Santa Úrsula y la porción occidental de la Sierra del Bacatete se reconocieron fallas de desplazamiento lateral derecho con rumbo N-S. Las fallas identificadas son laterales, aunque en algunos planos de falla se observaron también estrías de fallas oblicuas (20–30° con la horizontal), particularmente en el Arroyo de los Pilares, a 1 km del Rancho del mismo nombre (Figura 5b) (Vargas-Navarro, tesis de maestría en preparación). Los derrames de basalto son las rocas más jóvenes afectadas por el fallamiento normal en el área.

Naturaleza del magmatismo dentro del graben

Basalto Empalme

El nombre de Basalto Empalme fue propuesto por Johnpeer (1977) debido a los excelentes afloramientos localizados al norte de Empalme, en donde estos basaltos ocurren como dos y posiblemente tres derrames, con un espesor estimado de 50 m. En el presente trabajo se han identificado afloramientos del Basalto Empalme en ambos márgenes del graben y dentro del mismo, con relaciones estratigráficas similares. El Basalto Empalme se correlaciona con los basaltos y andesitas basálticas con edades entre 12 y 7 Ma reconocidos a lo largo de una franja costera entre Guaymas y la Isla Tiburón (Gastil y Krummenacher, 1977; Paz-Moreno, 1993; Mora-Álvarez, 1993), así como con el Basalto Las Trincheras localizado en la porción oriental de la Sierra Santa Úrsula (Mora-Álvarez, 1993) (Figura 5a).

El Basalto Empalme forma mesetas y representa la roca volcánica más joven de esta región. Cubre de manera discordante a las tobas riolíticas soldadas del Cerro El Vigía cerca de la ciudad de Guaymas (Figura 2), así como a los granófiros en la región del graben. En la margen oriental del graben también se han observado afloramientos del Basalto Empalme en las cercanías al Rancho Los Pilares (Figura 5b). Los basaltos son generalmente masivos, aunque hacia su cima presentan abundantes vesículas rellenas por calcita y/o zeolitas. La textura de esta roca es intergranular con cristales de plagioclasa y piroxeno. Presenta escasos cristales de olivino, los cuales están parcialmente alterados a iddingsita, aunque algunos cristales se observan frescos. La matriz es de grano medio y está constituida principalmente de plagioclasa, piroxeno y minerales opacos como magnetita (Figura 6).

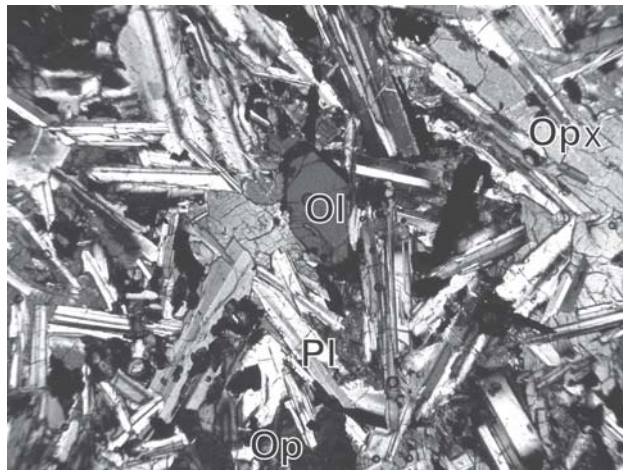


Figura 6. Fotomicrografía con luz polarizada del Basalto de Empalme. Se observa una textura intergranular con cristales de plagioclasa de la variedad andesina, cristales de olivino (Ol) parcialmente alterados a iddingsita, piroxeno (Opx) y minerales opacos (Op).

En un diagrama de variación de sílice contra álcalis totales como $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (Le Maitre *et al.*, 1989), las muestras de rocas basálticas se ubican en las regiones de basalto y andesita basáltica (Figura 7, Tabla 1), y en la región de bajo y medio potasio del diagrama $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (Figura 8), sugiriendo una afinidad toleítica. En un diagrama de discriminación tectónica tipo Pearce basado en los valores de Rb contra $\text{Y} + \text{Nb}$ (Pearce *et al.*, 1984), las muestras de basalto caen en la región definida para un ambiente de arco volcánico (Figura 9). De acuerdo a los datos químicos disponibles, en un diagrama AFM, se trata de rocas de afinidad calcialcalina; sin embargo, dos de las muestras indican una afinidad toleítica (Figura 10).

La Tabla 2 muestra los valores de la composición isotópica de Sr y Nd para 4 muestras equivalentes al Basalto Empalme. Los valores bajos de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ conjuntamente con valores relativamente altos de $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, corresponden a los esperados para basaltos toleíticos en una zona de rift continental. De hecho son similares a los reportados por Dungan *et al.* (1986) para basaltos del Rift del Río Grande.

Al norte de Empalme (Figura 2), recientemente se encontró una capa de aproximadamente 80 m de espesor de toba riolítica caolinizada con fragmentos de pómez y granófiro intercalada dentro de dos derrames del Basalto Empalme. Este afloramiento constituye la primera evidencia de facies explosivas asociadas a un volcanismo riolítico ocurrido durante el Mioceno Tardío.

Granófiro Ortiz

En el presente trabajo se denomina granófiro (o microgranito), a una roca intrusiva de composición félsica y grano fino a medio, que generalmente aflora en forma de diques o pequeños troncos. El Granófiro Ortiz se correlaciona con el granitoide El Papatote descrito por

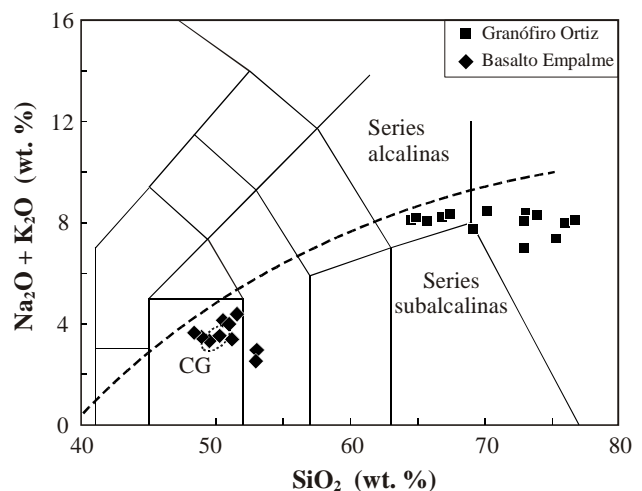


Figura 7. Clasificación de las rocas ígneas del graben de Empalme, de acuerdo a Le Maitre *et al.* (1989) para las muestras de granófiros (G) y basaltos (B) estudiados. CG: Composición de los basaltos de la Cuenca de Guaymas reportados por Sawlan (1991).

Cochemé (1981) y posteriormente por Mora-Álvarez (1993) como una roca hipabisal en la porción oriental de la Sierra Santa Úrsula. Sus afloramientos, generalmente lineales, están ubicados en los bordes del graben y van desde la costa del Golfo de California en las cercanías de Empalme, hasta el norte de Ortiz (Figura 4), y están expuestos de manera discontinua por más de 60 km. Dentro del graben existen pequeños afloramientos observados a unos 16 km al norte del poblado de Ortiz y en su porción sur a unos 22 km al noreste de Empalme. La presencia de estos intrusivos parece estar tectónicamente controlada, ya que la mayoría de ellos tienen un rumbo general N-S, al igual que algunas de las fallas a rumbo.

El Granófiro Ortiz intrusiona a la secuencia de dacitas y andesitas de la Sierra de Santa Úrsula y se encuentra debajo de las tobas riolíticas intercaladas con el basalto Las Trincheras (Figura 3). En la Sierra del Bacatete, el Granófiro Ortiz se encuentra cubierto de manera discordante por el Basalto Empalme. En el margen oriental del graben, se observan diques de granófiro intrusionando a la secuencia de tobas riolíticas, aproximadamente 2 km al noreste y 5 km al sureste del Rancho Los Pilares (Figura 5b). Esta

misma relación fue descrita por Mora-Álvarez (1993) en la porción oriental de la Sierra Santa Úrsula, al sur de Maytorena (Figura 5a). Estas rocas constituyen los intrusivos más jóvenes del graben de Empalme. De esta unidad, solo existe una fecha de 14 ± 2.5 Ma reportada por Mora-Klepeis *et al.* (1997).

En muestra de mano, los granófiros son generalmente de color claro y grano fino (<2 mm) a medio (<5 mm), con abundantes cavidades dejadas por el escape de gases acumulados por actividad de fluidos hidrotermales tardíos; dichas cavidades están rellenas de cuarzo y hematita. También se observan inclusiones de 1 a 10 cm de rocas volcánicas oxidadas y alteradas de color rojizo. En lámina delgada la textura es granofírica, constituida por feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa, y en menor proporción biotita, magnetita y hematita (Figura 11). Las muestras estudiadas son de naturaleza subalcalina y se ubican en el campo de las riolitas y traquidacitas (Figura 7). Son rocas ricas en sílice y potasio (Figura 8, Tabla 3), lo cual sugiere una composición calcialcalina. Por otro lado, en un diagrama de discriminación tectónica, estas rocas indican una afinidad con granitos de intraplaca (Figura 10).

Tabla 1. Concentraciones de elementos mayores y algunos elementos traza en basaltos del graben de Empalme.

	2001-01	2001-03	2001-7	SO-60	J104	J107	J111	J119	M-21	44-1-110	15-3-69
% en peso											
SiO ₂	48.7	51.6	50.7	47.8	53.6	51.5	53.3	53.3	50.0	49.8	50.7
TiO ₂	1.91	1.72	1.70	2.10	1.21	1.98	1.64	1.67	1.84	1.47	2.00
Al ₂ O ₃	16.0	16.8	17.2	15.8	15.9	16.4	15.6	15.9	15.9	16.4	15.4
Fe ₂ O ₃	11.78	10.08	10.02	12.01	11.24	10.82	10.85	10.76	10.85	9.78	11.04
MnO	0.18	0.16	0.16	0.19	0.16	0.17	0.15	0.18	0.16	0.15	0.17
MgO	7.32	5.86	6.23	6.85	7.23	5.86	6.96	6.63	5.89	8.97	7.14
CaO	9.83	9.09	9.71	10.04	8.89	9.82	8.65	8.76	9.28	10.55	10.51
Na ₂ O	3.10	3.49	3.47	3.30	2.54	3.17	2.73	2.77	3.33	3.15	3.24
K ₂ O	0.45	1.00	0.79	0.37	0.07	0.35	0.31	0.29	0.67	0.30	0.38
P ₂ O ₅	0.36	0.37	0.37	0.32	0.18	0.41	0.29	0.28	0.34	0.20	0.25
PxC	1.12	0.06	0.03	1.28	0.08	0.05	nd	0.10	1.51	nd	nd
Suma	100.75	100.23	100.38	100.06	101.10	100.53	100.48	100.64	99.77	100.77	100.83
ppm											
Rb	3	19	12	nd	nd	10	nd	20	nd	3	nd
Sr	382	460	458	309	nd	420	nd	300	411	205	182
Ba	428	874	535	241	nd	200	nd	700	522	nd	nd
Y	25	25	24	nd	nd	nd	nd	nd	32	23	27
Zr	160	178	173	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Nb	9	10	10	nd	nd	nd	nd	nd	nd	4	2
V	262	217	217	301	nd	nd	nd	nd	151	nd	nd
Cr	272	143	139	nd	nd	nd	nd	nd	189	228	228
Co	47	36	36	41	nd	nd	nd	nd	71	40	nd
Ni	123	60	60	nd	nd	nd	nd	nd	94	111	81
Cu	39	36	37	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Zn	103	90	85	30	nd	nd	nd	nd	105	84	106
Th	3	3	3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.27	0.47
Pb	5	5	5	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd

Nota: Análisis por Fluorescencia de Rayos X realizados en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica de la UNAM (LUGIS) por Rufino Lozano. PxC: pérdida por calcinación; ppm: partes por millón; nd: no determinado. La muestra M-21 fue reportada por Mora-Álvarez (1992). Las muestras 44-1-110 y 15-3-69 son basaltos de la cuenca de Guaymas reportados por Sawlan (1997).

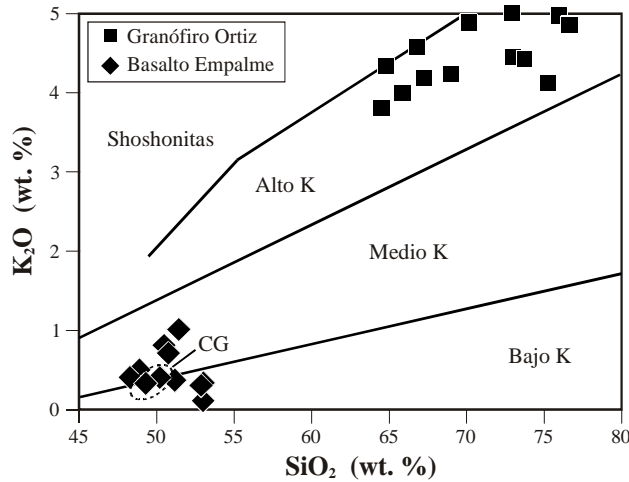


Figura 8. Diagrama K_2O-SiO_2 para muestras del Granófiro Ortiz (G) y el Basalto Empalme (B) en el graben de Empalme. Los límites indicados son los propuestos por Le Maitre *et al.* (1989).

Manifestaciones de aguas termales dentro del graben de Empalme

Con base en 183 estudios de pozos con profundidades que varían entre 20 y 412 m se pudo definir la presencia de agua subterránea moderadamente mineralizada con temperaturas mayores a 50 °C (Prol-Ledesma, 1991). Las aguas son en general bicarbonatadas y sódicas ricas en cloro, con concentraciones variables de sulfatos, sugiriendo la presencia de aguas geotérmicas. Las temperaturas medidas varían entre 28 y 57 °C, para profundidades entre 20 y 150 m. Se considera que la circulación del agua caliente está restringida a las fallas normales principales de rumbo N 60–80° E a lo largo de la cuenca (Prol-Ledesma, 1991).

Interpretación de la estructura del graben

La pseudoestratificación de los derrames basálticos, dentro del graben o en sus bordes, muestran inclinaciones entre 10 y 20° al oriente o al poniente, lo que permite inferir un basculamiento producido por las fallas que limitan al graben, así como otras fallas secundarias internas al mismo graben. El único plano geofísico disponible que cubre el área del graben de Empalme corresponde a la Carta Magnética Sierra Libre (H12-11) escala 1:250,000, publicada por el Consejo de Recursos Minerales (1995). En esta carta se definen dos lineamientos magnéticos asociados a fallas con rumbo N–S que delimitan el graben, en el cual se observa una serie de altos magnéticos, posiblemente asociados a rocas basálticas en el subsuelo. Lo anterior se corrobora con los estudios gravimétricos, magnetométricos y eléctricos, los cuales sugieren que la cuenca es estructuralmente compleja y está controlada por

numerosas fallas normales que afectan al basamento y al paquete sedimentario suprayacente (Campos-Coy *et al.*, 1984). En el subsuelo de la porción localizada al sureste de Maytorena (Figura 5a), se ha podido definir una serie de fallas normales principales de rumbo N 60°–80° E y algunas N–S (Figura 5a), que definen una estructura de pilares y cuencas. Las fallas principales que limitan el graben son las más evidentes en las secciones geofísicas, aunque en superficie sólo han podido ser inferidas. Con los datos anteriores se estima que la topografía del basamento es muy irregular, con posibles pilares y cuencas limitados por fallas (Figura 12). Desafortunadamente solo se conoce de una manera general la porción sur de la cuenca y hacia el norte no se cuenta con datos de subsuelo.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Evidencias petrogenéticas del inicio de la extensión en la región del Golfo de California

De acuerdo a los datos geoquímicos de las rocas terciarias, el cambio de un magmatismo intermedio a uno silíceo aproximadamente a los 14 Ma marca el período de transición entre el fin de la subducción y el inicio de la extensión (Mora-Klepeis *et al.*, 2003). En relación con la evolución magmática de esta zona, se pudo identificar la evolución del magmatismo calcialcalino de las rocas intermedias y félsicas de la Sierra de Santa Úrsula al volcanismo toleítico y parcialmente alcalino en el graben y

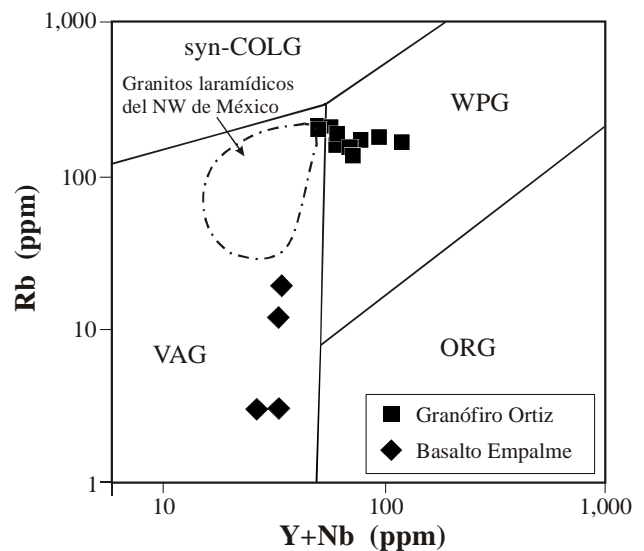


Figura 9. Diagrama Rb contra Y+Nb para las muestras de granófiros (G) y basaltos (B) estudiados, mostrando los límites de discriminación tectónica propuestos por Pearce *et al.* (1984). Syn-COLG: granitos sin-colisionales; VAG: granitos de arco volcánico; WPG: granitos intraplaca; ORG: granitos en dorsales oceánicas. El campo de los granitos laramécicos del noroeste de México es de acuerdo a Valencia-Moreno *et al.* (2001). Los datos numéricos están en la Tabla 3.

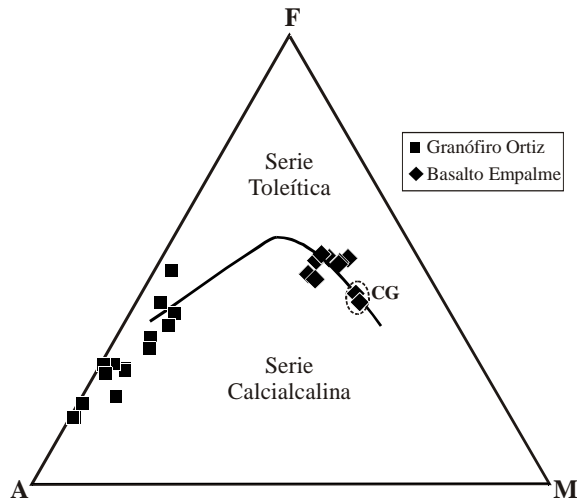


Figura 10. Diagrama AFM para basaltos y andesitas basálticas del graben de Empalme. G: Granófiro Ortiz; B: Basalto Empalme. F = Hierro total como FeO; M = MgO; A = Na₂O + K₂O. La localización de las muestras se puede ver en las Figuras 4, 5a y 5b.

en los basaltos del oriente de la Sierra del Bacatete relacionado a fallamiento profundo y a la fusión del manto. Este tipo de evolución ya había sido definida en otras regiones de las costas del actual Golfo de California (Paz-Moreno, 1993; Martín-Barajas *et al.*, 1995).

El Basalto Empalme es químicamente similar a dos muestras de basaltos submarinos de edad cuaternaria de la Cuenca de Guaymas, los cuales fueron generados en un marco tectónico de rift activo (Saunders *et al.*, 1982), así como a algunos de los basaltos reportados hacia el norte de Guaymas (Paz-Moreno, 1993). Las firmas isotópicas de Sr y Nd obtenidas para los basaltos en el graben y en sus bordes sugieren un origen mantélico.

Los intrusivos granofíricos reconocidos en el graben de Empalme se consideran rocas de ambiente subvolcánico cuyo emplazamiento está controlado por fisuras genéticamente asociadas al inicio de la tectónica extensiva de la región, la cual posiblemente también dio origen a las riolitas y tobas riolíticas del Grupo Algodones (Cochemé, 1981).

Relación del graben de Empalme con otras estructuras adyacentes

La identificación de estructuras extensionales previas a la apertura del golfo en la costa de Sonora ha sido difícil, principalmente debido a la gruesa cubierta de rocas clásticas y a la falta de estudios geológicos y geofísicos de detalle, así como a la compleja historia de la extensión en la zona. Sin embargo, siempre se sospechó de la existencia de este tipo de estructuras, pues esta región forma parte de la Provincia Extensional del Golfo de California. Así mismo, cabe mencionar que datos de enfriamiento a bajas temperaturas obtenidos de apatitas de granitos cretácicos de la costa

Tabla 2. Análisis isotópicos de Sr y Nd para muestras del Basalto Empalme.

Número de Muestra	Edad (Ma)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd
M21 ⁺	10.1	0.70458	0.51276
M28 ⁺	10.3	0.70477	0.51269
M61 ⁺	8.5	0.70497	0.51271
SO-60	8.9	0.70382	0.51291

Notas: Las muestras M21, M28 y M61 de la unidad Basalto Las Trincheras fueron estudiadas por Mora-Álvarez. La muestra SO-60 fue reportada por Roldán-Quintana (2000) y analizada por McDowell y Hush, en la Universidad de Texas en Austin.

⁺ Análisis isotópicos de Nd y Sr obtenidos con un equipo VG Micromass 54E TIMS en su forma totalmente automática. La relación ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr fue normalizada a ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.1194; valor obtenido para el estándar NBS 987: ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.710234 ± 0.000021 (precisión externa de 2s; n = 27). La relación ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd fue normalizada a ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219; la precisión externa de 2s del valor estándar de O'Nions arrojó ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.511110 ± 0.000010 (n=16).

de Sonora, la Isla Tiburón o del borde oeste del graben, indican una exhumación asociada a basculamientos debidos a la actividad de fallas normales durante el Mioceno Tardío (Calmus *et al.*, 2000). El graben de Empalme constituye la primera cuenca asociada a la fase inicial de ruptura continental identificada en la porción costera de Sonora. Se localiza a ~130 km al noreste de la actual Cuenca de Guaymas en la parte central del Golfo de California, la cual se extiende con rumbo NNE-SSW (Lonsdale y Becker, 1985), de manera oblicua con respecto al graben de Empalme.

Otra estructura que posiblemente corresponde al mismo evento tectónico es la cuenca sepultada de la región de la Costa de Hermosillo (Figura 1), la cual está limitada por fallas normales orientadas NE-SW (Castillo-Gurrola

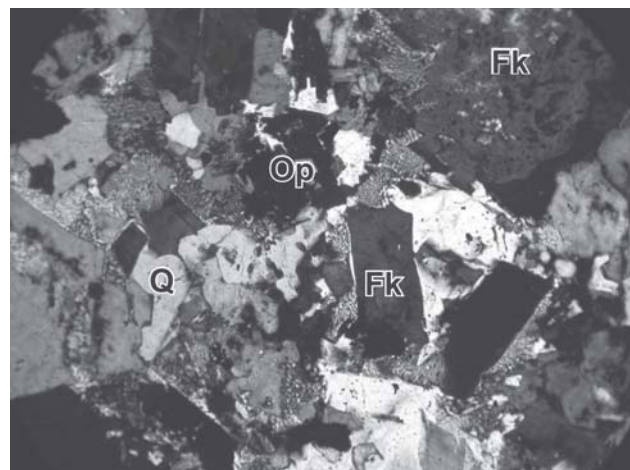


Figura 11. Fotomicrografía con luz polarizada de una muestra del Granófiro Ortiz. Se aprecia una textura equigranular granofírica en la que se pueden apreciar plagioclasa, feldespato potásico (Fk), cuarzo (Q), escasa biotita y abundantes minerales opacos (Op) como magnetita y hematita.

Tabla 3. Concentraciones de elementos mayores y algunos elementos traza del Granófiro Ortiz en el graben de Empalme

	109-97	110-97	111-97	113-97	114-97	115-97	119-97	2001-2	2001-6	2001-8	L-153	L-299	L-302
% en peso													
SiO ₂	68.7	68.9	74.9	74.8	75.7	72.8	74.9	72.2	66.7	64.0	64.1	64.7	66.2
TiO ₂	0.73	0.63	0.32	0.48	0.16	0.35	0.22	0.39	0.87	1.06	0.80	0.90	0.90
Al ₂ O ₃	14.5	14.1	13.2	11.7	12.2	13.3	12.6	13.6	14.6	15.1	14.5	14.9	14.5
Fe ₂ O ₃	4.15	3.35	3.41	3.03	1.56	3.09	1.91	2.33	4.92	6.15	8.65	5.40	6.53
MnO	0.07	0.06	0.07	0.55	0.07	0.07	0.02	0.04	0.10	0.14	0.11	0.08	0.09
MgO	0.98	0.69	0.06	0.29	0.07	0.25	0.09	0.73	0.95	1.40	0.55	1.35	0.74
CaO	2.39	2.06	1.03	1.08	0.99	1.46	0.95	1.67	2.51	3.03	2.20	3.10	2.00
Na ₂ O	3.52	3.51	3.92	3.23	3.20	3.87	2.98	3.06	4.10	4.24	3.80	4.00	3.65
K ₂ O	4.22	4.83	4.51	4.10	4.82	4.48	4.93	4.98	4.17	3.81	4.30	3.95	4.55
P ₂ O ₅	0.16	0.11	0.04	0.12	0.02	0.09	0.04	0.09	0.23	0.39	nd	nd	nd
PxC	0.55	1.00	0.30	0.41	0.46	0.53	0.61	0.42	1.03	0.89	nd	1.10	0.60
Suma	99.97	99.24	101.76	99.79	99.25	100.29	99.25	99.51	100.18	100.21	99.01	99.48	99.76
ppm													
Rb	152	177	172	157	200	167	200	196	148	131	nd	nd	nd
Sr	217	154	92	103	51	107	95	221	198	225	nd	nd	nd
Ba	113	1046	1710	681	387	1481	1303	1678	1142	1038	nd	nd	nd
Y	46	48	76	106	43	63	36	40	54	55	nd	nd	nd
Zr	334	433	385	387	181	365	177	208	377	372	nd	nd	nd
Nb	15	15	20	15	16	16	15	11	17	18	nd	nd	nd
V	50	31	9	24	7	18	10	34	48	68	nd	nd	nd
Cr	14	nd	nd	nd	10	nd	nd	6	4	4	nd	nd	nd
Co	10	5	3	4	nd	3	nd	4	8	12	nd	nd	nd
Ni	5	2	nd	4	7	1	5	13	8	8	nd	nd	nd
Cu	14	9	7	17	13	11	12	7	30	10	nd	nd	nd
Zn	55	54	72	113	43	83	21	18	60	86	nd	nd	nd
Th	10	10	13	13	19	10	12	18	14	13	nd	nd	nd
Pb	20	24	23	21	27	25	29	20	19	17	nd	nd	nd

Nota. Análisis hechos en el laboratorio de Fluorescencia de Rayos X del Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica de la UNAM (LUGIS) por Rufino Lozano. PxC: pérdida por calcinación; ppm: partes por millón; nd: no determinado. Las muestras L-153, L-299, y L-302 fueron reportadas por Cochemé (1981).

et al., 2000). De acuerdo a estudios realizados por Montijo-González (2000), el acuífero de la Costa de Hermosillo se encuentra en un complejo deltaico, cuyos límites norte y sur corresponden a fallas N 40–60° E. La columna estratigráfica reportada por Montijo-González (2000), muestra un derrame de basalto del Mioceno Tardío, el cual cubre sedimentos marinos y evaporitas, y está sobreyaciendo a una unidad de brechas y conglomerados con un espesor de 500 m. Los basaltos podrían corresponder al mismo evento extensivo que dio origen al graben de Empalme. La formación del graben de Empalme corresponde a un tiempo de transición tectónica, entre la fase extensional Cuencas y Sierras y la ruptura continental, que dio inicio a la apertura del Golfo de California y a la transferencia progresiva de la península de Baja California, de la placa de Norte América a la placa del Pacífico hace ~12 Ma (Atwater, 1989; Stock y Lee, 1994).

La intrusión de los granófiros de composición riolítica emplazados en los derrames de la Formación Cerro El Vigía en forma de diques de rumbo N–S, en el borde oriental de la Sierra de Santa Úrsula y en la porción occidental de la Sierra del Bacatete, ocurrió durante una fase extensional

hace ~14 Ma (Mora-Klepeis *et al.* 1997). Este evento marca un período de extensión incipiente con dirección E–W casi al fin de la subducción, al cual podrían estar relacionadas las formaciones volcánicas félsicas reconocidas en la región costera, como la Toba de San Felipe de 12 Ma (Stock *et al.*, 1999), así como la Formación Lista Blanca expuesta en varias cuencas del oriente de Sonora, y cuyas edades varían entre 10 y 12 Ma (Bartolini *et al.*, 1994; McDowell *et al.*, 1997). La presencia de afloramientos importantes de granófiro en los extremos norte y sur, así como a lo largo de las fallas que bordean el graben de Empalme sugiere una estrecha relación entre estas rocas y las etapas iniciales del graben. Esto permite concluir que dicho graben, si bien está relacionado con la apertura del Golfo de California, constituye en sus inicios una estructura transicional entre las últimas manifestaciones extensionales relacionadas a la tectónica Cuencas y Sierras y el inicio del fallamiento a rumbo asociado a la formación del Golfo de California en el Mioceno Tardío (<12Ma). La fallas a rumbo con desplazamiento lateral posterior al desplazamiento vertical normal se consideran como una evidencia de un cambio en el patrón de esfuerzos dentro de la Provincia Extensional

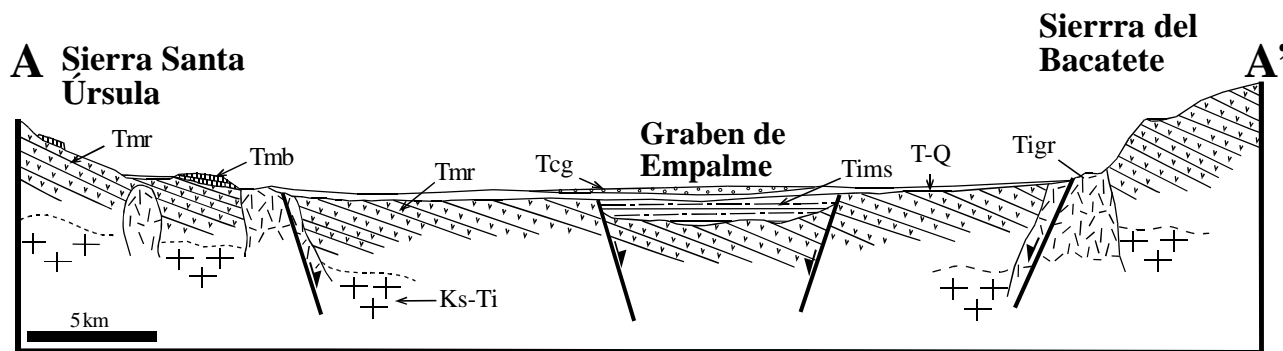


Figura 12. Sección geológica esquemática A–A' indicada en la Figura 4, donde se muestra la estructura interpretada para el graben de Empalme. Las abreviaciones de los nombres de las unidades son los mismos que se muestran en la Figura 4, únicamente en el subsuelo se agrega la unidad Tims: sedimentos miocénicos(?), interpretados por correlación regional con el subsuelo de la costa de Hermosillo (Montijo-González, 2000). La escala vertical está exagerada para resaltar los rasgos geológicos más importantes.

del Golfo posterior a 8.5 Ma, que es la edad de los basaltos fallados (Stewart y Roldán-Quintana, 1994; Roldán-Quintana, 2002). Datos de pozos y estudios geofísicos en el extremo sur del graben, sugieren un espesor de sedimentos clásticos con niveles arcillosos y un conglomerado basal de 300 a 700 m. Con base en los datos geofísicos se sabe que dentro del graben existen fallas normales que forman una estructura de cuencas y pilares secundarios. Dentro del graben se ha reportado la presencia de aguas termales con temperaturas hasta de 57 °C, lo que se considera como una evidencia de tectonismo reciente o actual.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo de campo y los análisis químicos fueron financiados por el proyecto CONACYT 28086-T otorgado a Jaime Roldán-Quintana, así como por fondos de proyectos internos de Estación Regional del Noroeste del Instituto de Geología de la UNAM. Algunos de los datos isotópicos y geocronológicos de rocas volcánicas presentados en este trabajo son resultados inéditos proporcionados por Fred W. McDowell de la Universidad de Texas en Austin. Los autores agradecen a Arturo Martín Barajas y a Luca Ferrari por las observaciones hechas al manuscrito inicial, las cuales contribuyeron grandemente al mejoramiento de este trabajo. Agradecemos también la colaboración de Pablo Peñaflor-Escárcega en la preparación de las muestras para análisis químicos y a Pedro Vargas-Navarro por su ayuda en la elaboración de la Figura 2.

REFERENCIAS

- Aranda-Gómez, J.J., Henry, C.D., Luhr, J.F., 2000, Evolución tectonomagmática post-paleocénica de la Sierra Madre Occidental y de la porción meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LIII, 59–71.
- Atwater, T., 1989, Plate tectonic history of the northeastern Pacific and western North America, in Winterer, E.L., Jussong, D.M., Decker, R.W. (eds.), *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii: Geological Society of America, The Geology of North America*, v. N, 21–72.
- Bartolini, C., Damon, P., Shafiqullah, M., Morales, M., 1994, Geochronologic contributions to the Tertiary sedimentary-volcanic sequences (“Baucarit Formation”) in Sonora, Mexico, *Geofísica Internacional*, 33, 67–77.
- Calmus, T., Poupeau, G., Defaux, J., Labrin, E., 2000, Basin and Range and Gulf of California tectonics: Contribution of an apatite fission-track study (resumen), in Calmus, T., Pérez-Segura, E. (eds.), *Cuarta Reunión Sobre la Geología del Noroeste de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Estación Regional del Noroeste y Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Libro de Resúmenes, Publicaciones Ocasionales*, 2, 13–14.
- Calmus, T., Aguillón-Robles, A., Maury, R.C., Bellon, H., Benoit, M., Cotten, J., Bourgeois, J., Michaud, F., 2003, Spatial and temporal evolution of basalts and magnesian andesites (“bajaites”) from Baja California, Mexico: Constraints on their tectonic setting and origin: *Lithos*, 66, 77–105.
- Campos-Coy, G., Ortega-Guerrero, A., Medina-B., R., 1984, Ampliación al estudio geofísico del Valle de Guaymas, Sonora: México, D. F., Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, reporte no publicado, 32 p.
- Carreño, A.L., 1985, Biostratigraphy of the Late Miocene to Pliocene on the Pacific island Maria Madre, México: *Micropaleontology*, 31, 139–166.
- Castillo-Gurrola, J., Morales-Montaña, M., Rangel-Medina, M., Monreal-Saavedra, R., 2000, Estudio geohidrológico del acuífero de la Costa de Hermosillo (resumen): Hermosillo, Sonora, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Semana Cultural, s/n de página.
- Cochemé, J.J., 1981, Mise en évidence d'un granite subvolcanique associé aux laves tertiaires du Sonora (Mexique): *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris, Série II*, tome 293, 989–992.
- Conly, A.G., 1999, K-Ar age constrain on basin rifting and sedimentation for the Boleo Cu-Co-Zn deposit, Baja California Sur, with implications for possible metal sources: Denver, Colorado, Geological Society of America, Abstract with Programs, 29, A31.
- Consejo de Recursos Minerales, 1995, Carta Magnética Sierra Libre, H12-11, escala 1:250,000: Pachuca, Hidalgo, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Consejo de Recursos Minerales, 1 mapa.
- Damon, P.E., Shafiqullah, M., Clark, K.F., 1983, Geochronology of the porphyry copper deposits and related mineralization of Mexico: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20 (6), 1052–1071.

- Dokka, R.K., Merriam, R.H., 1982, Late Cenozoic extension of northeastern Baja California, México: Geological Society of America Bulletin, 93, 371–378.
- Dungan, M.A., Lindstrom, M., McMillan, N., Moorbath, S., Hoefs, J., Haskin, L., 1986, Open system magmatic evolution of the Taos plateau volcanic field, northern New Mexico I; The petrology and geochemistry of the Sevilleta basalt: Journal of Geophysical Research, 91, 5999–6028.
- Gans, P.B., 1997, Large-magnitude Oligo-Miocene extension in southern Sonora: Implications for the tectonic evolution of northwest Mexico: Tectonics, 16, 388–408. Gans, P.B., 1997, Large-magnitude Oligo-Miocene extension in southern Sonora: Implications for the tectonic evolution of northwest Mexico: Tectonics, 16, 388–408.
- Gans, B.P., MacMillan, I., Wong, M., Roldán-Quintana, J., 2003, Structural and magmatic evolution of the Sonoran rifted margin: a preliminary report, in 99th annual meeting, Cordilleran Section, Geological Society of America, Puerto Vallarta, Jalisco, Mexico, April 1–3, 2003: Geological Society of America, Abstracts with Programs, 35 (4), p. 21.
- Gastil, G., Krummenacher, D., 1977, Reconnaissance geology of coastal Sonora between Puerto Lobos and Bahía Kino: Geological Society of America Bulletin, 88, 189–198.
- Helenes, J., Carreño, A.L., 1999, Neogene sedimentary evolution of Baja California in relation to regional tectonics: Journal of South American Earth Sciences, 12, 589–605.
- Henry, C.D., 1989, Late Cenozoic Basin and Range structure in western México and adjacent to the Gulf of California, México: Geological Society of America Bulletin, 101, 1147–1156.
- Holt, J.W., Holt, W.E., Stock, J.M., 2000, An age constraint on Gulf of California rifting from the Santa Rosalía basin, Baja California Sur, Mexico: Geological Society of America Bulletin, 112, 540–549.
- Johnpeer, G.D., 1977, Reconnaissance geology and petrology of the Guaymas area, Sonora, Mexico: Tempe, Arizona State University, M. Sc. thesis, 67 p.
- Karig, D.E., Jansky, W., 1972, The protogulf of California: Earth Planetary Science Letters, 17, 169–174.
- Le Maitre, R.W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Le Bas, M., Sabine, P.A., Schmidt, R., Sorensen, H., Srekeisen, A., Woolley, A.R., Zanettin, B., 1989, A classification of igneous rocks and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks: Oxford, Blackwell, 193 p.
- Lonsdale, P., Becker, K., 1985, Hydrothermal plumes, hot springs, and conductive heat flow in the Southern Trough of the Guaymas Basin: Earth and Planetary Science Letters, 73, 211–225.
- Lonsdale, P., 1991, Structural patterns of the Pacific floor offshore of peninsular California, in Dauphin, J. P., Simoneit, B. (eds.), The Gulf and Peninsular Province of the Californias: American Association of Petroleum Geologists, Memoir, 47, 87–125.
- Martín-Barajas, A., Stock, J.M., Layer, P., Hausback, B., Renne, P., López-Martínez, M., 1995, Arc-rift transition volcanism in the Puertecitos Volcanic Province, northeastern Baja California, Mexico: Geological Society of America Bulletin, 107, 407–424.
- Martín-Barajas, A., Téllez-Duarte, M., Stock, J.M., 1997, The Puertecitos Formation: Pliocene volcanoclastic sedimentation along an accommodation zone in northeastern Baja California, in Johnson, M.E., Ledesma-Vásquez, J. (eds.), Pliocene carbonate and related facies flanking the Gulf of California, Baja California, Mexico: Geological Society of America Special Paper 318, 1–24.
- Martín-Barajas, A., 2000, Volcanismo y extensión en la Provincia Extensional del Golfo de California: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, LIII, 72–83.
- McDowell, F.W., Clabaugh, S.E., 1979, Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western Mexico, in Chapin, C.E., Elston, W.E. (eds.), Ash-flow tuffs: Geological Society of America, Special Paper 180, 113–124.
- McDowell, F.W., Roldán-Quintana, J., Amaya-Martínez, R., 1997, Interrelationship of sedimentary and volcanic deposits associated with Tertiary extension in Sonora, Mexico: Geological Society of America, Bulletin, 109, 1349–1360.
- McFall, C., 1968, Reconnaissance geology of the Concepción Bay area, Baja California, Mexico: Stanford University, Publications in the Geological Sciences, 10 (5), 1–25.
- Montijo-González, A., 2000, Geomorfología y estratigrafía del complejo deltaico de la Costa de Hermosillo: Hermosillo, Sonora, Departamento de Geología, División de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Sonora, tesis de maestría, 65 p.
- Mora-Álvarez, G., 1992, History of Cenozoic magmatism in the Sierra Santa Úrsula, Sonora: The University of Texas at Austin, Austin Texas, B. S. thesis, 153 p.
- Mora-Álvarez, G., 1993, Relaciones estratigráficas y geocronológicas entre las unidades volcánicas de la Sierra Santa Úrsula, en Sonora, y el magmatismo de la región del Golfo de California, in Delgado-Argote, L., Martín-Barajas, A. (eds.), Contribuciones a la Tectónica del Occidente de México: Monografía UGM, 1, 123–146.
- Mora-Álvarez, G., McDowell, F.W., 2000, Miocene volcanism during late subduction and early rifting in the Sierra Santa Úrsula of western Sonora, Mexico, in Delgado-Granados H., Aguirre-Díaz, G., Stock, J.M. (eds.), Cenozoic tectonics and volcanism of Mexico: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 334, 123–141.
- Mora-Klepeis, G., McDowell, F.W., Ortega-Rivera, A., 1997, Late Miocene felsic volcanism in west-central Sonora: An expression of rift or subduction-related magmatism?: Salt Lake City, Abstracts with Programs, Utah, Geological Society of America, Annual Meeting, A481.
- Mora-Klepeis, G., Roldán-Quintana, J., McDowell, F.W., Ortega-Rivera, A., 2003, Geochemistry and Tectonic significance of Miocene granitoids in Northwestern Mexico: Seattle, Abstracts with Programs, Geological Society of America Annual Meeting, 34(7), p. 554.
- Nagy, E.A., 2000, Extensional deformation and paleomagnetism at the western margin of the Gulf extensional province, Puertecitos Volcanic Province, northeastern Baja California, Mexico: Geological Society of America Bulletin, 112, 857–870.
- Neuhaus, J.R., Cassidy, M.E., Krummenacher, D., Gastil, R.G., 1988, Timing of protogulf extension and transtensional rifting through volcanic/sedimentary stratigraphy of S. W. Isla Tiburón, Gulf of California, Sonora, Mexico: Geological Society of America, Cordilleran Section, Abstract with Programs, 20 (3), p. 218.
- Nourse, J.A., 1989, Geological evolution of two crustal scale shear zones, Part II: The Magdalena metamorphic core Complex: California Institute of Technology, Ph D Dissertation, 396 p.
- Ochoa-Landín, L., Ruiz, J., Calmus, T., Pérez-Segura, E., Escandón, F., 2000, Sedimentology and stratigraphy of the Upper Miocene El Boleo Formation, Santa Rosalía, Baja California, Mexico: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 17, 83–95.
- Oskin, M., Stock, J., 2003, Marine incursion synchronous with plate-boundary localization in the Gulf of California: Geology, 31, 23–26.
- Oskin, M., Stock, J., Martín-Barajas, A., 2001, Rapid localization of Pacific-North America plate motion in the Gulf of California: Geology, 29, 459–462.
- Paz-Moreno, F., 1993, Le volcanisme Plio-Quaternaire de l'état du Sonora (nord-ouest du Mexique)- évolution spatiale et chronologique; implications pétrogénétiques: Marseille, France, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille, Faculté des Sciences et Techniques de St. Jérôme, thèse doctorat, 160 p.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks: Journal of Petrology, 25, 956–983.
- Prol-Ledesma, R.M., 1991, Chemical geothermometers applied to the study of thermalized aquifers in Guaymas, Sonora, Mexico: a case history: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 46, 49–59.
- Roldán-Quintana, J., 2002, Caracterización geológico-geoquímica y evolución del arco magmático Mesozoico-Terciario entre San

- Carlos y Maycoba, sur de Sonora: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral, 185 p.
- Saunders, A.D., Fornari, D.J., Morrison, M.A., 1982, The composition and emplacement of basaltic magmas produced during the development of continental-margin basins; The Gulf of California, Mexico: *Journal of the Geological Society of London*, 139, 335–346.
- Sawlan, M.G., 1991, Magmatic evolution of the Gulf of California rift, *in* Dauphin, J.P., Simoneit, B.R.T. (eds.), *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*: American Association of Petroleum Geologists, Memoir, 47, 301–369.
- Sawlan, M.G., Smith, J.G., 1984, Petrologic characteristics, age and tectonic setting of Neogene volcanic rocks in northern Baja California Sur, Mexico, *in* Frizzel, V.A. Jr. (ed.), *Geology of Baja California Peninsula*: Society for Sedimentary Geology (SEPM), Pacific Section, publication 39, 237–252.
- Spencer, J.E., Normark, W., 1979, Tosco-Abrejos fault zone: A Neogene transform plate boundary within the Pacific margin of southern Baja California, Mexico: *Geology*, 7, 554–557.
- Stewart, J. H., Roldán-Quintana, J., 1994, Map showing late Cenozoic extensional tilt patterns and associated structures in Sonora and adjacent areas, Mexico: 1:1,000,000. U.S. Geological Survey, Miscellaneous Field Studies Map, Map MF-2238, with text included.
- Stock, J.M., 1989, Sequence and geochronology of Miocene rocks adjacent to the Main Gulf Escarpment: southern Valle Chico, Baja California, Mexico: *Geofísica Internacional*, 5, 851–896.
- Stock, J.M., Hodges, K.V., 1989, Pre-Pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific plate: *Tectonics*, 8, 99–115.
- Stock, J.M., Hodges, K.V., 1990, Miocene to Recent structural development of an extensional accommodation zone, northeastern Baja California, Mexico: *Journal of Structural Geology*, 12, 315–328.
- Stock, J.M., Lee, J., 1994, Do microplates in subduction zones leave a geological record?: *Tectonics*, 13, 1472–1487.
- Stock, J.M., Lewis, C.J., Nagy, E.A., 1999, The tuff of San Felipe: an extensive Middle Miocene pyroclastic flow deposit in Baja California, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 93, 53–74.
- Valencia-Moreno, M., Ruiz, J., Barton, M.D., Patchett, P.J., Zürcher, L., Hodkinson, D., Roldán-Quintana, J., 2001, A chemical and isotopic study of the Laramide granitic belt of northwestern Mexico: identification of the southern edge of the North American Precambrian basement: *Geological Society of America Bulletin*, 113, 1409–1422.
- Vega-Granillo, R., Calmus, T., 2003, Mazatán metamorphic core complex (Sonora, Mexico): Structures along the detachment fault and its exhumation evolution: *Journal of South American Earth Sciences*, 16, 193–204.
- Vega-Granillo, L., Castillo-Gurrola, J., Morales-Montaña, M., Tapia-Padilla, G., 2002, Hidrogeofísica y balance hidrológico para la modelación matemática del acuífero de Guaymas-Empalme, Sonora (resumen), *in* III Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra, Puerto Vallarta, Jalisco, Mexico: *Geos*, 22 (2), 122–123.
- Wilson, R.T., 1978, Reconnaissance geology and petrology of the San Carlos area, Sonora, Mexico: Tempe, Arizona, Arizona State University, M. Sc. thesis, 107 p.
- Wong, M.S., Gans, P., 2003, Tectonic implications of Early Miocene extensional unroofing of the Sierra Mazatan metamorphic core complex, Sonora, Mexico: *Geology*, 31, 953–956.

Manuscrito recibido: Septiembre 29, 2003

Manuscrito corregido recibido: Junio 30, 2004

Manuscrito aceptado: Agosto 2, 2004