

Caracterización de las rocas metacarbonatadas y rocas adyacentes en el arroyo El Mezquite dentro del Complejo Plutónico de La Paz, Baja California Sur, México: sucesión de eventos geológicos en función de relaciones de campo y geocronología

Guillermo Camarena-Vázquez^{1,*}, José Antonio Pérez-Venzor¹, Peter Schaaf², Tobias Schwennicke¹ y Carlos Ortega-Obregón³

¹Departamento Académico de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Baja California Sur, Carretera al Sur km 5.5., Apartado Postal 19-B, C.P. 23080, La Paz, Baja California Sur, México.

²Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS), Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, Ciudad de México, 04510, México.

³Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI), Centro de Geociencias, Campus Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México, Boulevard Juriquilla 3001, Querétaro, Qro., 76230, México.

*jg.camarena@uabcs.mx

RESUMEN

El Complejo Plutónico de La Paz (CPLP) está ubicado al sur de la península de Baja California. En este complejo se ha reportado la presencia de rocas calcosilicatadas asociadas a otras rocas metamórficas e intrusivas. El presente estudio fue enfocado al estudio de las rocas calcosilicatadas y rocas adyacentes que afloran en el arroyo El Mezquite, conformadas por una alternancia de: mármol, mármol impuro, rocas calcosilicatadas y gneis anfibolítico, que se extienden por más de dos kilómetros y agrupadas como una unidad informal llamada calcosilicatos El Mezquite. Las relaciones de campo junto con las características megascópicas y microscópicas, indican que las rocas metasedimentarias representan parte de un protolito calcáreo formado en un ambiente marino con mezcla de sedimentos siliciclásticos y volcániclasticos, los cuales fueron metamorfizados posteriormente. En el arroyo El Mezquite además afloran rocas ígneas sin deformación de composición tonalítica así como gneis anfibolítico, ortogneis y migmatitas, estas últimas en el contacto entre los intrusivos sin deformación y las rocas calcosilicatadas. Las litologías y sus relaciones de campo evidencian dos eventos metamórficos, uno regional representado por el gneis anfibolítico y el ortogneis y otro de contacto, representado por las migmatitas. La tonalita y el gneis anfibolítico fueron fechados por el método de U-Pb en zircones y arrojaron edades de 85.4 ± 0.7 Ma y 116 ± 1.5 Ma, respectivamente, indicando dos eventos magmáticos. La primera edad la interpretamos indirectamente como la edad máxima del metamorfismo de contacto, mientras que, por las relaciones de campo, la edad de 116 ± 1.5 Ma permite inferir la edad mínima del depósito e indirectamente la edad máxima del metamorfismo regional. También se obtuvieron datos termométricos de la tonalita y del gneis anfibolítico a partir del Ti en zircón, obteniendo 636 ± 33 °C y 701 ± 42 °C, respectivamente. La presencia de minerales como dióxido,

wollastonita y trazas de rutilo, indican temperaturas potencialmente mayores a 700 °C para el metamorfismo regional lo cual alcanzó facies de anfibolita. Las rocas calcosilicatadas se depositaron en la zona de transición entre la cuenca profunda y la plataforma continental, posteriormente afectadas por metamorfismo regional (<116 Ma) y un metamorfismo de contacto sobreimpreso (<85 Ma).

Palabras clave: rocas calcosilicatadas; Bloque de Los Cabos; metamorfismo; rocas metamórficas.

ABSTRACT

The La Paz Plutonic Complex is located in southern Baja California Peninsula. In this complex calc-silicate rocks are associated with other metamorphic and intrusive rocks. The focus of this research is on the calc-silicate rocks in the eastern part of the Los Cabos Block with marble, calc-silicates and amphibolitic gneiss which extend for more than two kilometers and grouped as an informal unit called El Mezquite calc-silicates. Field relationships, megascopic, and microscopic characteristics indicate that the protoliths of the metasedimentary rocks were siliciclastic rocks alternated with calcareous sediments and volcanoclastic rocks deposited in a marine environment and subsequently metamorphosed. In the Arroyo El Mezquite, outcrops of undeformed igneous rocks of tonalitic composition and amphibolitic gneisses and orthogneiss are observed, these last. The metamorphic unit is in contact with the undeformed intrusives and the calc-silicate rocks. This lithology indicates two metamorphic events, the first of regional character, represented by orthogneiss and amphibolitic gneiss and the second as contact metamorphism, represented by migmatites. Geochronology of the tonalite and the amphibolite gneiss with the U-Pb method on zircons yielded

ages of 85.44 ± 0.66 Ma and 116 ± 1.5 Ma, respectively, indicating to magmatic events. The first age indicates indirectly the maximum age for contact metamorphism, while the second allows us to infer the possible minimum age of deposition and potentially the maximum age of regional metamorphism. The data obtained from the zircons of tonalite and amphibolitic gneiss were used to estimate their emplacement temperature of 650 ± 33 °C and 701 ± 42 °C, respectively. The presence of minerals such as diopside, wollastonite and rutile traces indicate temperatures of at least >700 °C of the metamorphism. The regional metamorphism reached the amphibolite facies. The El Mezquite calc-silicate rocks were deposited in the zone between a continental platform and an oceanic basin, subsequently affected by regional metamorphism (<116 Ma) and a contact metamorphic overprint (>85 Ma).

Key words: calc-silicate rocks; Los Cabos Block; metamorphism; metamorphic rocks.

INTRODUCCIÓN

La importancia del estudio de las rocas metacarbonatadas radica en la caracterización de su ensamble mineralógico, resultante de la composición de los protolitos de estas rocas y sus condiciones metamórficas. En el “Complejo Cristalino de La Paz” (Ortega-Gutiérrez, 1982), referido posteriormente como Provincia Geológica Complejo Plutónico de La Paz (CPLP), Baja California Sur (Ortega-Gutiérrez et al., 1992) (Figura 1) afloran rocas metacarbonatadas en varias localidades (Todos Santos-El Pescadero, Bloque Los Cabos y El Potrero), las cuales han sido reportadas como calcosilicatos por Aranda-Gómez y Pérez-Venzor (1989), Pérez-Venzor (2013) Lizarraga-Lieras (2015), Camarena-Vázquez (2015). Sin embargo, a la fecha es desconocida la relación (sucesión de eventos) que existe entre ellas y las rocas adyacentes que permita deducir los posibles ambientes de depósito, los protolitos y el metamorfismo asociado.

El conocimiento actual de la Provincia Geológica Complejo Plutónico de La Paz es amplio e indica que la región está asociada a un ambiente orogénico convergente en donde existe una relación íntima entre metamorfismo-magmatismo y deformación. Sin embargo, aún faltan estudios detallados que restrinjan la edad de sedimentación de los diferentes protolitos. Aún se desconoce si existe una relación entre los eventos metamórficos, el tipo y las condiciones de metamorfismo de las localidades mencionadas (Todos Santos-El Pescadero, Bloque Los Cabos y El Potrero) a los que estuvieron sujetos los protolitos de las rocas.

En el arroyo El Mezquite (Figura 1) aflora una secuencia de rocas metacarbonatadas que se extiende más de 2 km y su estudio aporta información para compararlas con otras regiones del CPLP. Las rocas metacarbonatadas tienen características témporo-espaciales de protolitos aparentemente diferentes. Sin embargo, las rocas adyacentes o asociadas tienden a ser, en general, semejantes (paragneis, ortogneis, gneis anfibolítico y ocasionalmente migmatitas) en todas las localidades.

Lo anterior nos permite suponer que las rocas del arroyo El Mezquite reflejan una secuencia sedimentaria heterogénea con depósito de sedimentos siliciclásticos con alternancia de carbonatos y aparentemente aporte de material volcánico y vulcanosedimentario. En cada una de las localidades estudiadas, las rocas metasedimentarias, dadas sus características litológicas y las relaciones de campo, potencialmente reflejan un ambiente marino de cuenca y/o plataforma en un margen pasivo y posteriormente colisional. Por lo anterior, el área seleccionada puede aportar información relacionada a las problemáticas señaladas anteriormente y avanzar en el entendimiento

de la evolución geológica de la Provincia Geológica Complejo Plutónico de La Paz. Considerando lo anterior, el objetivo de este trabajo fue reconocer los protolitos, condiciones de metamorfismo, deformación y magmatismo asociado, así como establecer las posibles relaciones con otras regiones del CPLP reportadas en trabajos anteriores (Aranda-Gómez y Pérez-Venzor, 1989; Pérez-Venzor, 2013; Rochín-García, 2015), documentando las relaciones de campo y un estudio petrográfico detallado de las rocas metacarbonatadas que afloran en el arroyo El Mezquite.

Las rocas metacarbonatadas también han sido reportadas en otras regiones importantes del NW de México, como Islas Marías (Pompa-Mera et al., 2013 y Pompa-Mera, 2014), en Sinaloa (Henry et al., 2003), y en el complejo Yelapa-Chimo, donde han sido reportados pequeños afloramientos de mármol con minerales calcosilicados como: escapolita y diópsido (Gutiérrez-Aguilar, 2019). En ninguna de las regiones está esclarecida la edad de depósito de estas rocas, pero en todos los casos, se reporta que alcanzaron facies de anfibolitas y que son intrusadas por cuerpos batolíticos asociados a arcos magmáticos cretácicos. Por lo anterior, es importante hacer una comparación entre los metacarbonatos del CPLP (edad, protolitos y tipo de metamorfismo) con los reportados en las regiones anteriormente mencionadas. Con la finalidad de conocer la edad de las rocas adyacentes a las rocas metacarbonatadas, fueron seleccionadas una tonalita y gneis anfibolítico para fecharlas por U-Pb en zircones.

Contexto geológico regional del CPLP

En la región sur de la Península de Baja California afloran rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Los intrusivos del Bloque Los Cabos son agrupados en ensambles pre, sin y pos-tectónicos (Aranda-Gómez y Pérez-Venzor, 1989; Pérez-Venzor, 2013). Las rocas intrusivas del CPLP fueron emplazadas por lo menos en dos periodos de subducción. El primero evidenciado por la deformación penetrativa de rocas metamórficas e ígneas (foliación, lineación y pliegues). Mientras que la evidencia de un segundo evento magmático es la presencia de un metamorfismo de contacto, reflejada en las migmatitas que se encuentran en las proximidades de grandes intrusivos en la sierra La Laguna.

Las rocas metamórficas afloran en tres regiones (Sierra La Gata, Todos Santos y borde oriental del Bloque Los Cabos) y son agrupadas en complejos metamórficos (Aranda-Gómez y Pérez-Venzor, 1989; Pérez-Venzor, 2013) (Figura 1). En la región de Todos Santos-La Paz, la secuencia de rocas metamórficas consiste en una alternancia de pizarras, filitas, esquistos, mármoles, rocas calcosilicadas, milonitas, paragneis y ortogneis (Figura 2) (Aranda-Gómez y Pérez-Venzor, 1989). A nivel local, las relaciones estructurales y espacio-temporales entre ellas pueden variar; sin embargo, a nivel regional puede observarse un patrón de franjas de contactos definidos de forma paralela con orientación N-S (Figura 1) (Pérez-Venzor, 2013). Zircones detríticos de algunas unidades metamórficas en el CPLP fueron fechados por Rochín-García (2015) por el método de U-Pb. Las muestras en la localidad El Triunfo (Figura 1) dan una edad pérmica (c.a. 264 Ma) interpretadas como edad máxima de depósito, con zircones mesoproterozoicos con edades alrededor de 1.4 Ga. En la región de Todos Santos (Punta Lobos) el mismo autor fechó una unidad designada como “calcosilicatos”, de la cual reportó una edad máxima de depósito de c.a. 99 Ma con zircones detríticos de hasta 1.2 Ga. El complejo metamórfico en la región de Sierra La Gata está formado por una secuencia de paragneis, ortogneis (tonalítico y diorítico) y gneis migmatítico (Figura 2). Típico del complejo es el desarrollo de migmatitas y granitos anatéticos (Pérez-Venzor, 1993; Aranda-Gómez y Pérez-Venzor, 1995; Schaaf et al., 2000; Hiraes-Rochín, 2004; Pérez-Venzor, 2013; Rochín-García, 2015).

Conforme al código de nomenclatura estratigráfico Pérez-Venzor (2013) dividió en dos litodemas al complejo metamórfico del borde oriental del Bloque Los Cabos: uno metasedimentario (agrupado informalmente en dos unidades: Esquisto Portezuelo y Calcosilicatos El Mezquite) y otro metaígneo (denominado Ortogneis Boca de la Sierra). El Esquisto Portezuelo incluye esquisto cuarzo-feldespático, gneis migmatítico, paragneis, migmatitas y gneis anfibolítico, mientras que los calcosilicatos El Mezquite incluyen mármol, skarn, rocas calcosilicatadas y material terrígeno fino de origen volcánico. El litodema metaígneo denominado Ortogneis Boca de La Sierra está integrado por ortogneis, gneis migmatítico, augengneis, gneis anfibolítico y migmatita (Figura 2). Las edades de zircones detríticos reportadas por Rochín-García (2015) para dos paragneis de los

arroyos La Palma y El Mezquite (Figura 1) se encuentran entre 79 y 80 Ma interpretadas como edad máxima de depósito con zircones heredados de 1.0 Ga y 430 Ma respectivamente. Las rocas de protolito ígneo más antiguas en el CPLP dan edades de 160-164 Ma y afloran en diferentes regiones: Boca de La Sierra (ortogneis Boca de La Sierra), isla Espíritu Santo (augengneis Pailebot) (Díaz-López, 2019) e isla Cerralvo (ortogneis) (Montrella, 2004). El resto de rocas ígneas del Bloque Los Cabos tienen edades cretácicas (Aranda-Gómez y Pérez-Venzor, 1989; Schaaf *et al.*, 2000; Pérez-Venzor, 2013; Díaz-López, 2019).

Las rocas pre-tectónicas varían entre gabro, norita y diorita, y sus afloramientos son discontinuos (aislados) pero definen un cinturón en el flanco occidental del Bloque Los Cabos (Figura 1), desde Todos Santos hasta La Paz (Sierra el Novillo, Veladero, Valle Perdido),

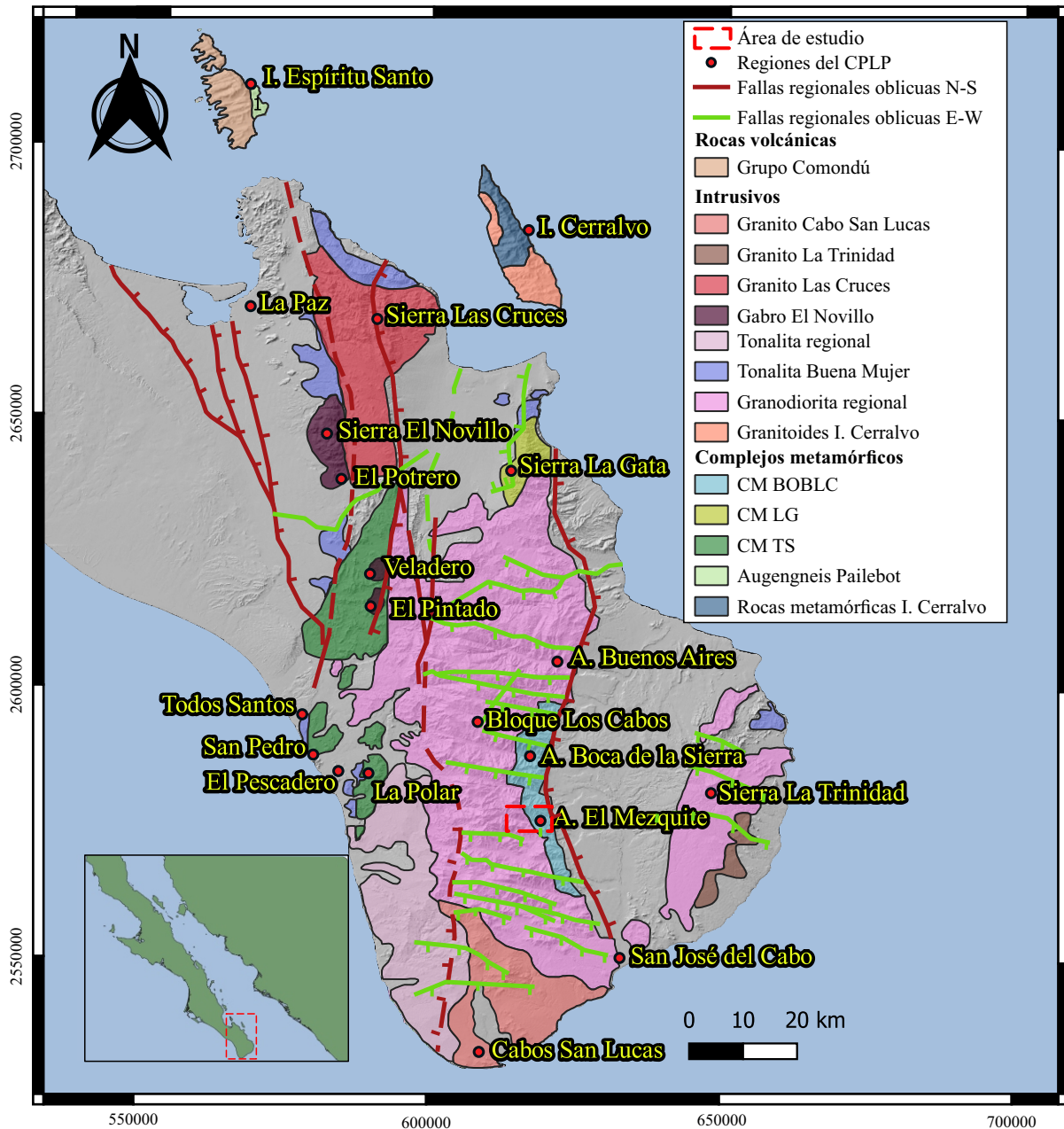


Figura 1. Ubicación del área y contexto geológico. Tomado y modificado de Pérez-Venzor (2013). CM LG (complejo metamórfico La Gata), CM TS (complejo metamórfico Todos Santos), CM BOBLC (complejo metamórfico borde oriental del Bloque Los Cabos).

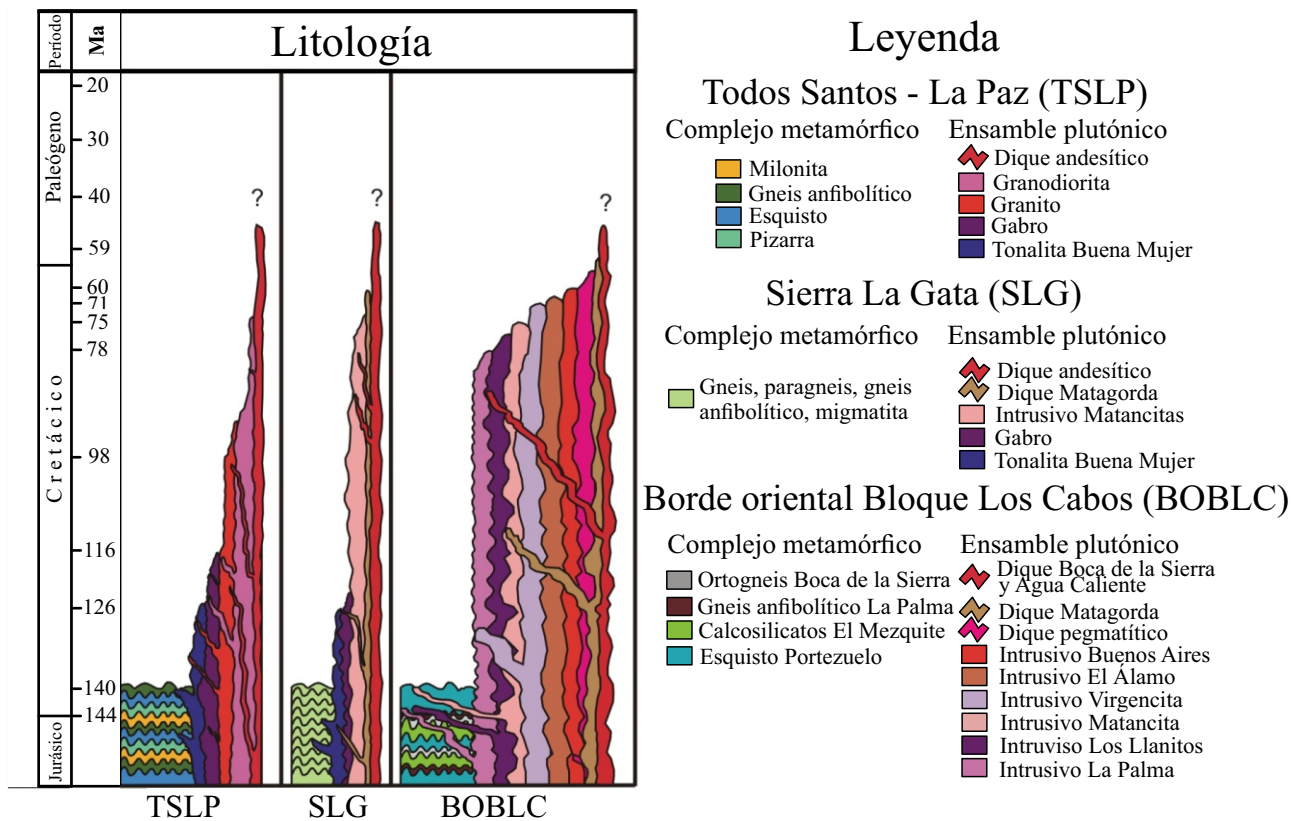


Figura 2. Columna estratigráfica simplificada del Bloque Los Cabos (tomado y modificado de Pérez-Venzor, 2013).

reportadas por Aranda-Gómez y Pérez-Venzor (1988, 1989), Schaaf *et al.* (2000) y Pérez-Venzor (2013). Las edades para estos gabros en Sierra El Novillo oscilan entre 109 y 102 Ma según el método de U-Pb en zircones (Kimbrough *et al.*, 2015). Afloramientos del ensamble plutónico sintectónico a postectónico del Bloque Los Cabos ocurren en la región de La Paz (bloque Las Cruces), la región de La Gata (Sierra La Gata) y en el bloque La Trinidad e incluyen principalmente granodiorita, tonalita con subordinados de granito, cuarzomonzonita, diorita y microdiorita. Es notable la presencia de varios sistemas de diques (tonalíticos, graníticos, pegmatíticos y diabásicos). Parte de estas unidades han sido reportadas por Aranda-Gómez y Pérez-Venzor (1988, 1989), Ramos-Velázquez (1998), Schaaf *et al.* (2000) y Pérez-Venzor (2013). Algunas rocas de estas unidades fueron fechadas por los métodos U-Pb (en zircones), Rb-Sr y Sm-Nd en minerales (biotita, hornblenda, moscovita, feldespato y granate) y roca entera (Schaaf *et al.*, 2000; Pérez-Venzor, 2013). Las edades obtenidas son de 98.8 ± 0.60 Ma para un granito anatóctico en sierra La Gata y edades entre 94 a 68 Ma en granodioritas y tonalitas para el Bloque Los Cabos y Bloque La Trinidad (Figura 1) (Pérez-Venzor, 2013; Díaz-López, 2019). En el caso de las edades obtenidas por isócrona corresponden a eventos de cristalización de los magmas y las edades obtenidas a partir de los minerales son edades de enfriamiento de los minerales.

Las rocas del CPLP muestran evidencias de una deformación dúctil a la que está sobrepuesta una frágil. La primera está restringida principalmente a los complejos metamórficos y ha sido reportada en trabajos previos (Hausback, 1984; Aranda-Gómez y Pérez-Venzor, 1988, 1989; Schürzinger, 2004; Mattern *et al.*, 2008; Pérez-Venzor, 2013). La deformación frágil o quebradiza está ampliamente distribuida en la provincia y constituida por dos sistemas de fallas. La primera es de componente normal, representado por cuatro sistemas de estructuras

regionales, todas con una dirección aproximada nor-noreste buzando hacia el este: El Carrizal, San Juan de Los Planes, San José del Cabo y los Barriles, que limitan bloques cristalinos y cuencas tectónicas (Hausback, 1984; Gaitán-Morán, 1986; Fletcher *et al.*, 1998; Ramos-Velázquez, 1998; Fletcher y Munguía, 2000; Schwennicke *et al.*, 2017). El otro sistema de fallas, denominado transversal y con dirección W-NW, segmenta al sistema montañoso central en bloques menores. Dichas estructuras desplazan al sistema de fallas San José del Cabo (Schaaf *et al.*, 2000; Fletcher *et al.*, 2003 y 2007; Pérez-Venzor, 2013).

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo y técnicas analíticas

Se muestrearon las diferentes capas de los calcosilicatos El Mezquite, que incluyen mármol puro, mármol rico en sílice, calcosilicatos y gneis anfibolítico para realizar un análisis petrográfico detallado. También se muestrearon la tonalita Matancitas y el gneis anfibolítico para realizar fechamientos por U-Pb en zircon y termometría de Ti en zircon.

Geocronología de zircon por U-Pb

La separación de zircones fue realizada en las instalaciones de los laboratorios de CICESE usando una mesa vibratoria Holman-Wilfley®, un separador magnético Frantz®, líquidos pesados (utilizando politungstato de sodio), nitrógeno líquido y un embudo de separación. Con la ayuda de un binocular se seleccionaron zircones para posteriormente montarlos con EpoFix™ en aros de plástico de 2.5 cm de diámetro y fueron subsecuentemente pulidos. La catodoluminiscencia y los fechamientos U-Pb fueron realizados en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI),

Centro de Geociencias, UNAM. El análisis de los zircones se realizó mediante la técnica de LA-ICPMS (*Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*) con un equipo de ablación láser de excimeros (ArF) que genera un haz de 193 nm de longitud de onda acoplado a un espectrómetro de masas de cuadrupolo iCAP Qc (Thermo®). El análisis consistió en 14 s de adquisición de blanco, 30 s de adquisición de señal con un haz de 23 µm de diámetro a una tasa de repetición de 5 Hz y con una densidad de energía (fluencia) que incidía sobre el cristal de ~6 J·cm⁻² y 14 s de evacuación de remanentes (*washout*). Se utilizó para la corrección de fenómenos, como fraccionamiento por profundidad y deriva instrumental, el zircón estándar 91500 (*ca.* 1065 Ma; Wiedenbeck *et al.*, 1995) y como zircón secundario el estándar *Plešovice* (*c.a.* 337 Ma; Sláma *et al.*, 2008). Mayores detalles de la metodología y de la instrumentación utilizada en el LEI está descrita en Solari *et al.* (2010) y Ortega-Obregón *et al.* (2014).

Termometría de Ti

El geotermómetro de Ti en zircón está fundamentado en la siguiente premisa: el contenido de titanio del zircón depende fuertemente de la temperatura (a mayor contenido de Ti, mayor temperatura), variando en más de tres órdenes de magnitud sobre el rango de temperatura de ~850 °C, y es relativamente inmune a los cambios de presión (Watson *et al.*, 2006). El láser está acoplado a un ICP-MS y el Ti fue detectado al mismo tiempo que las relaciones isotópicas de U y Pb. Estos valores de Ti se utilizaron para calcular la temperatura de la cristalización de los zircones del intrusivo tonalita Matancitas y del gneis anfibolítico. Para lo anterior se utilizó el método de Ferry y Watson (2007) los cuales consideran la siguiente fórmula para el cálculo de la temperatura:

$$T(^{\circ}\text{C})_{\text{zircón}} = \frac{5080 \pm 30}{(6.01 \pm 0.03) \cdot \log(\text{Ti})} - 273$$

Cabe señalar que el uso de este geotermómetro requiere que el zircón se encuentre en equilibrio con rutilo y cuarzo, de no ser así, el valor del Ti tiene que ser calibrado. Para equilibrios zircón+rutilo+cuarzo se asume a_{Ti}=1 y a_{Si}=1 (valores estandarizados de Titanio y Sílice para sistemas en equilibrio). En los magmas silicatados (sin rutilo) los valores de a_{Ti} son típicamente de 0.6–0.9. En las rocas subsaturadas en SiO₂, deben considerarse valores de a_{Si} ≥0.5. Por lo anterior se utilizó la siguiente fórmula:

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{-4800}{\log(\text{Ti}) - 5.711 + \log(0.6) - \log(0.5)} - 273$$

CARACTERÍSTICAS DE LAS ROCAS METACARBONATADAS Y UNIDADES ADYACENTES EN EL ARROYO EL MEZQUITE

Litología, relaciones de campo y estratigrafía

El nombre de rocas calcosilicatadas El Mezquite fue utilizado por Pérez-Venzor (2013) para referirse a una secuencia de mármol, mármol impuro, calcosilicatos, skarn y gneis anfibolítico que afloran en los diferentes arroyos que drenan el borde oriental del Bloque de Los Cabos (Figuras 1 y 3). En el arroyo El Mezquite, esta unidad se conforma de mármol, mármol impuro, esquisto calcosilicatado y gneis anfibolítico. Dadas las características litológicas (alternancia de capas) y espesores de estas unidades, no pueden ser cartografiadas de manera individual, por lo cual las agrupamos en una sola unidad denominada metacarbonatos El Mezquite; sin embargo, se describen de manera individual. Los afloramientos de esta unidad son reducidos sobre el cauce del arroyo por más de dos kilómetros de manera continua hasta la zona de falla San José del Cabo (Figura 3) en donde están truncadas. La unidad está en contacto con el ensamble plutónico, tanto como roca de caja o en forma de enclaves o bloques dentro del complejo plutónico. Como ya se mencionó, la característica principal de esta unidad es la presencia de una alternancia de litologías relativamente diferentes en forma de estratos de tonalidades blanco, gris claro, café a café claro, y rojo óxido/café oscuro designadas con las letras A, B, C y D, respectivamente (Figura 4). La litología de las capas blancas (A) es definida como mármol puro, la litología de las capas café-café claro (B) es un mármol rico en sílice con textura sacaroides, la litología de las capas gris claro (C) como un esquisto cuarzo-feldespático con un componente carbonatado (roca calcosilicatada) y la capa rojo óxido (D) se define como un gneis anfibolítico (Figura 4). Las capas con litología de tono blanco y rojo óxido (A y D) son las dominantes y pueden llegar a medir hasta 60 cm de espesor (Figura 4). Las bandas son fáciles de distinguir en los afloramientos debido al intemperismo. En general la textura de las rocas metacarbonatadas es granoblástica y granonematoblástica. El tamaño de los cristales es mayor en las bandas A y B (de 1 a 2 mm) que en las bandas oscuras C y D (< 0.5 mm). En las bandas A y B los cristales tienden a ser subhedrales a euhedrales, de tamaño medio a grueso, mientras que en las bandas C y D son subhedrales con tamaños de cristal de medio a fino. Estas capas varían notablemente de espesor en los distintos afloramientos; además presentan pliegues y estructuras de rosarios. La tonalidad oscura de estas capas puede volverse más oscura por el intemperismo.

Las rocas metacarbonatadas presentan estructuras asociadas con un ambiente de deformación tanto dúctil (foliación, pliegues, rosarios

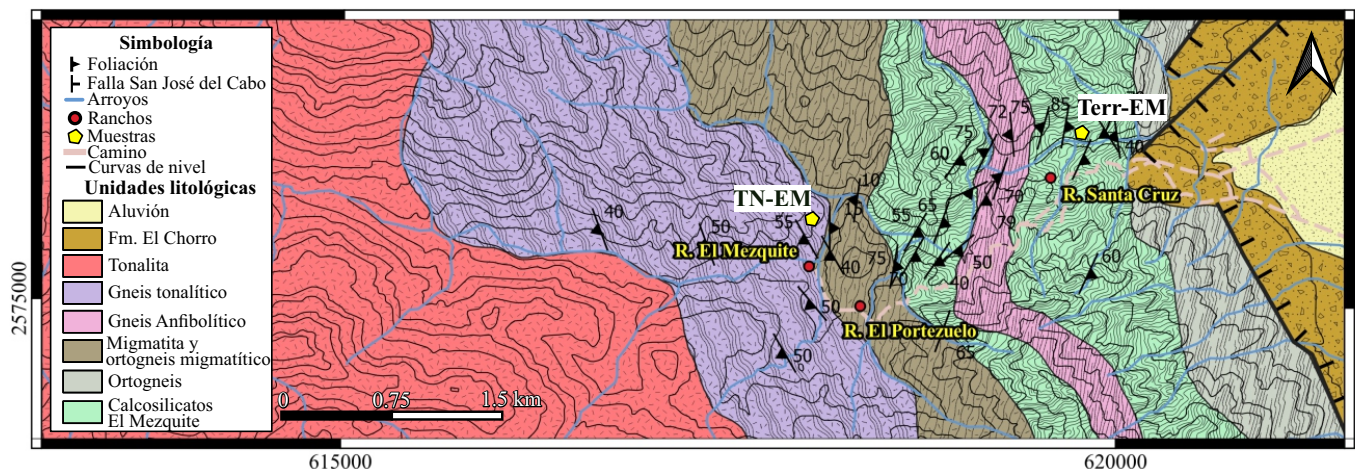


Figura 3. Mapa geológico del arroyo El Mezquite.

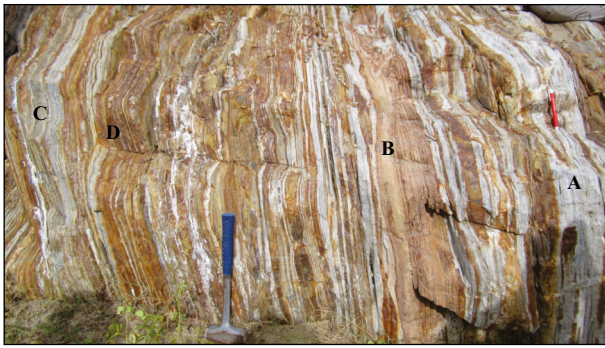


Figura 4. Afloramiento de metacarbonatos. Se observa la alternancia típica de capas de los metacarbonatos El Mezquite. Mármol puro (A), mármol impuro (B), esquistos calcosilicatados (C) y gneis anfibolítico (D). Coordenadas UTM 618583E - 2575507N.

y sigmas), como quebradiza (fallas y fracturas). La foliación exhibe un patrón relativamente homogéneo con dirección norte-noreste a lo largo del arroyo El Mezquite, pero con un cambio en echado de aproximadamente 180°. Los pliegues y micropliegues tienden a ser más diversos en geometría y tamaño conforme se acerca al contacto con el intrusivo y la foliación es más difusa; por el contrario, al alejarse del contacto, los pliegues son menos abundantes y la foliación está más desarrollada. Los tipos de pliegue son: simétricos, asimétricos, armónicos, disarmónicos, tumbados, abiertos, cerrados, simples, de caja y *chevrón* (Figura 5) pero no es observable un claro patrón en su desarrollo, consideramos que esa diversidad es reflejo de la heterogeneidad litológica de la roca (reología). Las estructuras de rosario muestran diferentes etapas de desarrollo, desde incipiente hasta bien desarrolladas (Figura 5), indicando un esfuerzo extensional. En el primer caso, los rosarios están caracterizados por ser tabulares, angulosos, separados por fracturas y sin evidencias de estrangulamiento, mientras que, en las estructuras de rosario desarrolladas, la separación entre los rosarios es evidente y mayor, tienden a ser redondeados y llegan a presentar colas de arrastre. Tanto en las migmatitas como en las rocas metacarbonatadas las estructuras de rosario llegan a desarrollar pliegues. Dichas estructuras tienen longitudes de hasta un metro (Figura 5). Los afloramientos de la unidad de metacarbonatos El Mezquite alternan con franjas de ortogneis anfibolítico y con migmatitas de protolitos ígneos y sedimentarios. La unidad está intrusiva por diques de composición granítica (anatócticos), diques diabásicos y pequeñas apófisis de tonalita.

El contacto del ortogneis anfibolítico con las rocas metacarbonatadas es recto pero concordante a las capas de los metacarbonatos El Mezquite (Figura 6). En el contacto con la migmatita pueden observarse porfiroblastos de granate mayores de 2 cm con un halo de empobrecimiento de minerales máficos (micas y hornblenda) y enriquecimiento de minerales félsicos (plagioclasa). Xenolitos de rocas metacarbonatadas y de gneis anfibolítico fueron observados tanto en la tonalita como en las migmatitas (Figura 7) en el contacto entre ensamble plutónico y las rocas metamórficas, al occidente del arroyo El Mezquite, así como en otros arroyos del borde oriental del Bloque Los Cabos (BLC). El tamaño de los xenolitos de rocas calcosilicatadas, en general, es de 15 a 20 cm de eje mayor, pero ocasionalmente llegan a presentarse hasta 30 cm de longitud (Figura 7). La mineralogía de los xenolitos de las rocas metacarbonatadas consiste en una paragénesis de cuarzo+epidota+granate y la del gneis anfibolítico en plagioclasa+hornblenda+biotita; sin embargo, en sus bordes existen zonas de empobrecimiento con desarrollo de minerales de grano grueso, principalmente de anfíboles y granates. La orientación de los

xenolitos tiende a ser paralela a la foliación y al flujo magmático de la roca intrusiva que los contiene. Las relaciones de campo indican que la unidad más antigua corresponde a la secuencia metasedimentaria representada por las rocas metacarbonatadas y el gneis anfibolítico, seguido del ortogneis y posteriormente ortogneis anfibolítico, por último, está la tonalita y la migmatita que están intrusivos por diques graníticos y diabásicos.

La deformación frágil observada es principalmente de orientación este-oeste a nivel regional, localmente es posible observar microfallas, algunas de ellas presentan relleno de epidota. Fue posible reconocer tres tendencias principales, una aproximadamente de N10°W con 85°SW, la segunda tendencia define una orientación N30°E con 35°SE y una última casi este-oeste con desplazamiento oblicuo a normal. La foliación de las rocas metamórficas parece ser paralela a la falla principal (N-S) y posiblemente controlaron el desarrollo y orientación de algunas de las fallas observadas, principalmente en la zona de falla San José del Cabo (Pérez-Venzor, 2013) en donde indicadores cinemáticos trazan movimientos normales u oblicuos.

Petrografía

La asociación mineralógica reconocida del mármol o la capa A (Figuras 4 y 8) está compuesta por calcita ± diópsido ± forsterita ± wollastonita ± rutilo, mientras que las paragénesis reconocidas son calcita + diópsido, calcita + olivino y calcita + diópsido + wollastonita. En esta litología es posible observar que ocasionalmente la wollastonita presenta un hábito acicular y llega a medir hasta 3 cm con diópsido asociado. La textura de la capa A es gnéssica, en la cual la segregación de minerales forma láminas y/o bandas de calcita con pocos cristales de diópsido y láminas y/o bandas de diópsido (Figura 8). La asociación calcita ± diópsido ± forsterita ± wollastonita ± rutilo corresponde a la litología de mármol impuro o capa B (Figura 8). Las paragénesis reconocidas son: diópsido + forsterita, calcita + diópsido, calcita + forsterita y calcita + wollastonita + diópsido y la calcita es la más abundante con grano medio a grueso asociado al grafito mientras que el diópsido comúnmente es de grano fino, la capa B tiene una textura granoblástica (Figura 8). La asociación mineralógica reconocida en la capa C está constituida por plagioclasa ± piroxeno ± cuarzo ± biotita y fue descrita aquí como un esquistos calcosilicatado. Las paragénesis de la capa C son: cuarzo + biotita, cuarzo + piroxeno y plagioclasa + piroxeno. En esta capa es posible observar un microbandeamiento (textura gnéssica) en el cual tienden a asociarse minerales cuarzo-feldespáticos, calcosilicatados y una zona de transición. En la litología del gneis anfibolítico o capa de color rojo oscuro (capa D) (Figura 8), la asociación mineralógica reconocida está compuesta por plagioclasa ± hornblenda ± biotita ± cuarzo ± minerales opacos. Las paragénesis reconocidas son: hornblenda + plagioclasa, biotita + plagioclasa, biotita + cuarzo, plagioclasa + cuarzo. La textura es grano-lepidoblástica de grano medio a fino. El espesor de las capas varía desde láminas (pocos milímetros) hasta capas (15 cm aproximadamente) con un dominio de las últimas. Adicionalmente, se realizó un estudio petrográfico del gneis anfibolítico que está en contacto con la unidad calcosilicatada El Mezquite a manera de *sill* (Figura 6). La asociación mineralógica de esta unidad está conformada por plagioclasa + hornblenda + piroxeno y tiene texturas relicteas ígneas (Figura 8e).

Geocronología U-Pb en zircones y termometría de Ti en zircones

Para las edades $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ y $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ obtenidas de los zircones de la tonalita Matancitas y del gneis anfibolítico, se utilizó como criterio descartar aquellos zircones que tienen una discordancia mayor a 15%. El cálculo de la edad de concordia y media ponderada fue a partir de los zircones más concordantes, utilizando la versión en línea de IsoplotR (Vermeesch, 2018); además fueron elaborados los

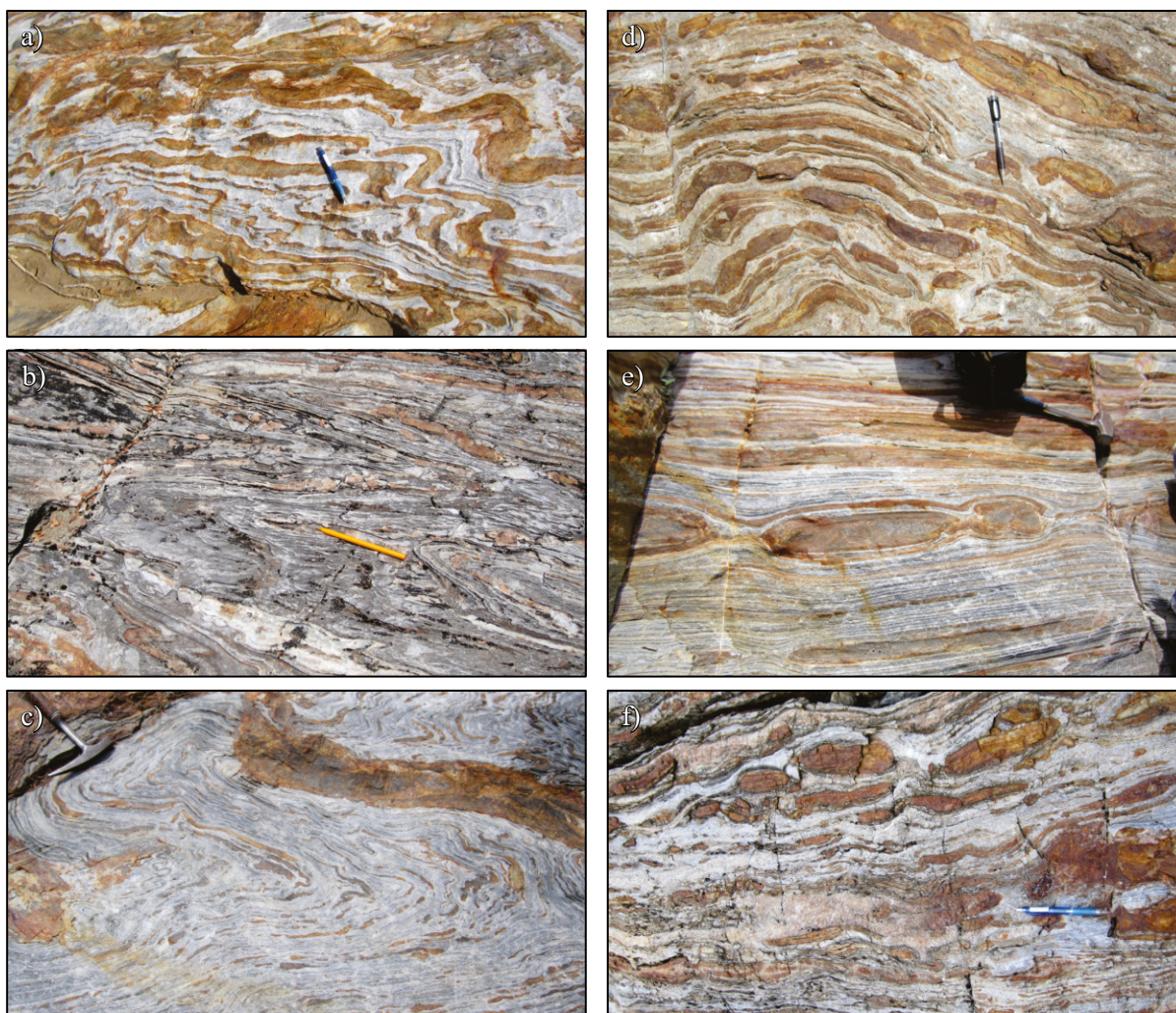


Figura 5. Evidencia de la deformación en la unidad de metacarbonatos El Mezquite. La amplia variedad de pliegues registrada en la unidad presenta pliegues armónicos (a), *chevrón* (b) disarmónicos (c). La amplitud de onda, el espesor de los pliegues y el tipo varían durante los 2 km de afloramiento. En d), e) y f) se observan diferentes tipos de estructuras de rosario en sus diferentes estadios, incipiente (apenas desarrollados, d) hasta completamente estrangulados (d y e). Coordenadas UTM 619233E – 2575922N.

diagramas de concordia de *Wetherill*. Se analizaron 30 zircones para la tonalita y 49 para el gneis anfibolítico, los resultados de los análisis isotópicos están contenidos en el Material Suplemento. La muestra TN-EM (tonalita) contiene zircones prismáticos alargados con una relación largo:ancho de 4:1 y en su mayoría con ambas pirámides bien desarrolladas. En las imágenes de catodoluminiscencia, no se observaron núcleos que supusieran herencias y en general tienen una catodoluminiscencia homogénea. Los análisis se realizaron en las zonas cercanas al borde, aunque se escogieron algunos núcleos, resultando en edades similares. También fue posible observar zonas del zircón con posibles inclusiones de apatito que fueron descartadas. Por otro lado, la muestra Terr-EM (gneis anfibolítico) contiene zircones de prismas cortos con una relación largo:ancho de 2:1. En su mayoría presentan formas euhedrales, aunque algunas son también subhedrales. Bajo catodoluminiscencia se observaron, en algunos cristales, aparentes núcleos heredados, aunque básicamente todos los datos resultaron similares. De igual forma, la catodoluminiscencia permitió descartar zonas de posibles inclusiones de apatitos. La ocurrencia de bordes que pudieran representar recristalización asociada a metamorfismo no es evidente en estas muestras. En la tonalita Matancitas (TN-EM) la edad

de concordia obtenida es de 85.7 ± 0.5 Ma y una edad ponderada de 85.7 ± 0.8 Ma (Figura 9), mientras que para el gneis anfibolítico (Terr-EM) la edad de concordia es 116.2 ± 0.9 Ma y una edad ponderada de 116.2 ± 1.8 Ma (Figura 9). En este trabajo consideramos que la edad

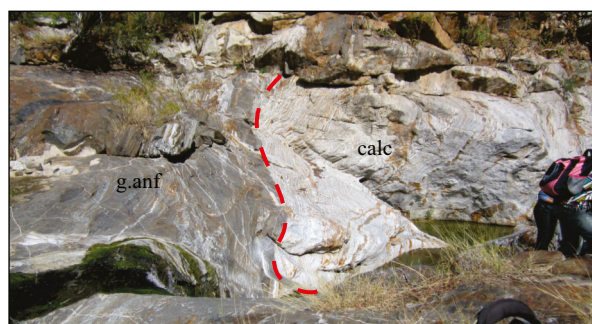


Figura 6. Contacto entre las unidades calcosilicatadas (cal) y gneis anfibolítico (g.anf). UTM 619357E – 2575934N.

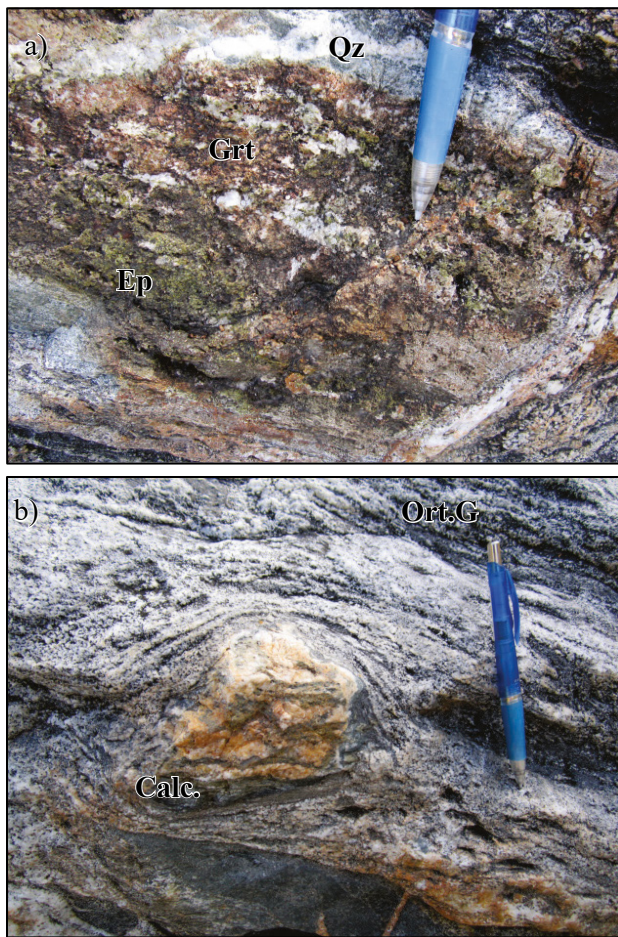


Figura 7. a) Xenolito de la unidad metacarbonatos El Mezquite dentro del intrusivo tonalítico. Se observa una paragénesis granate (Grt) + cuarzo (Qz) + epidota (Ep), que evidencia un metamorfismo retrogrado. b) Xenolito de roca calcosilicatada contenido en la unidad de ortogneis Boca de la Sierra. Ort.G (ortogneis), Calc (calcosilicatos). Coordenadas UTM 618028E - 2575247N. Significado

de concordia es la mejor, dado que el valor de MSWD (*Mean Square Weighted Deviates*) es próximo a 1, lo que estadísticamente supone que la edad se ajusta a una distribución normal.

Termometría de las rocas analizadas

Para la tonalita Matancitas fueron realizados 25 cálculos mediante el termómetro Ti en zircón y se obtuvo un promedio de 636 ± 33 °C, lo que supone la temperatura de la cristalización de los zircones en la muestra, la incertidumbre se calculó a partir de la desviación estándar de la muestra. Para el gneis anfibolítico fueron realizados un total de 49 cálculos con el termómetro de Ti en zircón, obteniendo una temperatura de 701 ± 42 °C. Los resultados de los análisis geotermométricos se muestran en la Tabla 1, en donde también están los datos obtenidos para un caso teórico ideal (equilibrio entre zircón-cuarzo-rutilo).

INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Protolitos de las rocas metamórficas

De acuerdo con las características de campo (alternancias de materiales carbonatados, terrígenos y de afinidad ígnea) y con las

petrográficas (textura y mineralogía) de las rocas calcosilicatadas que afloran en el arroyo El Mezquite, sus protolitos corresponden a una sucesión sedimentaria conformada por carbonatos puros e impuros (suficiente para formar silicatos ricos en calcio y/o magnesio), alternando con material máfico de origen volcánico (gneis anfibolítico) y rocas terrígenas cuarzo-feldespáticas con cantidades variables de arcilla. Esto dió origen a las diferentes láminas y capas presentes en la unidad. Los protolitos de las rocas metaígneas (gneis anfibolítico) representan una fase magmática posterior a las rocas sedimentarias. Por sus relaciones de campo (contactos concordantes) y estructuras (cuerpos tabulares) se sugiere que corresponden a un magmatismo máfico que fue emplazado como *sills*. Estos *sills*, junto con los metasedimentos, posteriormente fueron metamorfizados dando como resultado las rocas metacarbonatadas y el gneis anfibolítico (de protolito ígneo). La evidencia para diferenciar entre los dos protolitos de los gneises anfibolíticos es la asociación mineralógica; la conformada por hornblenda + cuarzo + biotita + plagioclasa (Figura 8d) corresponde al gneis que está alternando con las capas carbonatadas, interpretado como protolito volcánico, mientras que la conformada por plagioclasa + hornblenda + biotita (Figura 8e), así como por las texturas relictas ígneas, corresponde al protolito ígneo intrusivo (Figura 8e).

Las relaciones de campo (exocontactos, contactos y endocontactos), así como la edad obtenida para el gneis anfibolítico ($116 \text{ Ma} \pm 1.5 \text{ Ma}$) y para otras localidades en el CPLP con edades entre los 130 y 115 Ma para las rocas pre-tectónicas o gabroicas, permiten estimar que los depósitos sedimentarios precursores de las rocas metamórficas son de una edad anterior a los 116 Ma. Sin embargo, las relaciones de campo, tales como la presencia de xenolitos de los metacarbonatos y del gneis anfibolítico en el ortogneis de Boca de la Sierra, fechado en $164 \pm 0.6 \text{ Ma}$ (Díaz-López, 2019), indican que la edad mínima corresponde al Jurásico Medio para los metasedimentos (Figura 10). Lo anterior concuerda con lo reportado por otros investigadores (Pérez-Venzor, 2013; Rochín-García, 2015; Díaz López, 2019) para los metasedimentos de los otros complejos metamórficos del CPLP (Todos Santos y La Gata). La litología observada en las rocas metacarbonatadas (Figura 4), indica que éstas fueron parte de una sucesión sedimentaria conformada por carbonatos y sedimentos siliciclásticos en un ambiente de cuenca sedimentaria marina. Esta interpretación coincide con lo propuesto anteriormente por Aranda-Gómez y Pérez-Venzor (1988) para la región de Todos Santos y para el borde oriental del Bloque Los Cabos por Pérez-Venzor (2013) (Figura 1).

Metamorfismo, Deformación y Magmatismo

Las características de metamorfismo y la deformación (Figura 5) asociadas a las rocas metacarbonatadas estudiadas, indican que el área fue sometida a un metamorfismo regional que alcanzó la facies de anfibolita y dió como productos a mármoles, esquistos y gneises. El estudio geotermobarométrico realizado por Schürzinger (2004) en granate en metapelitas en Boca de La Sierra, estimó en su núcleo 630 °C y en el borde 570 °C de temperatura, y presiones en su núcleo de 0.221 Gpa y 0.259 Gpa, estas condiciones son extrapoladas por el mismo autor a todo el CPLP estimando un metamorfismo regional de presión baja (series de facies de Buchan). Dada la cercanía con el arroyo El Mezquite y la semejanza litológica, estas condiciones pueden ser extrapoladas a las rocas metamórficas del arroyo El Mezquite. Por las evidencias de campo podemos asociar a estas rocas a dos eventos metamórficos, uno regional y otro de contacto. El metamorfismo regional, es posterior a 116 Ma y el de contacto posterior a los 85 Ma, este último evidenciado por la presencia de migmatitas y porfidoblastos de granate, hornblenda y wollastonita en el contacto entre lo intrusivo y las rocas metamórficas del área. Estos eventos metamórficos han sido asociados a subducción (Pérez-Venzor, 2013; Rochín-García, 2015). En el borde oriental del

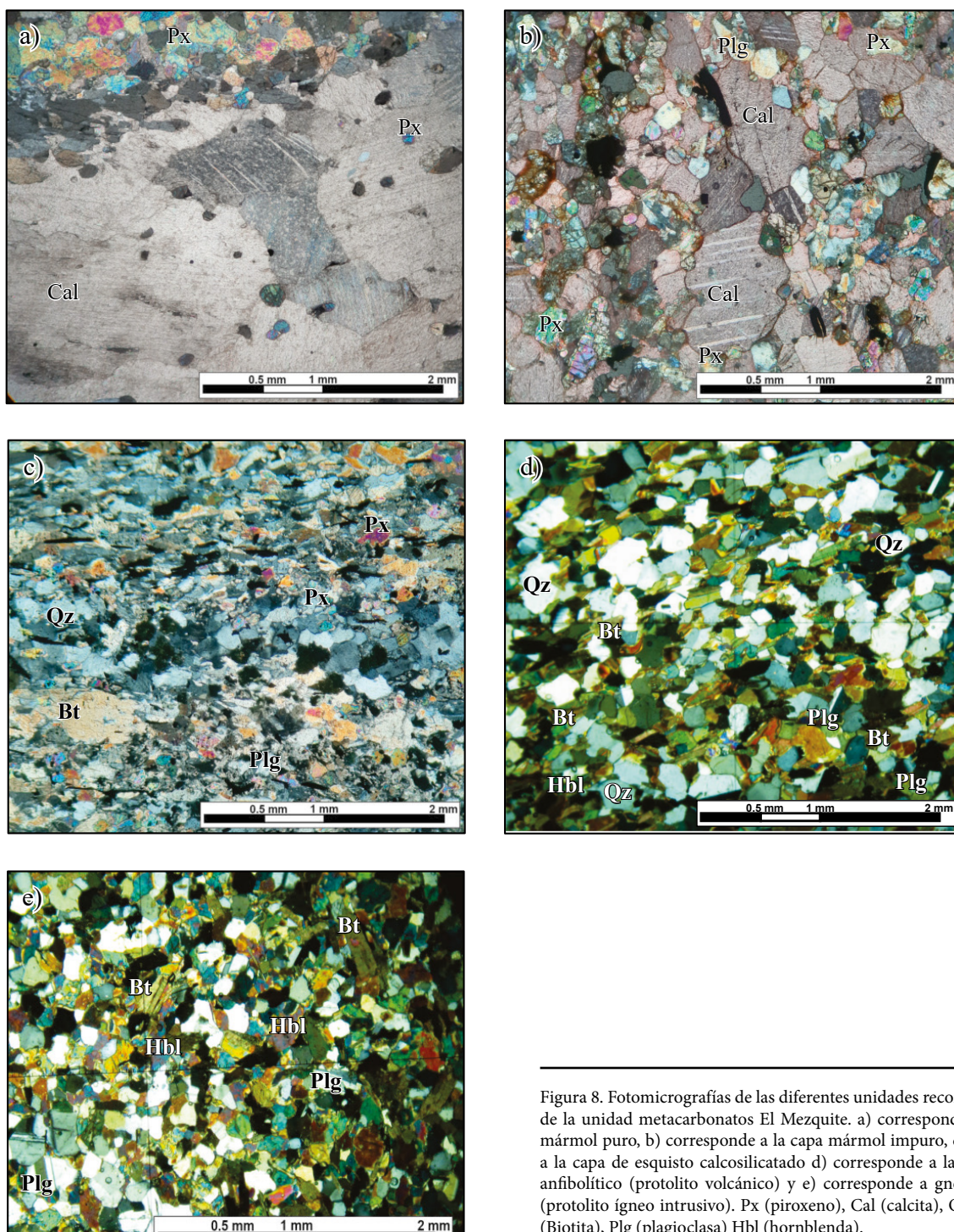


Figura 8. Fotomicrografías de las diferentes unidades reconocidas dentro de la unidad metacarbonatos El Mezquite. a) corresponde a la capa de mármol puro, b) corresponde a la capa mármol impuro, c) corresponde a la capa de esquistos calcosilicatado d) corresponde a la capa de gneis anfibolítico (protolito volcánico) y e) corresponde a gneis anfibolítico (protolito ígneo intrusivo). Px (piroxeno), Cal (calcita), Qz (cuarzo), Bt (Biotita), Plg (plagioclasa) Hbl (hornblenda).

Bloque Los Cabos, a la altura de la presa San Lázaro, fue fechada una migmatita por el método de Ar-Ar en biotita, la edad reportada es de 75.07 ± 1.28 Ma (Pérez-Venzor, 2013), esto fue interpretado como un reinicio del sistema isotópico en la biotita, resultado del metamorfismo de contacto en todo el complejo metamórfico. Adicionalmente, la presencia de los xenolitos con una paragénesis epidota + granate + cuarzo dentro de la tonalita y la unidad de ortogneis, se interpreta como la evidencia de un metamorfismo retrogrado (Figura 7).

Recientemente, fechamientos en zircones por U-Pb en el ortogneis que aflora en Boca de la Sierra (también presente en el arroyo El Mezquite) e isla Espíritu Santo, dan edades de 161 ± 0.1 y 164 ± 0.6 Ma (Díaz-López, 2019), indicando un magmatismo que es anterior a los dos eventos reportados. Esto permite concluir que en el área y en la región de CPLP hay evidencias de tres eventos magmáticos posiblemente relacionados con los sistemas de arcos magmáticos jurásicos y cretácicos del occidente de México (p.ej., Valencia *et al.*, 2013; Sarmiento-Villagrana *et al.*, 2016; Schaaf *et al.*, 2020; Contreras-López *et al.*, 2021).

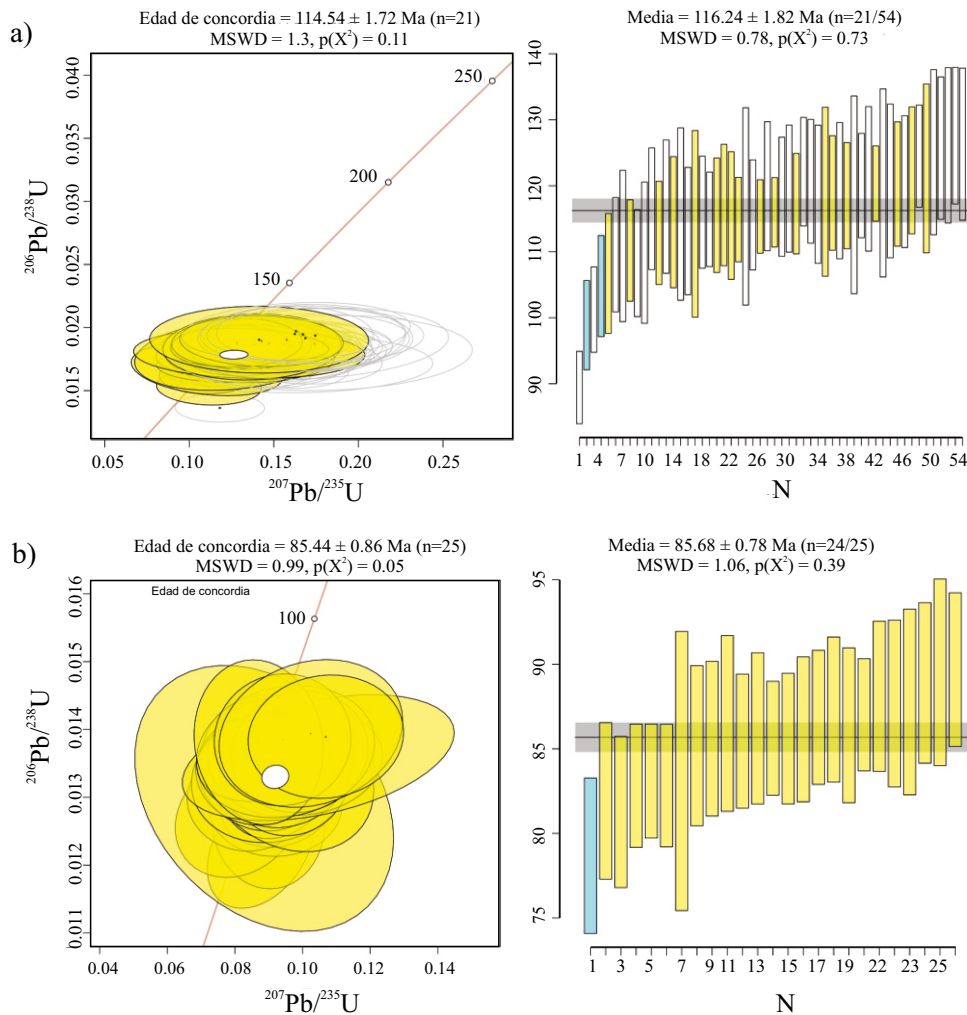


Figura 9. Edades U/Pb de concordia para la tonalita Matancitas (a) y gneis anfibolítico (b) en el área de estudio. Elaborado en Isoplot-R.

En el área de estudio fue posible reconocer dos eventos de deformación. Al primero, evidenciado por pliegues, estructuras de rosario y zonas de cizalla, lo asociamos a una deformación en condiciones dúctiles que ha sido reportada para el BLC por Mattern *et al.* (2008). El segundo evento de deformación en condiciones frágiles es sobrepuesto a la deformación dúctil. Esta deformación está asociada a la Provincia Extensional del Golfo durante el Oligoceno tardío (Ferrari *et al.*, 2018). Las características estructurales observadas (diferente estilo de pliegues y estructuras de extensión y cizalla) reflejan la reología y heterogeneidad de la unidad de metacarbonatos, así como la distribución en espacio y tiempo de las unidades estudiadas. Lo anterior es típico de cinturones orogénicos (Tobisch y Paterson, 1988).

Geocronología U-Pb y termometría de Ti en zircones

A nivel regional, los fechamientos de los zircones en los metasedimentos en la región occidental (El Triunfo) por U-Pb se interpretan como edades máximas de depósito y son más antiguas que las rocas ígneas reportadas actualmente para el borde oriental. Esto implica, aparentemente, dos eventos diferentes, pero por las relaciones de campo y las características, es factible que sea una misma cuenca con diferentes fuentes de aporte en tiempos diferentes. Lo más antiguo relacionado al continente mexicano y lo más joven relacionado a un arco oceánico que migró hacia el continente deformándose, actualmente representado por gabros 109 ± 2.3 y 102.3 ± 2.9 Ma (Pérez-Venzor, 2013 y Rochín-

García, 2015) y gneis anfibolítico ($116 \text{ Ma} \pm 1.5 \text{ Ma}$ en este estudio), todas estas unidades deformadas, por lo que consideramos que la acreción al continente se dió en un periodo entre los 116 y 100 Ma.

Los cálculos de termometría de los zircones analizados en las unidades tonalita Matancitas y el gneis anfibolítico dan temperaturas de $650 \text{ }^\circ\text{C}$ y $713 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente (Tabla 1). Esta diferencia se puede explicar porque son magmas de diferentes composiciones, la primera es intermedia y la segunda intrusión es máfica. Lo anterior concuerda con los experimentos reportados por Watson *et al.* (2006) y Ferry y Watson (2007). Para los granitoides del Bloque la Trinidad (BLT) Díaz-López (2019) sugiere que dichas rocas abarcan un rango de temperatura entre ~ 680 a $740 \text{ }^\circ\text{C}$. El mismo autor considera que los intrusivos se pueden clasificar, en función de la presión, en dos grupos:

Tabla 1. Resultados obtenidos de la termometría de Ti en zircon.

Muestra	Sin calibración de Ti		Con calibración de Ti	
	Temperatura (°C)	Desviación estándar (°C)	Temperatura (°C)	Desviación estándar (°C)
TN-EM (Tonalita)	650	34	636	33
(Terr-EM) Gneis anfibolítico	717	42	701	42

uno de 3.1 ± 0.5 kbar (7-9.5 km de profundidad), para los sienogranitos y pórfidos dacíticos, y el segundo de $\sim 3.5 \pm 0.5$ kbar (8-11 km de profundidad), para las granodioritas. Las temperaturas obtenidas por Díaz-López (2019) en intrusivos del BLT son similares a las obtenidas en los intrusivos de este estudio, además, dada la proximidad en espacio/tiempo entre estas rocas, consideramos que las condiciones (presión, temperatura y profundidad) son similares para las rocas del área. Resultados semejantes han sido reportados recientemente por Gutiérrez-Aguilar (2019) para el Batolito de Puerto Vallarta (BPV), con rangos de temperatura entre 657 y 670 °C y presiones ligeramente mayores de 4.3-4.5 kbar y por Vite-Sánchez (2019) para el área de Punta Mita, con temperaturas de 625-722 °C y presiones de 3.5-3.9 kbar, esto equivale aproximadamente a una profundidad entre 12 y 15 km. La diferencia entre las presiones y temperaturas de estos batolitos refleja la profundidad a la que se emplazaron, para el caso del BPV corresponde aproximadamente a 15 km, mientras que para el de Punta Mita puede estar asociado a 12 km (Eliasson *et al.*, 2003). Por lo anterior, consideramos que las condiciones de emplazamiento de los diversos bloques (BLC, BLT y BPV) fueron similares.

Relación de las rocas metacarbonatadas con el CPLP y la geología regional del noroeste de México

Las características de las rocas metacarbonatadas y las rocas adyacentes del borde oriental del Bloque Los Cabos, estudiadas en el arroyo El Mezquite, corresponden a protolitos carbonatados alternando con material silicilástico que pueden estar asociados a un ambiente transicional de plataforma/cuenca o de plataforma a litoral. Esto coincide con lo reportado a un nivel regional, donde Todos Santos representa un ambiente profundo con incidencia turbidítica (protolitos pelíticos, cuarzo-feldespáticos, carbonatados e ígneos) sobre la corteza oceánica. Por otro lado, en la región de la Sierra La Gata el ambiente de depósito es principalmente somero en la transición de océano-continente (protolitos terrígenos, cuarzo-feldespáticos metasedimentarios y metaígneos) y, para el borde oriental del Bloque Los Cabos, se considera un ambiente de plataforma continental

(protolitos terrígenos, metaígneos, volcánicos y carbonatados) (Pérez-Venzor, 2013). Las rocas metamórficas del área de estudio representan parte de la cuenca sedimentaria que se desarrolló antes y durante los sistemas magmáticos que después fueron metamorizados y posiblemente acrecionados al continente. En lo que respecta al magmatismo, se considera que el de composición máfica (gabros, dioritas, tonalitas y protolitos del gneis anfibolítico) con una edad de entre 116 a 129 Ma (Kimbrough *et al.*, 2015) representa un magmatismo asociado al arco magmático oceánico Cretácico, mientras que el magmatismo félsico (Bloque Los Cabos) de 85 a 58 Ma está relacionado al desarrollo de un arco magmático cretácico en el borde de un margen activo continental (en el límite de dos dominios geológicos, marino y continental).

CONCLUSIONES

Las rocas de afinidad carbonatada que afloran en el borde oriental del BLC en el CPLP fueron agrupadas con el nombre de rocas metacarbonatadas El Mezquite. En el arroyo el Mezquite la unidad aflora de manera continua por más de dos kilómetros hasta la zona de falla San José del Cabo. La unidad incluye mármol, mármol impuro, rocas metacarbonatadas y gneis anfibolítico. Los protolitos de las rocas metacarbonatadas en el arroyo El Mezquite, por sus características de campo megascópicas y microscópicas, corresponden a una secuencia sedimentaria conformada por carbonatos que varían de puros a impuros, alternando con material volcánico y rocas terrígenas cuarzo-feldespáticas con cantidades variables de arcilla y rocas calcáreas dolomíticas, lo cual fue suficiente para formar silicatos ricos en calcio y/o magnesio (forsterita y dióxido) así como minerales carbonatados. Las rocas metacarbonatadas alternan con franjas de ortogneis y gneis anfibolítico. El contacto entre las franjas es tajante pero concordante, que, junto con las características documentadas en campo y sección delgada, implica la presencia inicial de material ígneo, actualmente metamorizado en facies de anfibolitas. Consideramos que

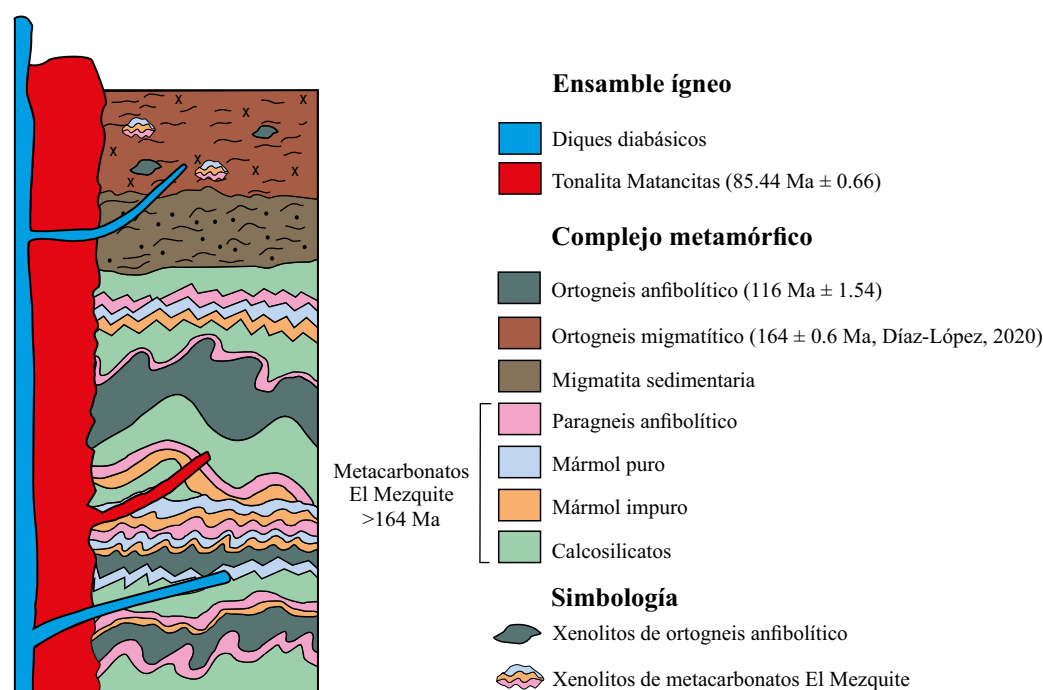


Figura 10. Columna litoestratigráfica esquemática de las unidades observadas en el arroyo El Mezquite.

el magmatismo y el metamorfismo regional en el arroyo El Mezquite están asociados a un proceso de subducción, en donde la edad del magmatismo de 85 Ma y de composición félsica, corresponde al Bloque Los Cabos y fue el que propició el metamorfismo de contacto que está evidenciado por las migmatitas. Teniendo en consideración que la edad del gneis anfibolítico es de 116 ± 1.5 Ma, inferimos que el evento metamórfico regional es posterior a esta fecha, pero previo a 85 Ma. Las condiciones de presión y temperatura para el emplazamiento de la tonalita estimadas son de $\sim 3.5 \pm 0.5$ kbar (8-11 km de profundidad) y 650 °C. La diversidad de estructuras (foliación, plegamiento, zonas de cizalla, estructuras de rosario) refleja la reología y la heterogeneidad de las rocas, así como su respuesta a los procesos de deformación a los que fueron sometidas (dúctil). Las características megascópicas y microscópicas de las rocas metacarbonatadas del Bloque de Los Cabos, aportan información del ambiente de depósito y su evolución posterior, así como su relación con el Complejo Plutónico de La Paz. En el caso del CPLP, los rasgos geológicos y la distribución de las rocas metamórficas y los del arroyo El Mezquite apoyan la presencia de una sola cuenca en un margen convergente, pero con diferentes ambientes de depósito, donde los protolitos de las rocas metasedimentarias fueron depositados previo a los 116 Ma y afectados posteriormente por un metamorfismo regional en facies de anfibolitas y después un metamorfismo de contacto.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

Los resultados de los cálculos termométricos de Ti y los análisis isotópicos U/Pb en zircón se pueden descargar desde la vista previa de este artículo en el portal web de la Revista <www.rmccg.unam.mx.>.

AGRADECIMIENTOS

Los análisis geocronológicos fueron financiados por el proyecto Evolución y relaciones tectónicas entre los sistemas arcos magmáticos Alisitos y Guerrero: evaluación, estratigrafía, petrografía y geofísica con clave CF-MG-2019004145959978-51483 (proyecto grupal CICESE-UABCS-UNAM-UNISON) CONACYT. Al técnico del Laboratorio de Petrología de la UABCS, Efraín Pérez quien estuvo a cargo de la elaboración de las láminas delgadas para petrografía. A los estudiantes de la carrera de geología que acompañaron en el trabajo de campo. Los autores agradecen los comentarios de los Dres. Luca Ferrari, Roberto Maldonado, Luigi Solari, René González Guzmán, que contribuyeron a mejorar sustancialmente el manuscrito original.

REFERENCIAS

- Aranda-Gómez, J.J., Pérez-Venzor, J.A., 1988, Estudio Geológico de Punta Coyotes Baja California Sur: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 7(1), 1-21.
- Aranda-Gómez, J.J., Pérez-Venzor, J.A., 1989, Estratigrafía del Complejo Cristalino de la región de Todos Santos, Estado de Baja California Sur: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 8(2), 149-170.
- Aranda-Gómez, J.J., Pérez-Venzor, J.A., 1995, Excursión geológica al Complejo migmatítico de la Sierra de La Gata, B. C. S., en III Reunión Internacional sobre la Geología de la Península de Baja California: La Paz, B.C.S., Sociedad Geológica Peninsular en la Universidad Autónoma de Baja California Sur, del 17 al 21 de abril, libretto guía, 27 pp.
- Camarena-Vázquez J.G., 2015, Cartografía escala 1:10,000, características megascópicas y microscópicas de las rocas que afloran en el arroyo El Mezquite, Baja California Sur, México y su relación con la geología regional: La Paz, Baja California Sur, México Universidad Autónoma de Baja California Sur, tesis de licenciatura, 98 pp.
- Díaz-López, L.F., 2019, Magmatismo del sector oriental del complejo plutónico de la paz, Baja California Sur, México: perspectiva a partir de datos petrológicos, geoquímicos, isotópicos y geocronológicos: Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Coordinación General de Estudios de Posgrado, tesis de maestría, 142pp.
- Eliasson, T., Ahlin, S., Petersson, J., 2003, Emplacement mechanism and thermobarometry of the Sveconorwegian Bohus granite, SW Sweden: GFF, 125(3), 113-130.
- 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.
- Ferry, J.M., Watson, E.B., 2007, New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers: Contributions to Mineralogy and Petrology, 154(4), 429-437.
- Fletcher, J.M., Foster, D., Kohn, B., Ramos-Velazquez, E., 1998, Differential cooling and uplift of the crystalline basement in the La Paz-Los Cabos region, Baja California Sur, Mexico: Geological Society of America Abstracts with Programs, 30(5), 14-14.
- Fletcher, J.M., Munguía, L., 2000, Active continental rifting in southern Baja California, México; implications for plate motion partitioning and the transition to seafloor spreading in the Gulf of California: Tectonics, 19(6), 1107-1123.
- Fletcher, J.M., Pérez-Venzor, J.A., González-Barba, G., Aranda-Gomez, J.J., 2003, Ridge-trench interactions and the ongoing capture of the Baja California microplate—New insights from the southern Gulf extensional province, en Morán-Zenteno, D.J., (ed.), Geologic transects across the Cordilleran Mexico, Guidebook for field trips of the 99th Annual meeting of the Cordilleran Section of the Geological Society of America, Volume Publicación Especial 1: Mexico, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 13-31.
- 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), 1313-1336.
- Gaitán-Morán J., 1986, On tectonic evidences in the southern peninsular region, Baja California Sur, México: Enschede, Holanda, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), tesis de maestría, 110 pp.
- Gutiérrez-Aguilar, F., 2019, Geocronología, isotopía Sr-Nd y modelado de fases en equilibrio: Avances en la petrogenesis del Complejo Metamórfico Chimo-Yelapa en el estado de Jalisco, México: Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de maestría, 179 pp.
- Grove, M., Kimbrough, D.L., Fletcher, J.M., 2003, Historia de cristalización y termo-cronometría de alta temperatura de rocas del basamento del Bloque de Los Cabos: Reunión anual Unión Geofísica Mexicana, Resúmenes, Boletín informativo GEOS, época II, 23(2), 114-115.
- Hausback, B.R., 1984, Cenozoic volcanic and tectonic evolution of Baja California Sur, México, en Frizzell, V.A., Jr., (ed.), Geology of the Baja California peninsula: Los Angeles, California, Pacific Section, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 219-236.
- Henry, C.D., McDowell, F.W., Silver, L.T., 2003, Geology and geochronology of granitic batholithic complex, Sinaloa, México: Implications for Cordilleran magmatism and tectonics: Geological Society of America, Special Paper 374, 237-274.
- Hirales-Rochín, J., 2004, Las Migmatitas en el Flanco Oriental de La Sierra de La Gata, Baja California Sur, México: Características Estructurales, Petrográficas e Implicaciones Geológicas: La Paz, Baja California Sur, México, Departamento de Geología Marina, Universidad Autónoma de Baja California Sur, tesis de licenciatura (inédita), 130 pp.
- Kimbrough, D.L., Grove, M., Morton, D.M., 2015, Timing and significance of gabbro emplacement within two distinct plutonic domains of the Peninsular Ranges batholith, southern and Baja California: GSA Bulletin, 127(1-2), 19-37.

- Lizarraga-Lieras, C.A., 2015, Caracterización megascópica de las rocas que afloran en la localidad El Potrero, al sureste de la sierra El Novillo, Baja California Sur, México. Implicaciones locales y regionales: La Paz, Baja California Sur, México, Universidad Autónoma de Baja California Sur, tesis de licenciatura, 64 pp.
- Mattern, F., Pérez-Venzor, J.A., Pérez-Espinoza, J.E., Hiraes-Rochin, J., 2008, Cretaceous to Cenozoic sequential kinematics in the forearc-arc transition: effects of changing oblique plate convergence and the San Andreas system with implications for the La Paz fault (southern Baja California, México): *International Journal of Earth Sciences*, 99, 83-99.
- Montrella, J.J., 2004, Geology of Isla Cerralvo, Baja California Sur, Mexico: San Diego, California Estados Unidos de América, Faculty of Geological Sciences, San Diego State University, tesis de maestría, 125 pp.
- Ortega-Gutiérrez, F., 1982, Evolución Magmática y Metamórfica del Complejo Cristalino de La Paz, Baja California Sur. Sociedad Geológica Mexicana, Convención Geológica Nacional, 6, Programa y Resúmenes, p. 90 (resumen).
- Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L. M., Roldán-Quintana J., Aranda-Gómez, J.J., Morán-Zenteno D., Alaniz-Alvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., 1992, Texto explicativo de la Carta Geológica de la República Mexicana 5a. ed. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología; y secretaria de Energía-Minas e Industria Paraestatal, Consejo de Recursos Minerales. Mapa con texto explicativo, escala 1: 2 000,000, 74 pp.
- Ortega-Obregón, C., Solari, L., Gómez-Tuena, A., Elías-Herrera, M., Ortega-Gutiérrez, F., Macías-Romo, C., 2014, Permian-Carboniferous arc magmatism in southern Mexico: U-Pb dating, trace element and Hf isotopic evidence on zircons of earliest subduction beneath the western margin of Gondwana: *International Journal of Earth Sciences*, 103(5), 1287-1300.
- Pérez-Venzor, J.A., 1993, Estudio Geológico de las Sierras Santa Martha y La Gata, Baja California Sur: informe preliminar (resumen), en II Reunión Internacional sobre Geología de la Península de Baja California: Ensenada, Baja California, México, Sociedad Geológica Peninsular, 19 al 23 de abril, sin paginación.
- Pérez-Venzor, J.A., 2013, Estudio Geológico-Geoquímico del borde oriental del bloque Los Cabos Baja California Sur, México: Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral, 294 pp.
- Pompa-Mera, V., 2014, Estudio geológico, geoquímico y geocronológico de la isla María Madre, Nayarit: Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral, 228 pp.
- Pompa-Mera, V., Schaaf, P., Hernández-Treviño, T., Weber, B., Solís-Pichardo, G., Villanueva-Lascrain, D., 2013, Geology, geochronology, and geochemistry of Isla María Madre, Nayarit, Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 30(1), 1-23.
- Ramos-Velázquez, E., 1998, Características de la deformación en las rocas cristalinas cretácicas de la región E-SE de la ciudad de La Paz, Baja California Sur, México, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, tesis de maestría, 122 pp.
- Rochín-García, H., 2015, El basamento del Bloque de los Cabos, Baja California Sur, características geoquímicas, isotópicas y geocronológicas: Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México, México, tesis de maestría, 111 pp.
- Sarmiento-Villagrana, A., Vega-Granillo, R., Talavera-Mendoza, O., Vidal-Solano, J.R., 2016, New age constraints on magmatism and metamorphism of the Western Sonobari Complex and their implications for an earliest Late Cretaceous orogeny on northwestern Mexico. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 33(2), 170-182.
- 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.
- Schaaf, P., Diaz, F., Gutiérrez, F., Solís, G., Hernández, T., Arrieta, G., Solari, L., Ortega, C., 2020, Geochronology and geochemistry of the Puerto Vallarta igneous and metamorphic complex and its relation to Cordilleran arc magmatism in northwestern Mexico: *Lithos*, 352-353.
- Schürzinger, A., 2004, Metamorphe und strukturelle Entwicklung des La Paz Kristallinkomplexes, Baja California Sur, Mexico: Munich, Baviera, Alemania, University of Munich, Germany, tesis doctoral, 140 pp.
- Schwennicke, T., Santisteban-Mendivil, D., Pérez-Venzor, J., Cortés-Martínez, M., Plata-Hernández, E., 2017, Evolución estratigráfica de la cuenca Los Barriles, Baja California Sur, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 34, 212.
- Sláma, J., Kosler, J., Condón, D.J., Crowley, J.L., Gerdes, A., Hanchar, J.M., Horstwood, M.S.A., Morris, G.A., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M.N., Whitehouse, M.J., 2008, Ples'ovice zircon—a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis: *Chemical Geology*, 249(1-2), 1-35
- Solari, L.A., Gómez-Tuena, A., Bernal, J.P., Pérez-Arvizu, O., Tanner, M., 2010, U-Pb zircon geochronology by an integrated LA-ICPMS microanalytical workstation: achievements in precision and accuracy: *Geostandards Geoanalytical Research*, 34(1), 5-18.
- Tobisch, O.T., Paterson, S.R., 1988, Analysis and interpretation of composite foliations in areas of progressive deformation: *Journal of Structural Geology*, 10(7), 745-754.
- Valencia, V. A., Righter, K., Rosas-Elguera, J., López-Martínez, M. y Grove, M., 2013, The age and composition of the pre-Cenozoic basement of the Jalisco Block: implications for and relation to the Guerrero composite terrane. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 166(3), 801-824.
- Vermeesch, P., 2018, IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology: *Geoscience Frontiers*, 9(5), 1479-1493, <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>
- Vite-Sánchez, O., 2019, Interacción de rocas intrusivas y metamórficas en el Batolito de Puerto Vallarta (Zona de Punta Mita): Evidencias Geoquímicas y Geocronológicas: Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de maestría, 124 p.
- Watson, E.B., Wark, D.A., Thomas, J.B., 2006, Crystallization thermometers for zircon and rutile: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(4), 413.
- Wiedenbeck, M., Alle, P., Corfu, F., Griffin, W.L., Meier, M., Oberli, F., Spiegel, W., 1995, Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses: *Geostandards Newsletter*, 19(1), 1-23.
- Winter, J.D., 2001, An introduction to igneous and metamorphic petrology: Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 702 pp.

Manuscrito recibido: diciembre 21, 2021

Manuscrito corregido recibido: septiembre 26, 2022

Manuscrito aceptado: septiembre 27, 2022