

Petrografía, geoquímica y geocronología del magmatismo orogénico en Rayón: Características petrológicas de los últimos magmas asociados a la subducción en Sonora, México

Alejandra Marisela Gómez-Valencia^{1,2}, Jesús Roberto Vidal-Solano^{2,*}, Margarita López-Martínez³, Ricardo Vega-Granillo² y Carlos Pallares⁴

¹Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n, C.P. 83000, Hermosillo, Sonora, México.

²Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n, C.P. 83000 Hermosillo, Sonora, México.

³Departamento de Geología, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas, C.P. 22860, Ensenada, Baja California, México.

⁴Géochronologie et Volcanologie, GEOPS - UMR CNRS, Bat. 504, Sciences de la Terre, Université Paris-Sud 11, 91405 Orsay Cedex, Francia.

* jrvidal@ciencias.uson.mx

RESUMEN

El magmatismo neógeno asociado a la subducción de la placa Farallón en el Noroeste de México se distribuye en una faja con orientación NW-SE. En Sonora, este magmatismo se encuentra comúnmente intercalado con unidades detríticas y presenta tendencias calcoalcalinas, calcoalcalinas altas en potasio y shoshoníticas. El magmatismo orogénico en la región de Rayón, Sonora, es cubierto por depósitos piroclásticos anorogénicos relacionados al proto-Golfo de California. El evento orogénico se ha dividido en dos etapas, la primera del Mioceno temprano (16.51 ± 0.64 Ma) seguida por otra del Mioceno medio (14.88 ± 0.47 Ma). En el campo se les puede observar formando apilamientos de lava en edificios dómicos y estructuras semicirculares asociadas a cuellos volcánicos exhumados bajo un régimen tectónico extensivo. Las características de campo así como los estudios petrográficos y geoquímicos, permiten diferenciar dos unidades: 1) miembro volcánico Cerro Prieto, compuesto por lavas andesíticas vítreas de dos piroxenos y olivino y, 2) complejo volcánico Las Agujas, constituido por intrusivos hipabisales, domos y lavas de composición dacítica con dos piroxenos y anfíbol. Geoquímicamente, ambas unidades son calcoalcalinas y presentan un enriquecimiento en elementos de las Tierras Raras ligeras, un fraccionamiento pronunciado de los elementos de las Tierras Raras pesadas, una baja concentración de Y e Yb y un alto contenido de Sr, que es más acentuado en la unidad más joven. Los episodios magmáticos que produjeron estas unidades son de tipo orogénico y están relacionados con las últimas manifestaciones del arco continental en la región. Finalmente, su afinidad adakítica pudiera estar relacionada a una configuración particular de los fragmentos litosféricos en la etapa final del proceso de subducción.

Palabras clave: magmatismo adakítico; Mioceno; Rayón; Sonora.

ABSTRACT

Neogene magmatism associated to the subduction of the Farallon plate is widely distributed in a NW-SE belt in northwestern Mexico. In Sonora, this magmatism is commonly intercalated with clastic

units, and presents calc-alkaline, high-potassium calc-alkaline and shoshonitic affinity. The orogenic magmatism in the region of Rayon is covered by anorogenic pyroclastic deposits related to the proto-Gulf of California and is divided into two stages: early Miocene volcanism (16.51 ± 0.64 Ma) followed by a middle Miocene event (14.88 ± 0.47 Ma). Both rock sequences occur as lavas, domes and volcanic necks, which were affected by a Miocene extensional tectonic regime. Field, petrographic and geochemical characteristics differentiate two sequences: 1) Cerro Prieto volcanic member, composed of vitreous, porphyric, two pyroxenes and olivine andesitic lavas, and 2) Las Agujas Volcanic Complex, consisting of hypabyssal rocks, domes and dacitic lavas with two pyroxenes and amphibole. Geochemically, rocks of both units are calc-alkaline, are enriched in light rare earth elements, and display a pronounced fractionation of the heavy rare earth elements, low Y and Yb concentrations, and high Sr content, which is more prominent in the younger unit. These orogenic magmatic episodes are related to the latest manifestations of the continental arc in Sonora; the adakitic affinity could be related to a particular configuration of the slab in the final stage of the microplate subduction.

Key words: orogenic magmatism; adakitic volcanism; Miocene; Rayón; Sonora.

INTRODUCCIÓN

La historia geológica en los últimos 30 millones de años del noroeste de México es compleja e incluye varios eventos magmáticos y tectónicos. Uno de estos eventos ha sido el emplazamiento en la actual península de Baja California de las lavas calcoalcalinas del arco Comondú como resultado de la subducción de la placa de Farallón bajo la placa de Norteamérica (Gastil *et al.*, 1979; Hausback, 1984; Sawlan and Smith, 1984; Sawlan, 1991; Umhoefer *et al.*, 2001; Bryan *et al.*, 2014). La reorganización cinemática de las placas implicadas provocó el emplazamiento de lavas y rocas volcánicas atípicas (para un contexto de subducción) en Baja California y en Sonora. Así, el magmatismo calcoalcalino, aunque permaneció hasta el Pleistoceno tardío (p. ej., volcán de Las Tres Vírgenes; Demant, 1984; Sawlan, 1986), fue reempla-

zados progresivamente y en ocasiones alternó en el tiempo con una gran variedad de magmas que generaron rocas basálticas del tipo basaltos de dorsal oceánica (MORB, *Mid Ocean Ridge Basalt*), basaltos de islas oceánicas (OIB, *Ocean Island Basalts*), basaltos toleíticos, basaltos ricos en Nb (Aguillón-Robles et al., 2001), andesitas magnesianas (Saunders et al., 1987; Calmus et al., 2003), adakititas (Aguillón-Robles et al., 2001; Calmus et al., 2008), riolitas hiperalkalinas e islanditas (Vidal-Solano et al., 2008a, 2008b).

En Sonora, el magmatismo de arco continental relacionado al sistema de subducción Farallón-Norte América continuó activo al término del Oligoceno y principios del Mioceno (Cochemé y Demant, 1991). Numerosas manifestaciones volcánicas ampliamente distribuidas al poniente de la Sierra Madre Occidental, comprueban la existencia de este magmatismo orogénico, el cual es contemporáneo al evento tectónico distensivo *Basin and Range* (Dickinson, 1991), que provocó la exhumación del batolito laramídico (Damon et al., 1983), y el desarrollo de estructuras del tipo horst y graben o conjuntos de semigrábenos escalonados, que produjeron cuencas endorreicas que fueron rellenadas por sedimentos detríticos asociados con volcanismo. A estos depósitos continentales se les denomina en algunas localidades como Formación Báucarit (King, 1939; Radelli, 1989; Münch, 1993; De la O-Villanueva, 1993). En esos registros es común observar la intercalación de lavas máficas conocidas como SCORBA (*Southern Cordillera Basaltic Andesite*) generadas en un régimen extensional, pero que poseen una afinidad geoquímica e isotópica de carácter orogénico (Cameron et al., 1989).

La región de Rayón se localiza en la porción central del Estado de Sonora al suroeste del poblado de Rayón y al noreste de la ciudad de

Heramosillo (Figuras 1a y 1c). Esta región forma parte de la provincia fisiográfica *Basin and Range*, caracterizada por sierras alineadas de manera general en dirección NW-SE (Figura 1a). En este sector, las rocas magmáticas atribuidas tentativamente al Oligoceno-Mioceno varían de intermedias a máficas y se encuentran también asociadas a sedimentos continentales (Castro-Rodríguez y Morfín-Velarde, 1988; SGM, 1999). Otras lavas consideradas del Plioceno son esencialmente de composición basáltica (Valenzuela-Rentería, 2001). Sin embargo, la falta de estudios petrológicos y geocronológicos de estas unidades ha generado que no sean bien reconocidas o correlacionadas. El presente trabajo tiene como objetivo principal la caracterización petrográfica, geoquímica y geocronológica de las unidades volcánicas, así como su relación petrológica con las manifestaciones intrusivas que afloran en el área de Rayón, Sonora, poniendo en realce su afinidad química peculiar, diferenciación y su posible origen. Por último, con el fin de ubicar este evento en la evolución magmática del Noroeste de México se establece una correlación con rocas volcánicas similares reportadas en la literatura.

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

Las rocas más antiguas de la región forman parte de un basamento Precámbrico y Cretácico que ha sido descrito con más detalle en algunas tesis profesionales y en la cartografía realizada por el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 1999). En estos estudios, generalmente de enfoque cartográfico, se elaboraron planos geológicos a escala 1:50,000 (Castro-Rodríguez y Morfín-Velarde, 1988; Figueroa-Valenzuela y

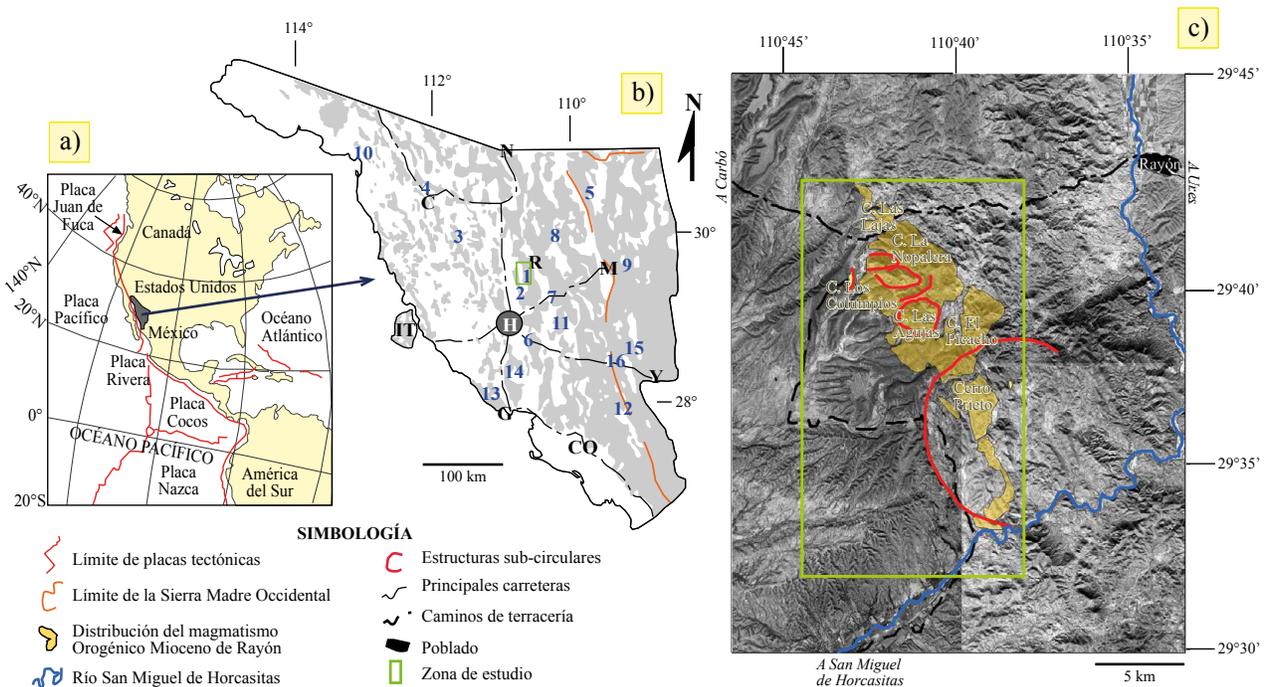


Figura 1. a) Mapa esquemático modificado de Lonsdale (1991), mostrando una porción del continente americano, donde se pone en realce la localización de Sonora, México y su interacción con los diferentes elementos tectónicos de la región; b) Distribución del magmatismo orogénico del Oligoceno-Mioceno en el Estado de Sonora. 1: Zona de estudio Rayón (Gómez-Valencia et al., 2009, Gómez-Valencia, 2011 y 2014); 2: San Miguel de Horcasitas (Vidal-Solano, 2005); 3: Sierrita Prieta, Trincheras (Tarazón-Pacheco, 2002; Tarazón-Pacheco y Paz-Moreno, 2004; Tarazón-Pacheco, 2007); 4: Caborca (Izaguirre-Pompa, 2006); 5: Batepito - Bavispe (Paz Moreno et al., 2009); 6: La Colorada (Vidal-Solano, 2005); 7: Puerta del Sol, Ures (González-Becuard, 2011); 8: Arizpe (González-León, 2010); 9: Sobai Satechi (Almirudis-Echeverría, 2010); 10: Puerto Peñasco (Paz-Moreno et al., 2012); 11: Mazatán (Till et al., 2009). Poblados principales: N: Nogales, C: Caborca, R: Rayón, M: Moctezuma, H: Hermosillo, IT: Isla Tiburón, G: Guaymas, Y: Yécora y CO: Ciudad Obregón. c) Ortofotos digitales mostrando en amarillo la distribución del magmatismo orogénico del Mioceno en la región al W-SW de Rayón, Sonora y, en rojo, las estructuras semicirculares correspondientes a cuerpos intrusivos.

Grijalva-Haro, 1989; Valenzuela-Rentería, 2001; Huitrón-López, 2004). Las rocas asignadas al Precámbrico corresponden a secuencias sedimentarias que ocurren, específicamente al sur de la localidad de Cerro de Oro (Figura 2). Tal es el caso del Grupo La Palma (Castro-Rodríguez y Morfín-Velarde, 1988), que ha sido correlacionado con unidades situadas más al norte en la región conocida como La Poza (Huitrón-López, 2004). El grupo antes citado se encuentra cabalgando a una secuencia cretácica marina compuesta de arenisca, conglomerado, caliza y lutita (Castro-Rodríguez y Morfín-Velarde, 1988; González-León, 1989).

Las rocas antes descritas son intrusionadas por granitoides que afloran principalmente al este del poblado de Rayón (Figura 2), los cuales se han atribuido al evento Laramídico reportado entre 90 y 40 Ma (Damon *et al.*, 1983). Asociadas a las rocas plutónicas, se encuentran rocas volcánicas andesíticas con un alto grado de alteración que son correlacionadas con la Formación Tarahumara fechada entre 90 y 70 Ma en la parte central-este de Sonora (McDowell *et al.*, 2001). Sobre yaciendo al basamento pre-Cenozoico (Precámbrico-Cretácico), se depositaron secuencias volcánicas y detríticas gruesas, que actualmente ocupan buena parte de los afloramientos de la región y que han sido atribuidas al Neógeno por correlación (Gómez-Valencia, 2011).

Geología local

De acuerdo con el trabajo de Gómez-Valencia (2011), los depósitos sedimentarios en este sector pueden subdividirse en tres unidades: (1) conglomerado tipo Báucarit; (2) unidad detrítica del Mioceno medio, y (3) sedimentos Plio-Cuaternarios. Mientras que las unidades volcánicas del Cenozoico se dividen en dos unidades oligocénicas (Gómez-Valencia, 2014): [1] unidad volcánica Los Lobos, [2] unidad volcánica El Cajón-Las Palomas; y tres unidades miocénicas: [3] miembro volcánico Cerro Prieto, [4] complejo volcánico Las Agujas e [5] ignimbrita hiperlocalina. Estas tres últimas unidades hacen el objeto principal de este estudio.

Miembro volcánico Cerro Prieto (MVCP)

En este trabajo se designa como una nueva unidad litoestratigráfica de la Formación Báucarit al miembro volcánico Cerro Prieto, nombrado por la localidad tipo que se encuentra en el cerro Prieto localizado al W del cerro El Cielo y del poblado de Cerro de Oro, en el municipio de Rayón, Sonora. En la localidad tipo, estas rocas se encuentran ampliamente distribuidas en la zona centro-sur al interior de una estructura circular que ha sido denominada de manera informal como *caldera de Rayón* (Figura 3a), y en menor proporción en la porción norte de el área de estudio, en los Cerros Las Lajas y La Nopalera (Figura 2). Estas rocas afloran de manera discordante, en el trayecto del Arroyo Los Lobos, sobre unidades detríticas gruesas y estratificadas correlacionables con la secuencia molásica ampliamente reportada en el Estado de Sonora bajo el nombre de Formación Báucarit (King, 1939).

En el Cerro Prieto (Figuras 2 y 3a), la secuencia volcánica forma un apilamiento de más de 100 m de espesor, y está constituida de al menos seis derrames andesíticos con textura fluidal, que varían de porfídicos a glomeroporfídicos, resaltando la presencia de fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno y olivino. Estos flujos andesíticos sobreyacen en discordancia a coladas basálticas, riolitas, andesitas y tobas félsicas del Oligoceno que conforman a la unidad volcánica El Cajón - Las Palomas, una secuencia relacionada al registro del último pulso de la Sierra Madre Occidental (Figura 2, Gómez-Valencia, 2011).

Las coladas andesíticas del miembro volcánico Cerro Prieto presentan un aspecto vítreo, con texturas vesiculares a amigdalares, rellenas de calcita y zeolitas de color gris azulado (Figura 3b). En la base de los derrames es posible observar una autobrecha de arrastre

(Figura 3c). En el Cerro Las Lajas, al norte del área de estudio, en la parte intermedia de la secuencia ocurren derrames bandeados con horizontes de flujo de colores café y beige, como evidencia de inmiscibilidad (*mingling*) en un líquido magmático (Gómez-Valencia *et al.*, 2010 y Gómez-Valencia, 2011; Figuras 3d y 3e). En algunos casos es posible observar superficies con diaclasas de enfriamiento (Figura 3f). Los últimos derrames de la secuencia son vítreos, tienen una coloración rojiza y un espesor menor a 7 m.

Complejo volcánico Las Agujas (CVLA)

Este complejo aflora en el área de estudio como altos topográficos con una orientación NW-SE y se encuentra distribuida ampliamente en la región centro-norte de la zona de estudio (Figura 2). El complejo volcánico Las Agujas está constituido por las siguientes cuatro unidades:

Cuerpo hipabisal Las Agujas. Este cuerpo aflora en el Cerro Las Agujas (Figuras 2 y 3h) y su extensión al norte en el barranco El Tigre; también aflora en el Cerro Los Columpios (Figura 2). Este cuerpo es representado por al menos cinco cuerpos hipabisales de forma semicircular que afloran a manera de crestones con diaclasas de enfriamiento subverticales (coloquialmente llamados agujas, Figuras 2 y 3h). Estos cuerpos, que fungieron como alimentadores de algunos de los derrames volcánicos aledaños, representan la raíz de los edificios volcánicos. Todos son de composición andesítica, de color gris claro, porfíricos con fenocristales de anfíbol y plagioclasa y presentan texturas cristalinas sacaroides cuyo grano disminuye hacia los bordes de los cuerpos. En las rocas del Cerro Los Columpios se presentan localmente algunos megacrístales de hornblenda que llegan a medir hasta 4 cm de largo (Figura 3g).

Derrames volcánicos Las Agujas. Estos derrames se ubican en el extremo oeste del Cerro Las Agujas (Figura 2), siendo delimitados al occidente por el cerro Los Columpios, así como por abanicos aluviales cuaternarios. Estos derrames están constituidos por andesitas y dacitas porfídicas de plagioclasa y hornblenda; esta última se encuentra fuertemente alterada con formación de óxidos de hierro. Estas rocas presentan tonalidades café oscuro en superficie intemperizada y café rosado en superficie fresca. En los bordes de estos derrames se observa una brecha de base con juveniles porfídicos de hornblenda ocasionalmente fresca.

Derrames volcánicos La Nopalera. Estos derrames (Figura 2) se localizan en el cerro La Nopalera y al oriente del mismo. En esta localidad, al menos cinco derrames con sus respectivas brechas de base sobreyacen a la secuencia del MVCP. Los derrames observados forman parte de un apilamiento de lavas con características muy similares, es decir, presentan la misma asociación mineralógica de plagioclasa, anfíbol y piroxeno. En el campo se distinguen por sus tonalidades claras y por un fuerte diaclasamiento, donde destaca, en la parte superior, un derrame subhorizontal (actitud N54°W; 10°SW) que se caracteriza por tener prismas de enfriamiento bien desarrollados. Estos derrames tienen en conjunto un espesor no mayor a 50 m; todos presentan una textura sacaroides y su composición es intermedia.

Derrames volcánicos El Picacho. Consisten de un par de derrames subhorizontales que ocurren en el cerro El Picacho, que es un remanente de erosión que forma las partes más altas de la región. Estas lavas andesíticas muestran una tonalidad café amoratado y un espesor cercano a los 30 m (Figura 2). Estos derrames presentan brechas basales y una textura predominantemente porfídica con fenocristales de plagioclasa y piroxeno, aunque en sus partes centrales pueden tener una textura sacaroides, como los derrames de La Nopalera. Esta unidad es repetida por fallas normales que la desplazan.

Ignimbrita de Hermosillo/Toba de San Felipe

Sobreyaciendo en discordancia angular al MVCP y al CVLA, y

MAPA GEOLÓGICO CERRO PRIETO-LAS AGUJAS, RAYÓN, SONORA, MÉXICO

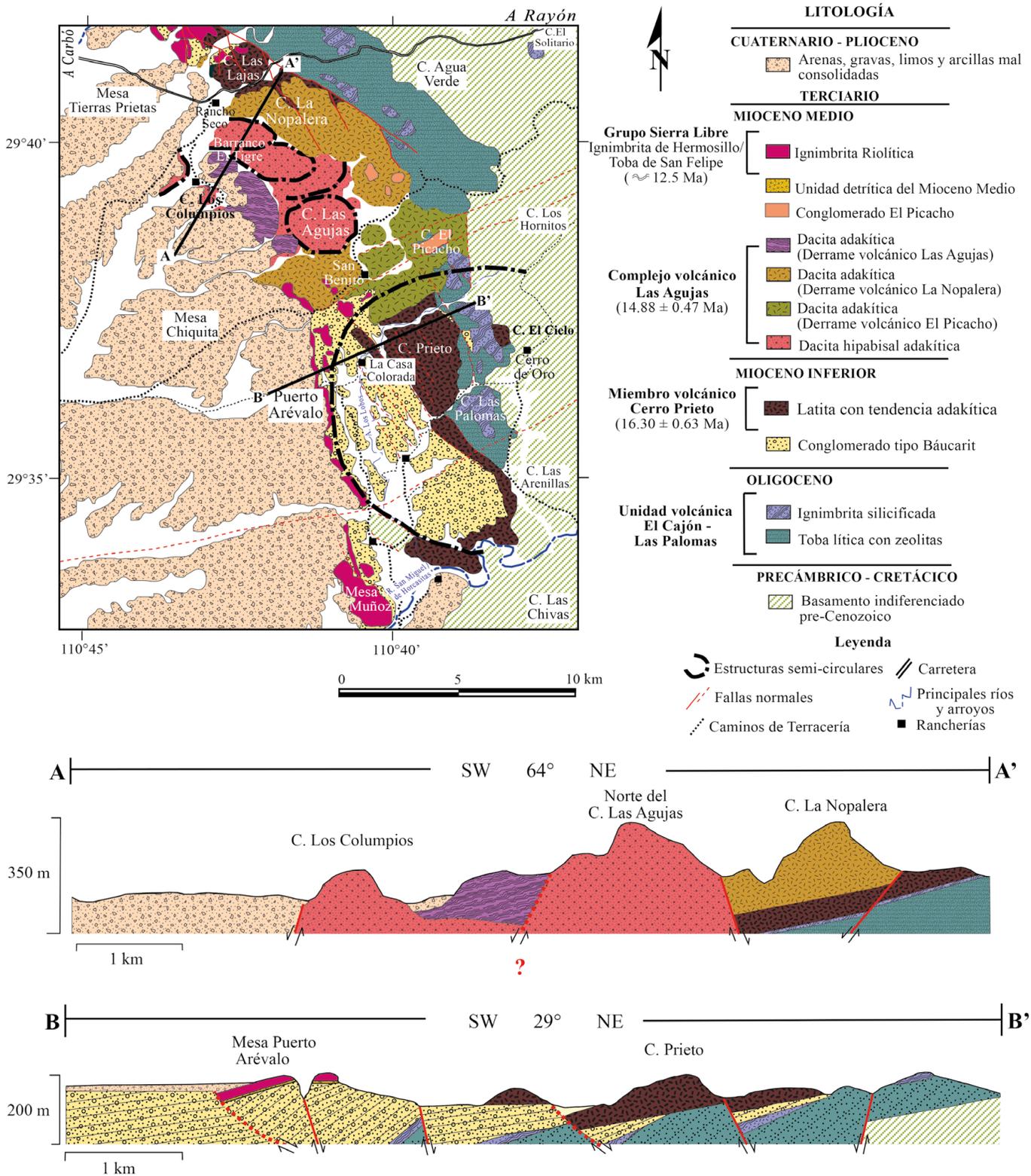


Figura 2. Mapa geológico de la región al W-SW de Rayón, Sonora (modificado de Gómez-Valencia, 2011) y dos secciones geológicas representativas.

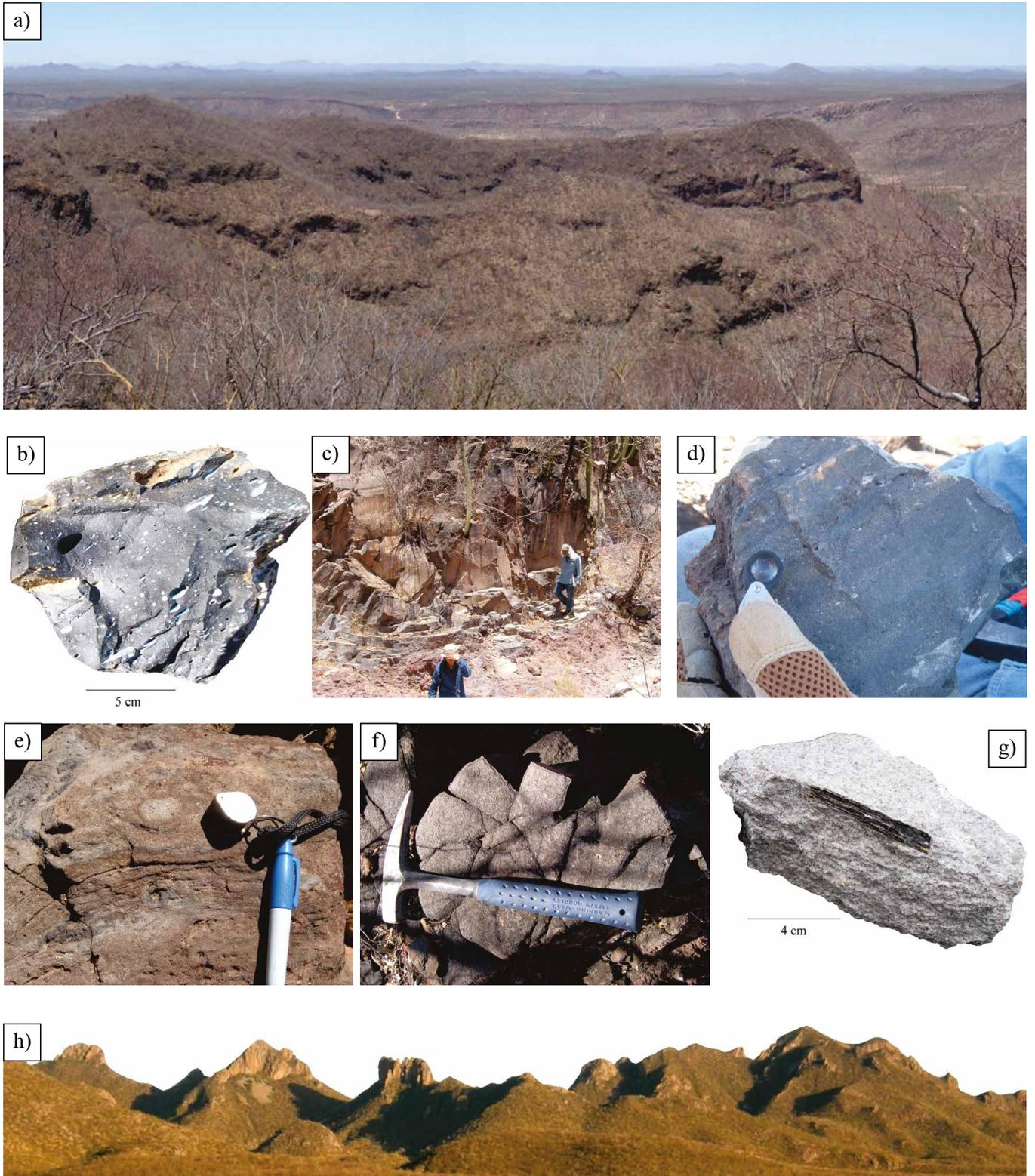


Figura 3. a-f: Fotografías del miembro volcánico Cerro Prieto (MVCP). a) vista panorámica tomada desde el E con vista al Cerro Prieto; al fondo se observa el borde de la estructura denominada La Caldera de Rayón; b) muestra de una facies amigdalar rellena de zeolitas de color gris azulado; c) derrame de base en el Arroyo Los Lobos; d) derrame superior híbrido de una de las lavas del MVCP; e) superficie de intemperismo del derrame híbrido del MVCP; y f) superficie con diaclasas de enfriamiento en las rocas del MVCP. g-h: Fotografías del complejo volcánico Las Agujas: g) roca cristalina del Cerro Los Columpios, mostrando un megacrystal de hornblenda; y h) vista panorámica tomada desde el W con vista al Cerro Las Agujas.

cubriendo a estratos conglomeráticos brechoides poco consolidados, se identificó un depósito ignimbrítico que cubre una región aproximada de 50 km² (Figura 2). Este depósito corresponde a una sola unidad de enfriamiento de espesores reducidos que varían entre 5 y 22 m, muy soldada y con la presencia de un vitrófiro basal. Presenta cinco facies de enfriamiento de la base a la cima: a) una oleada de base (*ground surge*) que corresponde a una toba poco soldada con lapilli de pómez alargadas color beige, b) un vitrófido de color café a negro poco desvitrificado con flamas centimétricas, c) una toba masiva soldada de color rosa, d) una toba masiva soldada vesicular de color rosa y, e) en la cima, una toba masiva soldada color gris. En general, estas facies presentan una matriz eutaxítica poco porfírica a glomeroporfírica (>7%), con una asociación de fenocristales de feldespato alcalino, clinopiroxeno verde y fayalita. La cantidad de líticos se incrementa de la base a la cima y hacia la base contiene esporádicos enclaves traquíticos.

Investigaciones previas de esta unidad iniciaron un poco más al sur de Rayón, en la región de San Miguel de Horcasitas (Figura 1b), donde se reportó la presencia de un volcanismo ácido hipercalcino del Mioceno medio (Vidal-Solano, 2005), nombrado Ignimbrita de Hermosillo-Toba de San Felipe (Vidal-Solano et al., 2013), correspondiendo a depósitos distales provenientes de un punto de emisión situado tentativamente en el SW del Estado de Sonora en la región de la Sierra Libre (Barrera-Guerrero, 2012; Vidal-Solano et al., 2013). Recientemente fue propuesto que esta unidad estratigráfica, clave para la estratigrafía del Mioceno medio en el NW de México, pertenece a una secuencia anorogénica denominada Grupo Sierra Libre (Gómez-Valencia, 2014), permitiendo ubicar en el tiempo al miembro volcánico Cerro Prieto y al complejo volcánico Las Agujas.

PETROGRAFÍA

El estudio petrográfico de las unidades volcánicas en 26 láminas delgadas (Tabla 1), muestra que ambos grupos presentan agrupaciones de fenocristales principalmente compuestos por plagioclasa, ortopiroxeno y clinopiroxeno, en varias proporciones (Figura 4d, 4e y 4h), pero en todos los casos, la plagioclasa es el fenocristal dominante (Tabla 1). El MVCP está compuesto por andesitas porfídicas a glomeroporfídicas de matriz vítrea (Figura 4) y, en algunos casos vesiculares, que contienen fenocristales de plagioclasa (Pl), clinopiroxeno (Cpx), ortopiroxeno (Opx), olivino (Ol) y óxidos de Fe-Ti (Ox Fe-Ti). En este grupo, los fenocristales agrupados presentan generalmente mayor tamaño y abundancia en las coladas-brecha de la base de la secuencia (muestras CPR09-02, CPR09-03, CPR09-04 y CPR09-07; Figura 4), mientras que los derrames de la cima (muestra CPR09-06 en Tabla 1), contienen fenocristales de olivino iddingsitizado, algunos con bordes oxidados y otros con texturas esqueléticas. Ocasionalmente, en estos derrames de la cima, el olivino (de composición fayalítica), ocurre de forma tardía dentro de las bandas de flujo que componen a la matriz (Figura 4f).

Las muestras del CVLA corresponden a dacitas hipabisales porfídicas a glomeroporfídicas de matriz microcristalina a criptocristalina con fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno, hornblenda (Hbl) y óxidos de Fe-Ti (Figura 4). Las lavas y cuerpos hipabisales de composición dacítico-andesítica son altamente cristalinos en una matriz microcristalina a vítrea, donde la presencia de grupos de cristales es menos importante y las dimensiones de los fenocristales son menores también. En algunas de estas lavas se observa hornblenda, tanto en la matriz como en megacristales (Figura 4m), éstos últimos se encuentran en su mayoría parcialmente oxidados. Destaca la presencia de fenocristales de Cpx y Opx, observándose en los cuerpos hipabisales que el Opx está en desequilibrio y es englobado por Cpx (Figura 4j). La plagioclasa ocurre abundantemente en cristales

euédricos, ya sea como fenocristales aislados, en grupos, o en la matriz. La plagioclasa corresponde a oligoclasa de composición homogénea (An₁₀₋₃₀ con base en mediciones petrográficas de sus maclas), y a veces está alterada a albita (An₀₋₁₀), principalmente en las rocas hipabisales. Los piroxenos (Opx y Cpx) aparecen sólo como fenocristales aislados o en cúmulos, con formas subédricas a anédricas. La hornblenda es el mineral característico y se presenta en cristales euédricos con bordes oxidados o casi totalmente oxidados. En algunas muestras, la hornblenda, a la par de los óxidos de hierro, forma bandas delgadas de microcristales rodeadas por matriz (Figura 4m).

GEOQUÍMICA

Para el estudio geoquímico se seleccionaron muestras de distintas litologías del miembro volcánico Cerro Prieto y del complejo volcánico Las Agujas, con base en un estudio petrográfico minucioso. Una descripción detallada de la preparación de las muestras para el análisis, así como de las técnicas analíticas utilizadas se encuentra en Gómez-Valencia (2011, 2014). Las concentraciones de los elementos mayores y traza obtenidos para estas muestras se presentan en la Tabla 2.

Elementos mayores

La proporción de los contenidos en sílice y álcalis de las rocas analizadas es bien ilustrada en el diagrama de Le Bas et al. (1986; Figura 5a), donde ambas unidades volcánicas se ubican en el dominio subalcalino. En este diagrama, las muestras del miembro volcánico Cerro Prieto se ubican en el campo de la traquiandesita. Sin embargo, debido a que las rocas de esta unidad tienen un contenido de Na₂O-2.0<K₂O, son ahora denominadas latitas (Le Maitre et al., 2002, Figura 5c y Tabla 2). La mayoría de los análisis de ambas secuencias magmáticas caen en el campo calcoalcalino del diagrama de Miyashiro (1974; Figura 5b). Las rocas del miembro volcánico Cerro Prieto tienen contenidos muy similares en SiO₂ y valores de FeOt/MgO relativamente bajos que son característicos de una serie calcoalcalina (Miyashiro, 1974; Figura 5b). Por otra parte, estas rocas son del tipo calcoalcalino alto en K de acuerdo con el concepto de Peccerillo y Taylor (1976) modificado por Le Maitre et al. (2002) (Figura 5c). Los valores moderados del Mg# (=100 [MgO/(MgO+FeO)]) entre 42.60 y 50.76 recalcan el carácter diferenciado de estos magmas.

Por otro lado, las rocas del complejo volcánico Las Agujas, presentan contenidos en sílice en el rango de 61–66 % en peso indicando variedades intermedias a félsicas, principalmente en el dominio de las dacitas (Figura 5a). Los valores de FeOt/MgO en estas lavas son relativamente más altos y muestran una tendencia hacia la serie toleítica (Figura 5b). Sin embargo, los valores de K₂O coinciden con los reportados por Peccerillo y Taylor (1976) para la serie calcoalcalina de medio K (Figura 5c). Estas afinidades químicas que subrayan una sobresaturación en sílice en esta serie, se encuentran en completa congruencia, tanto con las descripciones petrográficas (Tabla 1), como con la aparición de cuarzo, diópsida e hiperstena en la norma CIPW (q, di, hy, respectivamente; Tabla 2).

Los diagramas de variación de tipo Harker (Figura 6) muestran una correlación negativa del Al₂O₃, MgO, Fe₂O₃, TiO₂, CaO, P₂O₅, Sr, V y Ni en relación con el sílice y una correlación positiva con Na₂O, K₂O, Ba y Rb. Estas evoluciones señalan el rol eminente de la cristalización fraccionada de plagioclasa y piroxenos en la evolución de los magmas (Figura 6o).

Elementos traza

El diagrama de elementos de las Tierras Raras normalizado a condrita (Sun y McDonough, 1989; Figura 7a), muestra un parale-

Tabla 1. Petrografía representativa de las muestras estudiadas y de las facies identificadas en el magmatismo Mioceno temprano-medio de Rayón, Sonora.

Muestra	Localidad	Coordenadas		Roca	Facies del derrame	Textura	Fenocristales	Glómeros	Matriz
		N	E						
Miembro volcánico Cerro Prieto									
CLL08-00	C. Las Lajas	3285182	528503	Andesita	Nivel lajeado	Porfídica a ligeramente glomeroporfídica fluidal	Pl>Ol>OxFe-Ti>Opx	Pl>Ol	Vítrea afieltrada con microlitos de Pl y OxFe-Ti
CLNR10-01A	C. La Nopalera	3283552	529168	Andesita	Nivel intermedio	Porfídica a glomeroporfídica vesicular	Pl>Cpx>Opx>OxFe-Ti	(1) Pl>Cpx=Opx y (2) Pl>Cpx	Vítrea afieltrada
CLNR10-02A		3283552	529168	Andesita	Nivel superior	Porfídica a glomeroporfírica	Pl>Cpx	Pl>Cpx	Vítrea traquítica
ALL09-01	C. Prieto	3276274	532407	Andesita	Nivel lajeado	Porfídica a glomeroporfídica	Pl>OxFe-Ti>Ol>Cpx	(1) Pl>Cpx>Ol, Pl>Cpxy (2) Pl>Ol	Vítrea afieltrada con microlitos de Pl>OxFe-Ti
CPR09-01		3276362	532407	Andesita	Nivel fluidal	Porfídica a ligeramente glomeroporfídica fluidal	Ol>Ol=OxFe-Ti>Opx	Pl > Opx=Cpx	Vítrea afieltrada con microlitos de Pl>OxFe-Ti>Ol
CPR09-02		3276386	532466	Andesita	Brecha de base	Porfídica a ligeramente glomeroporfídica fluidal	Pl>Ol>OxFe-Ti>Opx	Pl>Cpx	Vítrea afieltrada con microlitos de Pl>OxFe-Ti
CPR09-03		3276171	532879	Andesita	Brecha de base	Vesicular glomeroporfídica a porfídica	Pl>OxFe-Ti>Ol	Pl>Ol>Cpx>Opx	Vítrea afieltrada con microlitos de Pl>OxFe-Ti
CPR09-04		3276092	532764	Andesita	Brecha de base	Vesicular glomeroporfídica a porfídica	Pl>Ol>OxFe-Ti	Pl>Cpx>Opx=Ol	Vítrea afieltrada con microlitos de Pl>OxFe-Ti
CPR09-05		3275902	532783	Andesita	Nivel intermedio	Porfídica a glomeroporfírica	Pl>OxFe-Ti>Ol	Pl>Olv >Cpx	Vítrea afieltrada con microlitos de Pl>OxFe-Ti
CPR09-06		3275902	532783	Andesita	Nivel superior	Vesicular glomeroporfídica a porfídica	Pl>Ol>OxFe-Ti	(1) Pl>Cpx>Opx=Ol y (2) Pl>Cpx>Opx	Vítrea afieltrada con microlitos de Pl>OxFe-Ti
CPR09-07		3275432	532937	Andesita	Brecha de base	Vesicular Porfídica a glomeroporfídica	Pl>Ol>Opx>OxFe-Ti	(1) Pl>Ol>Opx, Pl>Opx y (2) Pl>Ol	Vítrea afieltrada con microlitos de Pl>OxFe-Ti
CPR09-08		3275686	533123	Andesita	Nivel superior	Glomeroporfídica a porfídica	Pl>Cpx>Opx>OxFe-Ti	(1) Pl>Cpx>Opx =Ol y (2) Pl>Cpx>Ol	Vítrea afieltrada con microlitos de Pl>OxFe-Ti
CPR09-09		3275739	533267	Andesita	Nivel intermedio	Glomeroporfídica a porfídica	Pl>Ol>OxFe-Ti	Pl>Ol>Cpx	Vítrea afieltrada con microlitos de Pl>OxFe-Ti
CPR09-10		3276062	533488	Andesita	Nivel superior	Porfírica a glomeroporfírica	Pl>OxFe-Ti	Pl>Opx	Vítrea afieltrada con microlitos de Pl>OxFe-Ti
CPR09-11		3276062	533488	Andesita	Nivel intermedio	Porfídica a glomeroporfídica	Pl>OxFe-Ti>Ol	Pl>Cpx>Opx	Vítrea afieltrada con microlitos de Pl>OxFe-Ti
CCR09-01		3276824	531769	Andesita	Nivel lajeado	Porfídica a glomeroporfídica	Pl>OxFe-Ti	Pl>Opx>Ol, Pl>Cpx>Opx>Ol, Pl>Cpx y Pl>Ol	Vítrea afieltrada con microlitos de Pl>OxFe-Ti
Complejo volcánico Las Agujas									
CLNR10-03A	C. La Nopalera	3283379	529190	Dacita hipabisal	Nivel intermedio	Porfídica a glomeroporfídica	Pl>Cpx>OxFe-Ti	Pl>Cpx	Criptocristalina de Pl y OxFe-Ti
CLNR10-04A		3283246	529281	Dacita hipabisal	Brecha de base	Porfídica ligeramente seriada a glomeroporfídica	Pl>OxFe-Ti>Cpx	Pl>Cpx	Criptocristalina de Pl y OxFe-Ti
CLNR10-05A		3283179	529279	Dacita hipabisal	Nivel superior lajeado	Porfídica ligeramente seriada	Pl>Cpx>OxFe-Ti	NP	Criptocristalina de Pl y OxFe-Ti

continúa

Tabla 1 (cont.). Petrografía representativa de las muestras estudiadas y de las facies identificadas en el magmatismo Mioceno temprano-medio de Rayón, Sonora.

Muestra	Localidad	Coordenadas		Roca	Facies del derrame	Textura	Fenocristales	Glómeros	Matriz	
		N	E							
Complejo volcánico Las Agujas (cont.)										
BET08-01A	Barranco El Tigre	3281401	528458	Dacita hipabisal	Prismas de enfriamiento	Porfídica a altamente glomeroporfídica	Pl>Cpx>Opx>OxFe-Ti	(1) Pl>Cpx=Opxy (2) Cpx=Opx	Criptocristalina de Pl y OxFe-Ti	
BET08-02		3281401	528458	Dacita hipabisal	Base cuerpo hipabisal	Porfídica	Pl>Cpx>Opx>OxFe-Ti	NP	Criptocristalina de Pl y OxFe-Ti	
BET08-03		3281812	528818	Dacita hipabisal	Brecha de arrastre	Porfídica ligeramente seriada	Pl>OxFe-Ti>Hbl	NP	Criptocristalina de Pl y OxFe-Ti	
BET08-04		3280659	529238	Dacita	Nivel medio	Porfídica ligeramente fluidal	Pl>OxFe-Ti>Hbl	NP	Criptocristalina de Pl y OxFe-Ti	
CLCRS10-02A	C. Los Columpios	3280235	527781	Dacita hipabisal	Nivel superior	Porfídica a glomeroporfídica	Pl>Cpx>Opx>OxFe-Ti	Pl >Opx	Criptocristalina de Pl y OxFe-Ti	
CCR09-02	C. El Picacho	3276824	531769	Andesita	Nivel lajeado	Porfídica a ligeramente glomeroporfídica	Pl>Cpx>OxFe-Ti	Pl>Cpx	Criptocristalina de Pl y OxFe-Ti	
CCR09-03		3277628	535003	Andesita	Nivel superior del derrame	Porfídica a ligeramente glomeroporfídica	Pl>Cpx>OxFe-Ti	Pl>Cpx	Criptocristalina de Pl y OxFe-Ti	

lismo entre los espectros de ambas unidades volcánicas, aunque con contenidos mayores en las muestras en el miembro volcánico Cerro Prieto y la presencia en éstas de una ligera anomalía negativa en Eu, que no se observa en las muestras del complejo volcánico Las Agujas. Los espectros se caracterizan por valores elevados en elementos de las Tierras Raras ligeras (LREE, *Light Rare Earth Elements*), una pendiente pronunciada entre La y Dy, una anomalía negativa muy poco pronunciada en Eu y patrones de los elementos de las Tierras Raras pesadas (HREE, *Heavy Rare Earth Elements*) subhorizontales (La/Yb 16–20; Tabla 2). Una notable diferencia entre ambos grupos es un marcado empobrecimiento de los REE en las lavas del CVLA, a pesar de tratarse de rocas más ricas en sílice (Figura 7a).

El diagrama multielemental normalizado con manto primitivo (Sun y McDonough, 1989; Figura 7b), confirma una similitud en las proporciones de las concentraciones de los elementos traza de todas las lavas, exhibiendo un arreglo espectral con un enriquecimiento progresivo en los elementos más incompatibles, que es uniforme en cada unidad volcánica. Los espectros se caracterizan por presentar rasgos de magmas orogénicos con pronunciadas anomalías negativas en Nb-Ta, P, Ti y, positivas en Ba, K y Pb, las cuales aumentan con el grado de diferenciación de los magmas en cada grupo. La diferencia más marcada entre ambos grupos de espectros radica en una menor concentración de elementos traza y una anomalía positiva en Sr para el complejo volcánico Las Agujas (Figura 7b) con respecto al miembro volcánico Cerro Prieto.

GEOCRONOLOGÍA $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

En este trabajo se analizaron por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dos muestras de roca volcánica, una del miembro volcánico Cerro Prieto y la otra del complejo volcánico Las Agujas. Las mediciones fueron efectuadas tanto en minerales separados como en el vidrio de la matriz, los cuales fueron preparados siguiendo la metodología del Laboratorio de Geocronología del CICESE (Cerca-Martínez et al., 2000). Las muestras fueron irradiadas en el reactor de investigación de la Universidad

de McMaster en Canadá. En el análisis se utilizó un estándar de sanidino de la toba Fish Canyon (FCT2C de 28.201 ± 0.046 Ma; Kuiper et al., 2008) como monitor de irradiación, obteniéndose un valor de $J = 0.003147 \pm 0.000015$. Las constantes recomendadas por Steiger y Jäger (1977) se usaron en todos los cálculos. Para el cálculo de las líneas rectas se utilizaron las ecuaciones presentadas por York et al. (2004). Los errores se reportan a 1σ , la edad integrada, de meseta y de isócrona incluyen la incertidumbre en el factor de irradiación J . El análisis isotópico de argón se realizó en el Laboratorio de Geocronología del CICESE con un espectrómetro de masas VG5400. Los resultados de estos experimentos y sus diagramas de correlación se discuten a continuación.

El análisis de la latita CPR09-09 corresponde a un separado de matriz de la facies vítrea del miembro volcánico Cerro Prieto (Gómez-Valencia, 2011). Los resultados obtenidos en 10 pasos de calentamiento (Tabla 3a), producen un espectro de edad con forma escalonada (Figura 8a), la primera fracción aplicando 0.3 W de potencia con el láser, arroja una edad de 33.53 ± 3.82 Ma que inmediatamente disminuye a 20.72 ± 1.38 Ma y gradualmente continúa decreciendo, observándose un segmento relativamente plano que es determinado por cuatro fracciones que definen una edad de 18.88 ± 0.44 Ma. En el diagrama $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ (Figura 8b) se presenta un espectro ascendente de ~ 0.5 a ~ 1.1 indicando una composición relativamente homogénea. Por último, en el diagrama de correlación $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ vs. $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ se observa una línea recta, con un MSWD=0.61, definida por siete fracciones. El inverso de la intercepción de la línea recta con el eje de las ordenadas indica que el ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$), es ligeramente mayor que el valor atmosférico (295.5), es decir se infiere la presencia de un exceso de argón. Por esta razón la mejor estimación de la edad de la muestra CPR 09-09 debe ser tomada del inverso de la intercepción de la línea recta con el eje de las abscisas, el cual arroja una edad de 16.51 ± 0.64 Ma (Figura 8c). Esta edad es congruente con las relaciones y evidencias geológicas de campo, que aunadas a las relaciones petrográficas y geoquímicas indican que el miembro volcánico Cerro Prieto corresponde a pulsos magmáticos del Mioceno temprano-medio.

El análisis de la dacita CLNR12-01A, correspondiente a una facies

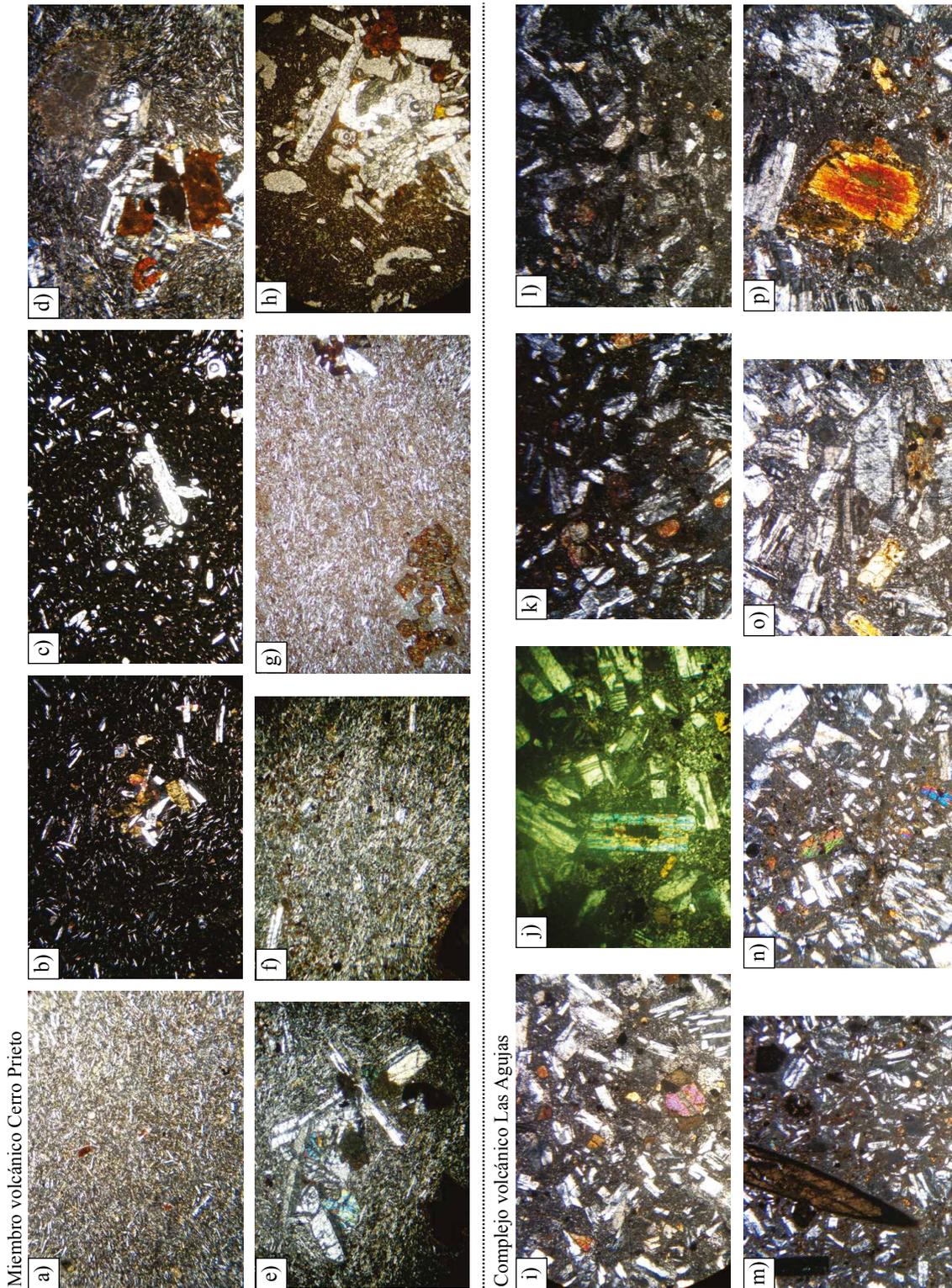


Figura 4. a-h: Fotografías de secciones delgadas del miembro volcánico Cerro Prieto. a) muestra CL08-00 mostrando la facies lajeada; b) muestra CLNR10-01A exponiendo una facies más vítrea; c) muestra CLNR10-02A exhibiendo una textura traquítica; d) muestra ALL09-01 de la facies lajeada con un grupo de fenocristales de $Pl > Cpx > Ol$; e) muestra CPR09-01 con fenocristales de $Pl > Opx = Cpx$; f) muestra CPR09-01, en la que se observa una banda color marrón de un flujo donde ocurren pequeños cristales de olivino iddingsitizado; g) muestra CPR09-09 exponiendo un fenocristal esquelético de olivino con bordes iddingsitizados; y h) muestra CPR09-03 mostrando fenocristales agrupados de $Pl > Cpx > Opx > Ol$. i-p: Fotografías de secciones delgadas del complejo volcánico Las Agujas: i) muestra CLNR10-03A correspondiente al nivel intermedio de un derrame, mostrando fenocristales de $Pl > Cpx$; j) muestra CLNR10-03A exponiendo un fenocristal de Opx en desequilibrio; k) muestra CLNR10-04A correspondiente a la brecha de base de un derrame; l) muestra CLNR10-05A de la facies superior lajeada de un derrame; m) muestra BET08-03 brecha de arrastre, mostrando algunos megacristales de hornblenda; n) muestra CCR09-02 mostrando la textura muy porfídica de Pl y Cpx ; o) muestra BET08-01A correspondiente al intrusivo hipabisal, aquí se muestra uno de los glómeros con $Opx = Cpx$; y p) muestra CLCRS10-02A exponiendo un fenocristal de Cpx con bordes oxidados.

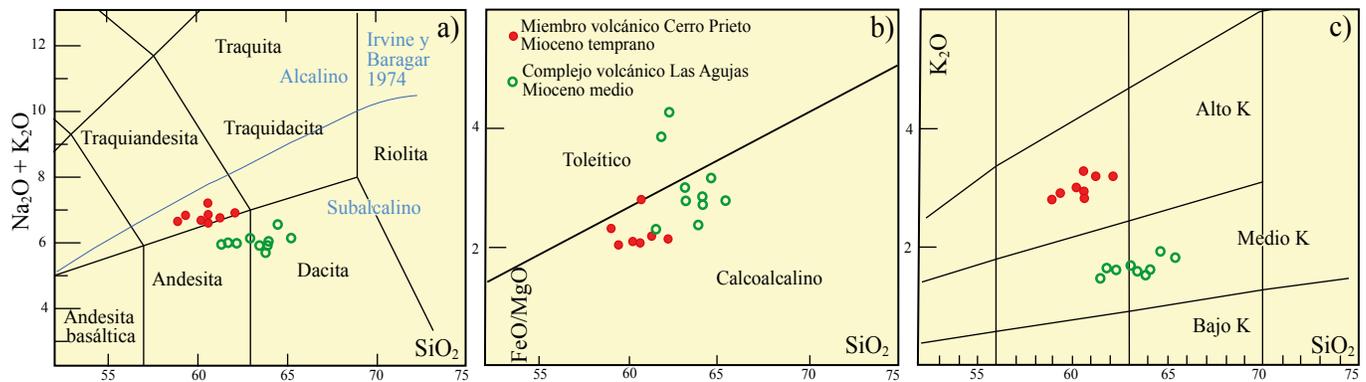


Figura 5. a) Diagrama TAS (álcalis vs. sílice; Le Bas *et al.*, 1986), con la línea divisiva entre la serie alcalina y subalcalina de Irvine y Baragar (1974); b) diagrama para la subdivisión de la serie subalcalina en las series calcoalcalina y toleítica [SiO₂ vs. (FeO/Mg)] propuesto por Miyashiro (1974); y c) diagrama (K₂O vs. SiO₂) para separar las rocas en series dependiendo de su contenido en K (Peccerillo y Taylor, 1976 y Le Maitre, 2002).

hipabisal del complejo volcánico Las Agujas, se realizó con un concentrado de plagioclasa. Los resultados obtenidos para dos experimentos con un total de 15 pasos de fusión con láser, reflejan un espectro de edad relativamente homogéneo (Figura 8d). Los experimentos arrojan resultados reproducibles, liberando más del 60% del ³⁹Ar en las fracciones colectadas aplicado una potencia del láser entre 1 y 6 Watts. Para el segundo experimento, las ocho fracciones colectadas cumplen los criterios para calcular una edad de meseta de 14.88 ± 0.47 Ma (Tabla 3b). El diagrama ³⁷Ar_{Ca}/³⁹Ar_K (Figura 8e) sugiere una composición variable en relación al Ca/K para el concentrado de plagioclasa analizado, ya que las fracciones liberadas a baja temperatura se caracterizan por valores de ³⁷Ar_{Ca}/³⁹Ar_K de ~6, en contraste con las fracciones colectadas a alta temperatura con un ³⁷Ar_{Ca}/³⁹Ar_K de ~12 (Tabla 3b). Sin embargo, esto no afecta al geocronómetro K-Ar, debido a que se obtuvo un espectro de edad casi plano. Además, en el diagrama de correlación ³⁶Ar/⁴⁰Ar vs. ³⁹Ar/⁴⁰Ar (Figura 8f), los datos de las 15 fracciones colectadas se alinean para definir una línea recta (MSWD = 0.84) que arroja una edad de isócrona de 14.80 ± 0.65 Ma, estadísticamente indistinguible de la edad de meseta. Debido a la mejor precisión de la edad de meseta ($t_p = 14.88 \pm 0.27$ Ma) se toma ésta edad como la mejor estimación de la edad de la muestra CLNR12-01A. La edad de meseta es congruente con las relaciones y evidencias de campo, que indican que el complejo volcánico Las Agujas sobreyace al MVCP y corresponde a un evento del Mioceno medio.

DISCUSIÓN

Magmatismo del Oligoceno-Mioceno en Sonora

Numerosas rocas volcánicas con edades oligo-miocénicas, que ocurren asociadas con unidades detríticas, han sido reportadas en otras regiones de Sonora, a excepción de la región costera, donde sólo se conocen en la porción norte. Estos registros volcánicos son más antiguos que 14 Ma, pero más jóvenes que 25 Ma y poseen un carácter orogénico (McDowell y Roldán-Quintana, 1991; Bartolini *et al.*, 1994; McDowell *et al.*, 1997; Gans, 1997; Mora-Álvarez y McDowell, 2000), y han sido asociados a un contexto de tipo arco continental (Till *et al.*, 2009). En conjunto, estas lavas altamente porfíricas de plagioclasa, presentan composiciones intermedias, que corresponden en parte a series magmáticas calcoalcalinas a shoshoníticas (Vidal-Solano *et al.*, 2008b). Los afloramientos de estas rocas cercanos al área de estudio ocurren primeramente al sur de Rayón (Figura 1a), en las regiones de San Miguel de Horcasitas y de la mina La Colorada (Figura 1a). En

estas localidades, Vidal-Solano (2005) reportó la presencia de domos y de coladas de composición intermedia a félsica. Estas rocas varían de andesitas basálticas, andesitas con alto contenido en sílice, hasta dacitas, y se caracterizan por la coexistencia de dos piroxenos y por presentar una afinidad calcoalcalina. Por otra parte, Bartolini *et al.* (1994) reportan al menos 13 localidades donde se han estudiado rocas volcánicas que van desde basaltos hasta dacitas que se intercalan con rocas detríticas continentales, las cuales produjeron edades K-Ar desde ~24 a 14 Ma. Al oeste del área de estudio, este tipo de rocas ha sido también estudiado en la región de Trincheras (Tarazón-Pacheco, 2002; Tarazón-Pacheco y Paz-Moreno, 2004; Tarazón-Pacheco, 2007; Figura 1a), donde se ha propuesto una edad menor a 25 Ma. Más al oeste, las rocas volcánicas similares que afloran al norte de Caborca (Figura 1a) fueron fechadas en 24.34 Ma (Izaguirre-Pompa, 2006). En ese lugar se distinguió una secuencia volcánica de composición intermedia constituida por: 1) dacitas calcoalcalinas ricas en potasio, y 2) dacitas, traquitas y latitas calcoalcalinas que contienen valores más elevados de potasio, alcanzando el dominio de las rocas shoshoníticas. Al noreste de la región de estudio, dentro de la zona tectónica distensiva de los ríos Batepito y Bavispe, se han reportado importantes volúmenes de lavas con las mismas características petrológicas en las que se obtuvo una edad de 22.2 ± 0.9 Ma (Paz-Moreno *et al.*, 2009). Así mismo, se han reportado stocks con afinidad calcoalcalina en la región de Sobai Satechi (Almirudis-Echeverría, 2010), los cuales han sido atribuidos al Mioceno temprano (Figura 1a). Por otra parte, en la región de Arizpe, González-León *et al.* (2010) obtuvieron edades de 25 y 18 Ma en importantes secuencias de basaltos y traquiandesitas basálticas ricas en K₂O (Paz-Moreno *et al.*, 2009), que han sido relacionadas a la tectónica distensiva *Basin and Range*. También, González-Becuar (2011) reporta la presencia de algunos plutones con edades de 19.8 ± 0.2 y 19.2 ± 1.2 Ma (Gabro Garambullo y Granodiorita Las Mayitas, respectivamente), que se emplazaron de forma contemporánea a la extensión *Basin and Range* en el área de Puerta del Sol (Figura 1a). En síntesis, el registro encontrado en las unidades volcánicas reportadas en la literatura (Figura 9) indica que esas rocas pueden ser solo correlacionadas con las del evento magmático más antiguo aquí estudiado (miembro volcánico Cerro Prieto).

Rasgos geoquímicos de los magmas oligo-miocénicos de Sonora

A fin de evidenciar los rasgos geoquímicos de las lavas oligo-miocénicas de Sonora descritas con anterioridad, se recopilaron los datos geoquímicos existentes en la literatura. Estos datos muestran, por un lado, que las lavas poseen una firma de arco, con concentraciones

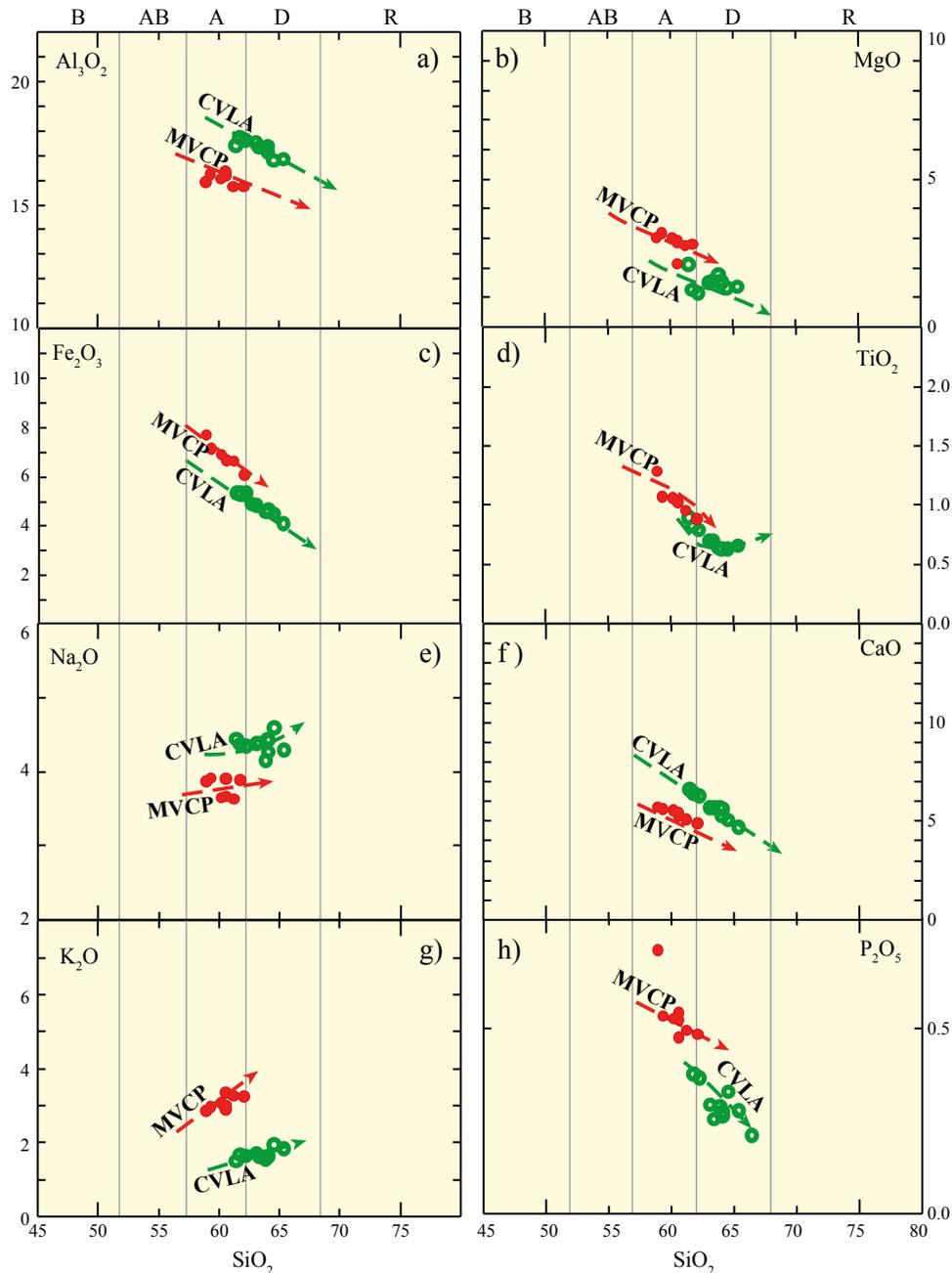


Figura 6. a-h: Diagramas de tipo Harker, mostrando la variación en el contenido de los óxidos mayores en función del contenido de SiO_2 , para las rocas magmáticas orogénicas del Mioceno de Rayón, Sonora. MVCP: Miembro volcánico Cerro Prieto, CVLA: Complejo volcánico Las Agujas.

continúa

de elementos traza muy similares, que se caracterizan por un mayor enriquecimiento en elementos incompatibles de alto potencial iónico (HFSE, *high field strength elements*), una ligera anomalía en Eu y una anomalía negativa en Nb y Ta acentuada, en comparación con las firmas del Manto Primitivo (MP, Fitton *et al.*, 1991; Figuras 7a y 7b). Todos estos líquidos tienen valores de Nb/Y de 0.5–0.6, próximos a los de una fuente de tipo MORB o inclusive de tipo Manto Primitivo, aunque con cocientes elevados de Ba/Nb y Ba/Y (70–90 y 40–50 respectivamente), que indican una participación importante de un componente de subducción, sin descartar la posibilidad de un fenómeno de contaminación cortical en estos magmas.

Diferenciación magmática

Una característica petrográfica en las lavas de la región de Rayón son las numerosas evidencias de disequilibrio en sus minerales. La presencia de fenocristales de plagioclasa con textura en tamiz (*sieve-textured feldspar*; MacKenzie *et al.*, 1982) y la ocurrencia de agrupaciones de fenocristales de olivino, que aparecen selectivamente oxidados en las latitas del miembro volcánico Cerro Prieto, evidencian en su génesis la interacción entre líquidos magmáticos de composiciones contrastantes. En el campo, algunos de las lavas de esta unidad muestran una alternancia de bandas con tonalidades claras y oscuras que indican el flujo de los derrames (Figuras 3d y 3e), denotando petrográficamente

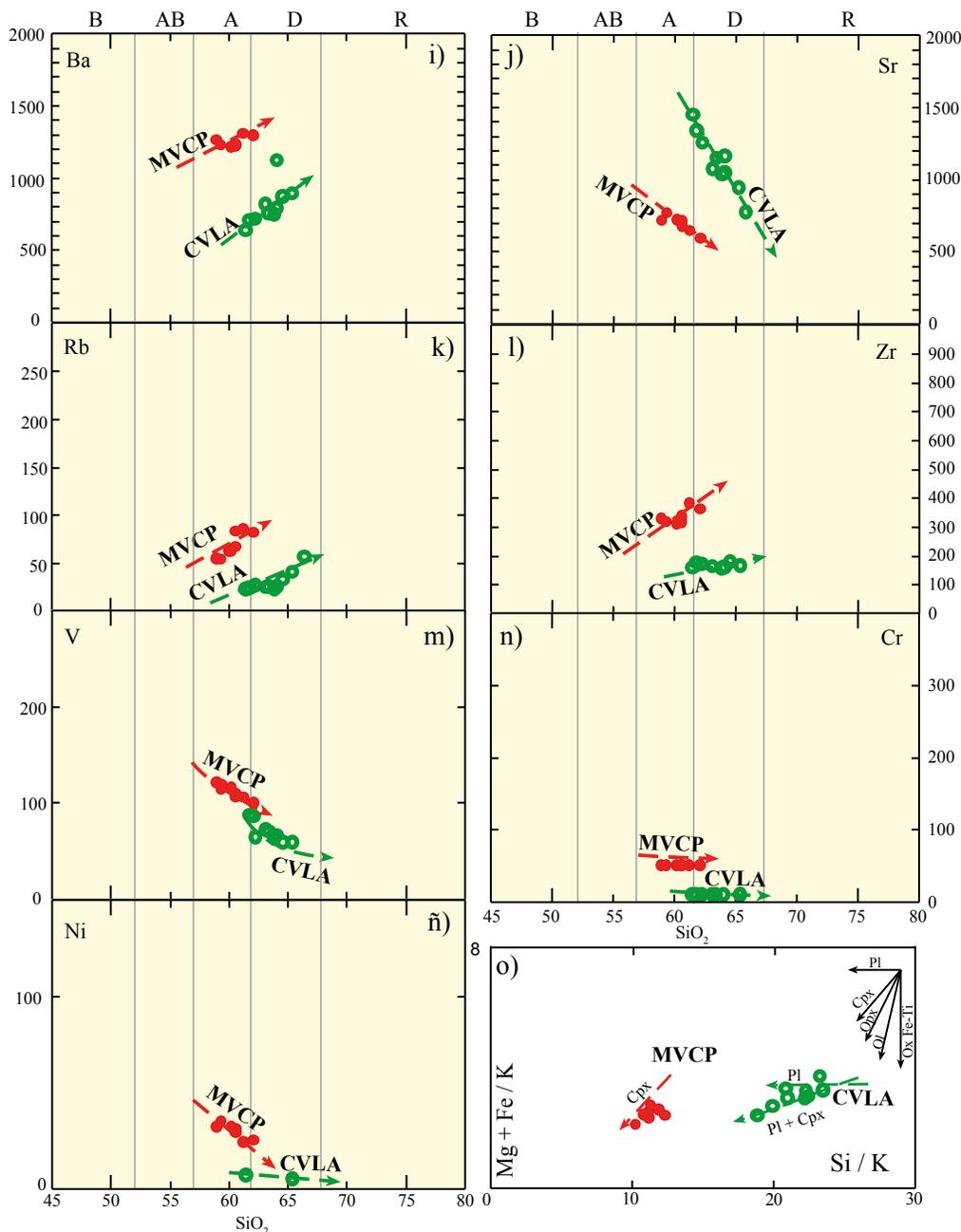


Figura 6 (cont.). i-ñ: Diagramas de variación de elementos traza en función del contenido de SiO₂; y o) diagrama Si/K vs. Mg+Fe/K de McBirney (1993) mostrando los minerales dominantes durante la cristalización fraccionada para el miembro volcánico Cerro Prieto (MVCP) y el complejo volcánico Las Agujas (CVLA). Pl: plagioclasa; Cpx: clinopiroxeno; Opx: ortopiroxeno; Ol: olivino; Ox Fe-Ti: óxidos de Fe y Ti.

que el cambio de coloración resulta de una inmiscibilidad de líquidos magmáticos (Gómez-Valencia *et al.*, 2009 y Gómez-Valencia *et al.*, 2010). Este proceso ha sido identificado y estudiado con anterioridad en las rocas volcánicas intermedias del Mioceno temprano de Sonora central, por medio de análisis de microsonda electrónica en las asociaciones minerales de cada líquido magmático (Vidal-Solano, 2005). Por otro lado, el buen desarrollo de los fenocristales y de los cúmulos en estas lavas indica una etapa temprana de cristalización durante un periodo de residencia en la corteza. Probablemente, después de esta etapa, el olivino fue alterado por un cambio en la fugacidad del oxígeno durante su ascenso hacia la superficie.

Las dacitas del CVLA, aunque muestran valores más altos en sílice y cierta similitud en las características geoquímicas de las rocas del MVCP, tiene rasgos distintivos que muestran que no es posible generar esos magmas a partir de la diferenciación de los líquidos latíticos del miembro volcánico Cerro Prieto. Estos rasgos son: (1) una concentración más elevada de Al₂O₃, Na₂O, CaO y Sr, así como un patrón de variación diferente en los diagramas tipo Harker (Figura 6); (2) una menor concentración de las REE y, finalmente, (3) una ausente anomalía negativa en Eu (Figura 7a), sugiriendo además que la cristalización fraccionada de plagioclasa no juega un papel tan importante en su génesis.

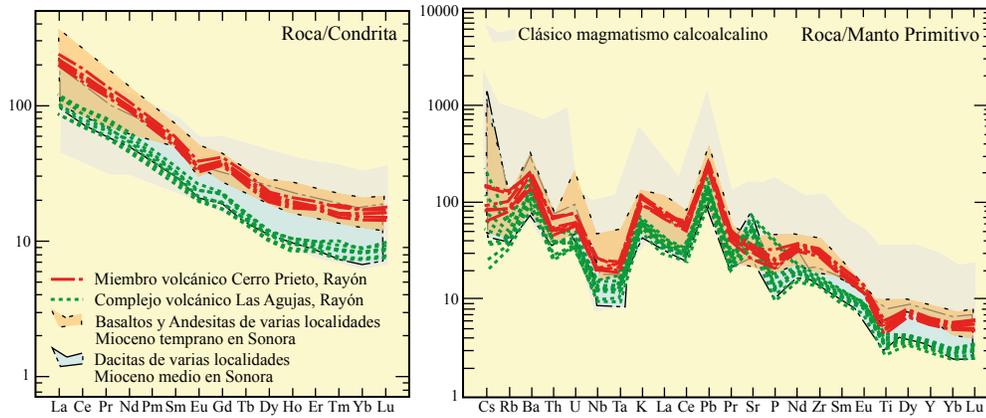


Figura 7. a) Diagrama de elementos de las Tierras Raras normalizado a condrita; b) diagrama multielemental normalizado a manto primitivo. Valores de normalización para ambos diagramas según Sun y McDonough, (1989). En ambos diagramas se incluyen, con fines de comparación, datos de rocas andesíticas y basálticas del Mioceno inferior y de rocas dacíticas del Mioceno medio de Sonora, reportados en las publicaciones mencionadas en la Figura 1.

Tabla 3. Resultados obtenidos para cada etapa de calentamiento en el análisis por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de: a) matriz correspondiente a la muestra CPR09-09 del miembro volcánico Cerro Prieto. Los datos de fracciones a, b, c, d, e, i y j se utilizaron en el diagrama de correlación $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ vs. $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ para estimar la edad de isócrona; y b) plagioclasa correspondiente a la dacita CLNR12-01A del complejo volcánico Las Agujas. Se combinaron las 15 fracciones de los dos experimentos realizados en el diagrama de correlación $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ vs. $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ para estimar la edad de isócrona.

a)

Potencia	$^{39}\text{Ar} \times 10^{-6}$	F ^{39}Ar	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_K$	1 σ	Edad en Ma	1 σ	% $^{40}\text{Ar}^*$	$^{37}\text{Ar}_{Ca}/^{39}\text{Ar}_K$
0.3	177.248	0.0422	5.53	0.64	33.53	3.82	a	5.34
0.6	432.098	0.1029	3.41	0.23	20.72	1.38	b	9.41
0.9	611.869	0.1458	3.23	0.12	19.67	0.73	c	14.81
1.2	664.140	0.1582	3.06	0.10	18.64	0.62	d	19.23
1.5	552.181	0.1315	2.98	0.11	18.15	0.66	e	21.85
1.8	382.730	0.0912	2.13	0.15	13.00	0.90	f	15.54
2.1	302.338	0.0720	2.30	0.12	14.01	0.73	g	14.17
2.6	363.319	0.0865	2.61	0.19	15.87	1.17	h	12.47
3.5	407.718	0.0971	3.35	0.15	20.37	0.88	i	15.16
5.0	304.683	0.0726	2.96	0.22	18.03	1.33	j	14.43

Resultados integrados

$^{39}\text{Ar} \times 10^{-6}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_K$	1 σ	Edad en Ma	1 σ	% $^{40}\text{Ar}^*$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}_{Ca}/^{39}\text{Ar}_K$
4196.0	3.06	0.09	18.61	0.56	13.03	339.79	0.75

b)

Potencia	$^{39}\text{Ar} \times 10^{-6}$	F ^{39}Ar	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_K$	1 σ	Edad en Ma	1 σ	% $^{40}\text{Ar}^*$	$^{37}\text{Ar}_{Ca}/^{39}\text{Ar}_K$
2.00	43.362	0.3324	2.85	0.17	16.11	0.98	a	54.87
4.00	31.200	0.2391	2.70	0.18	15.26	1.03	b	88.30
6.00	14.365	0.1101	2.71	0.36	15.32	2.04	c	89.47
8.00	7.805	0.0598	1.87	0.60	10.59	3.40	d	40.64
10.00	6.677	0.0510	3.71	0.66	20.94	3.72	e	70.84
12.00	15.970	0.1218	2.48	0.35	14.00	1.96	f	51.60
13.00	11.237	0.0857	2.67	0.47	15.10	2.65	g	43.55
1.00	35.857	0.1954	2.84	0.18	16.06	1.01	h	51.14
2.00	32.852	0.1790	2.65	0.21	14.97	1.21	i	75.39
3.00	21.647	0.1178	2.51	0.19	14.22	1.06	j	81.60
4.00	25.053	0.1363	2.64	0.23	14.93	1.31	k	84.86
6.00	20.114	0.1094	2.46	0.23	13.89	1.30	l	71.78
8.00	11.047	0.0601	3.08	0.44	17.41	2.45	m	77.82
10.00	18.283	0.0991	2.72	0.29	15.38	1.61	n	58.85
12.00	18.961	0.1029	2.14	0.36	12.11	2.04	o	31.15

Resultados integrados

$^{39}\text{Ar} \times 10^{-6}$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_K$	1 σ	Edad en Ma	1 σ	% $^{40}\text{Ar}^*$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}_{Ca}/^{39}\text{Ar}_K$
129.9	2.72	0.11	15.39	0.64	61.28	763.13	8.13
182.9	2.63	0.09	14.86	0.50	61.44	766.40	7.59

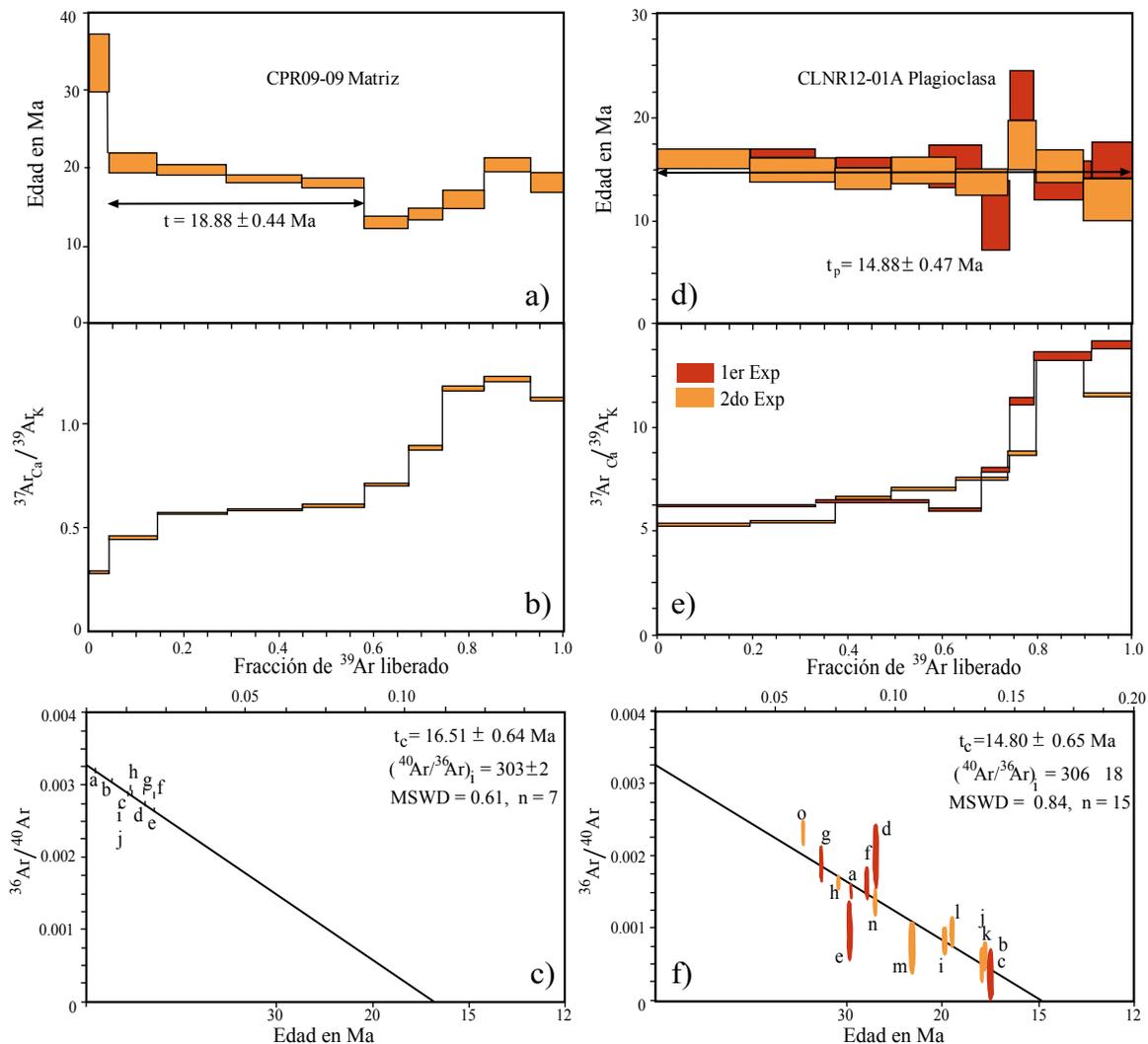


Figura 8. a) Espectro de edad para la muestra CPR09-09 del miembro volcánico Cerro Prieto; la flecha indica la mejor estimación propuesta para una edad de meseta (t_p); b) diagrama $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ para la muestra CPR09-09; c) diagrama de correlación $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ vs. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$; se ignoraron las fracciones f, g y h para calcular la edad de isócrona (t_c); d) espectro de edad para la muestra CLNR12-01A del complejo volcánico Las Agujas; la flecha indica la mejor estimación propuesta para una edad de meseta (t_p); e) diagrama $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ para la muestra CLNR12-01A; f) Diagrama de correlación $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ vs. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ para el cálculo de la edad de isócrona (t_c).

Tendencia adakítica de las secuencias volcánicas

Adakita es un término geoquímico relativamente nuevo, que fue propuesto originalmente para referirse a un grupo petrológico de rocas silíceas de arco, producidas de forma primaria por la fusión directa de la parte basáltica de la corteza oceánica subducida (Defant y Drummond, 1990) y, que ha sido reconocida en la mitad de los arcos volcánicos activos del planeta (Martin, 1999). Estas rocas se caracterizan por sus relaciones elevadas de Sr/Y (>20) y La/Yb (<20) y por los contenidos bajos de Y (<15ppm) y Yb (<1.9ppm). En los últimos años se ha propuesto que la geoquímica de las adakitas puede explicarse por la fusión del *slab* en subducción, sin embargo, se ha indicado que una gran variedad de rocas con características químicas similares no se forman necesariamente a través de la fusión del *slab* sino que pueden derivarse de mezclas entre magmas provenientes de la fusión del *slab* y magmas derivados de la cuña del manto astenosférico, e inclusive de la fusión de un manto astenosférico metasomatizado por magmas derivados del *slab*. A estas últimas rocas que presentan una tendencia adakítica, independientemente de la fuente de la que

proviengan, Castillo (2006) proponen considerarlas como “rocas adakíticas” con el propósito de reservar exclusivamente el término “adakita” a las rocas derivadas de la fusión del *slab*. Es bajo esta consideración, que en el presente trabajo se pone en realce la afinidad adakítica de las rocas de Rayón, como un rasgo geoquímico particular en el miembro volcánico Cerro Prieto y en el complejo volcánico Las Agujas, que muestra una importante concentración en Sr, un fuerte empobrecimiento en Y y un marcado fraccionamiento de HREE en los espectros de REE (Figuras 7 y 10). Este rasgo, característico de las rocas adakíticas (Castillo, 2006), ha sido recientemente reconocido en los plutones del arco cretácico tardío que forman el basamento en la parte este-central del Estado de Sonora (Pérez-Segura et al., 2009). Una diferencia importante en las rocas adakíticas de Rayón es que las lavas del MVCP poseen un contenido menor en SiO_2 , que es análogo al de adakitas bajas en sílice (*LSA*, *low silica adakites* de Martin et al., 2005), así como al de las bajaitas reportadas por Rogers et al. (1985), o al de las andesitas magnesianas de Richards y Kerrich (2007). Por otro lado, de acuerdo con los contenidos más elevados de SiO_2 en las

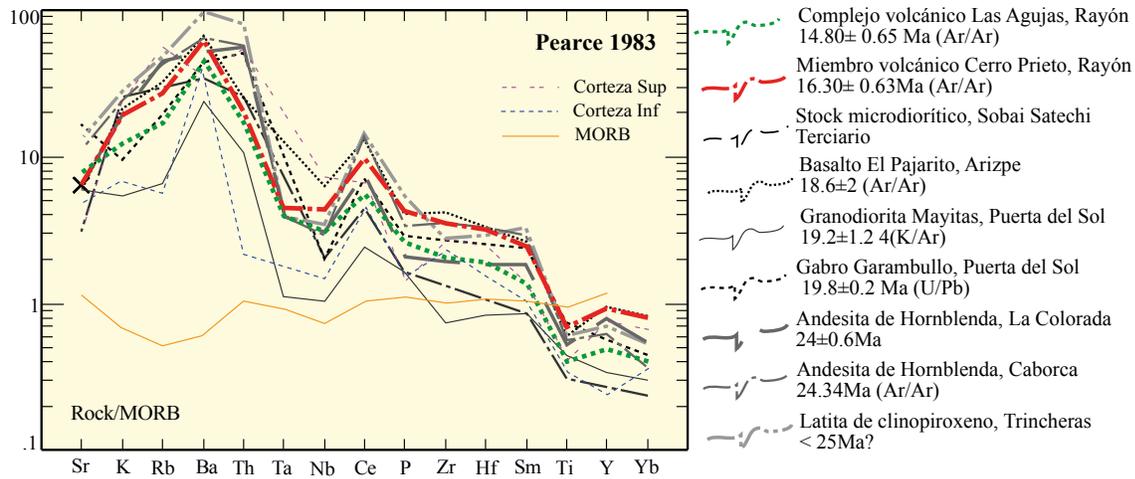


Figura 9. Diagrama multielemental normalizado a MORB (Pearce, 1983), mostrando los datos de corteza superior, corteza inferior, MORB (Wilson 1989) y la correlación geoquímica de los espectros representativos de las rocas aquí estudiadas con las reportadas para el magmatismo oligo-miocénico de Sonora: La Colorada y San Miguel de Horcasitas (Vidal-Solano, 2005), Sierrita Prieta, Trincheras (Tarazón-Pacheco, 2002; Tarazón-Pacheco y Paz-Moreno, 2004; Tarazón-Pacheco, 2007), Caborca (Izaguirre-Pompa, 2006), Batepito- Bavispe (Paz Moreno et. al 2009), Puerta del Sol, Ures (González-Becuard, 2011), Arizpe (González-León, 2010) y Sobai Satechi (Almirusid-Echeverría, 2010).

lavas de la CVLA, éstas coinciden con los de las características de las adakitas altas en sílice (HSA, *high silica adakites* de Martin *et al.*, 2005). Esta diferencia química en los dos grupos de distintas edades realiza su distinción, sugiriendo una evolución en los procesos petrogenéticos que los originaron.

CONCLUSIONES

Los resultados del estudio geoquímico y geocronológico en las rocas de los últimos eventos volcánicos en la región de Rayón, Sonora, indican que se trata de magmas orogénicos generados en un ambiente de arco continental durante el Mioceno temprano a medio. Los derrames del miembro volcánico Cerro Prieto

corresponden a lavas potásicas de tipo latita que han sido fechadas en 16.51 ± 0.64 Ma mediante el método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (roca total). El complejo volcánico Las Agujas corresponde a cuellos volcánicos y derrames de dacita que produjeron una edad de 14.88 ± 0.47 Ma. Los datos geoquímicos indican que las lavas del miembro volcánico Cerro Prieto corresponden a adakitas bajas en sílice (*low silica adakites*), mientras que las del complejo volcánico Las Agujas corresponden a adakitas altas en sílice (*high silica adakites*). Esta característica petrológica muestra que los magmas adakíticos evolucionaron en el tiempo dentro de los últimos registros del arco continental en la región, quedando por explicar su significado geodinámico, el cual pudiera estar relacionado a una configuración particular de las unidades litosféricas implicadas en el final del proceso de subducción.

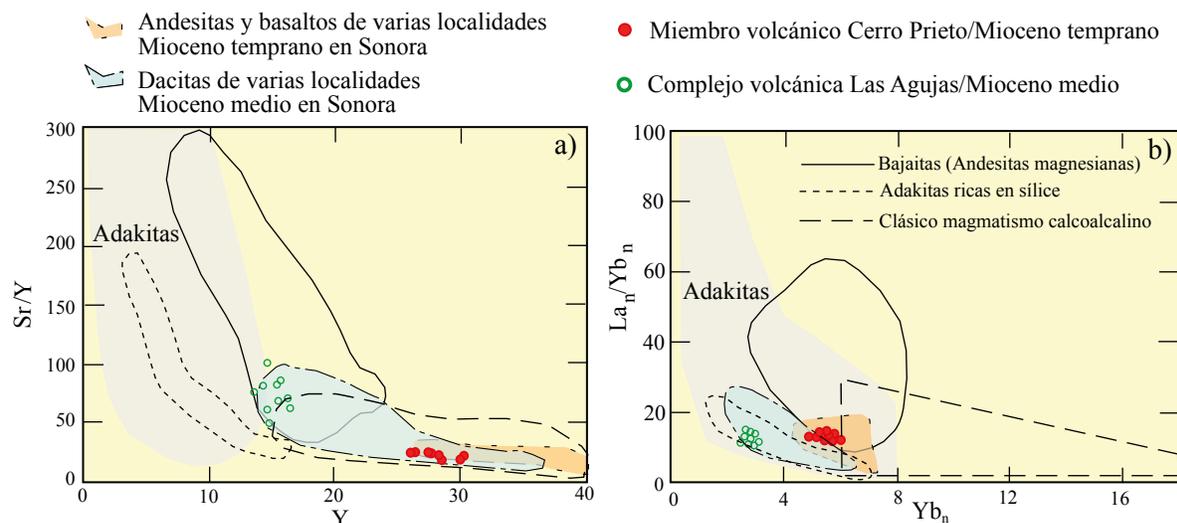


Figura 10. Diagramas que definen criterios discriminantes para magmas adakíticos donde se han incluido, para comparación, datos de rocas andesíticas y basálticas de varias localidades del Mioceno temprano y, de rocas dacíticas del Mioceno medio en Sonora (ver fuentes de los datos en las Figuras 1 y 10). a) Diagrama discriminante Y vs. Sr/Y propuesto por Defant y Drummond (1990); y b) diagrama discriminante para adakitas Yb_n vs. La_n/Yb_n tomado de Defant y Drummond (1990), Martin (1999) y Castillo (2008).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por los proyectos de ciencia básica CONACYT CB 061198 y 180784 a cargo del Dr. Jesús Roberto Vidal Solano. Esta investigación forma parte del desarrollo de las tesis de Licenciatura y Maestría del primer autor, bajo los temas "Petrografía y geoquímica del volcanismo Oligoceno-Mioceno medio en Rayón, Sonora: énfasis en el estudio y significado del volcanismo hipercalino en la región" y "Evolución espacio-temporal y petrológica del magmatismo Oligoceno-Mioceno en Sonora, México: Énfasis en el magmatismo adakítico relacionado al cese de la subducción", respectivamente. Los autores desean extender un agradecimiento especial, por el apoyo recibido en la preparación de muestras para geoquímica al Quím. Pablo Peñaflor Escárcega de la ERNO- UNAM; para la preparación de secciones delgadas a la Geol. Aimée Orcí de la ERNO- UNAM; y al MC. Abraham Mendoza Córdova del Laboratorio de Cristalografía y Geoquímica del Depto. de Geología, UNISON por su apoyo en los análisis químicos de algunos ejemplares. A Víctor Pérez Arroyo del Depto. de Geología del CICESE por su apoyo en la preparación de secciones delgadas y a Miguel Angel García García y A. Susana Rosas Montoya del Depto. de Geología del CICESE por su colaboración para la obtención de los resultados ⁴⁰Ar-³⁹Ar. Al Dr. Alain Demant por sus valiosos comentarios y revisiones de apoyo a este manuscrito. Sin lugar a duda este trabajo ha sido posible gracias a la hospitalidad y facilidades de acceso a las localidades permitidas por los señores Polo Cruz y Juan de Dios Cañedo del Rancho La Mesa del Corral y al Sr. Carlos Eduardo González Badilla del Rancho La Casa Colorada. Finalmente, agradecemos las valiosas revisiones, comentarios y sugerencias realizadas a este manuscrito por el Dr. Arturo Martín Barajas, el Dr. Arturo Gómez Tuena y por la Dra. Ma. Teresa Orozco Esquivel.

REFERENCIAS

- Aguillón-Robles, A., Calmus, T., Bellon, H., Maury, R.C., Cotton, J., Bourgois, J., Michaud, F., 2001, Late Miocene adakite and Nb-enriched basalts from Vizcaino Peninsula, Mexico: Indicators of East Pacific Rise subduction below southern Baja California: *Geology*, 29(6), 531-534.
- Almirudis-Echeverría, E., 2010, Petrogénesis y Geocronología ⁴⁰Ar-³⁹Ar del Plutonismo Laramídico del área Sobai Satechi, Sonora, México: Hermosillo, Sonora, México, Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Tesis de Licenciatura, 106 pp.
- Barrera-Guerrero, S., 2012, Contribución al estudio del evento volcánico hipercalino del Mioceno Medio en el NW de México: Petrología de la Sierra Libre, Sonora: Hermosillo, Sonora, México, Universidad de Sonora, Tesis de Maestría, 113 pp.
- Bartolini, C., Damon, P.E., Shafiqullah, M., Morales-Montaña, M., 1994, Geochronologic contributions to the Tertiary sedimentary-volcanic sequences ("Baucarit Formation") in Sonora, Mexico: *Geofísica Internacional*, 33(1), 67-77.
- Bryan, S.E., Orozco-Esquivel, T., Ferrari, L., López-Martínez, M., 2014, Pulling apart the mid to late Cenozoic magmatic record of the Gulf of California: is there a Comondú arc?, en Gómez-Tuena, A., Straub, S.M. Zellmer, G.F. (eds.) *Orogenic Andesites and Crustal Growth: Geological Society, London, Special Publications*, 385, 389-407, doi:10.1144/SP385.8.
- Calmus, T., Aguillón-Robles, A., Maury, R.C., Bellon, H., Benoit, M., Cotten, J., Bourgois, J., Michaud, F., 2003, Spatial and temporal evolution of basalts and magnesian andesites ("bajaites") from Baja California, México: the role of slab melts: *Lithos* 66(1), 77-105.
- Calmus, T., Pallares, C., Maury, R.C., Bellon, H., Pérez-Segura, E., Aguillón-Robles, A., Carreno, A.L., Bourgois, J., Cotten, J., Benoit, M., 2008, Petrologic diversity of Plio-Quaternary post-subduction volcanism in Baja California: an example from Isla San Esteban (Gulf of California, México): *Bulletin de la Société Géologique de France*, 179(5), 465-481.
- Cameron, K.L., Nimz, G.J., Kuentz, D., Niemeier, S., Gunn, S., 1989, Southern Cordilleran basaltic andesite suite, southern Chihuahua, Mexico: a link between tertiary continental arc and Flood basalt magmatism in Northern America: *Journal of Geophysical Research*, 94(B6), 7817-7840.
- Castillo, P.R., 2006, An overview of adakite petrogenesis: *Chinese Science Bulletin*, 51(3), 257-268.
- Castillo, P.R., 2008, Origin of the adakite-high-Nb basalt association and its implications for post-subduction magmatism in Baja California, México: *Geological Society of America Bulletin*, 120(3-4), 451-462.
- Castro-Rodríguez, A.A., Morfin-Velarde S., 1988, Geología de la carta Rayón, con énfasis en el área de Cerro de Oro, Sonora central: Hermosillo, Sonora, México, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Tesis de Licenciatura, 99 pp.
- Cerca-Martínez, L.M., Aguirre-Díaz G., López-Martínez M., 2000, The geologic evolution of southern Sierra de Guanajuato, México: a documented example of the transition from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt: *International Geology Review*, 42(2), 131-151.
- Cochemé, J.J., Demant, A., 1991, Geology of the Yécora area, northern Sierra Madre Occidental, Mexico, en Pérez-Segura E., Jacques-Ayala C. (eds.), *Studies of Sonoran geology: Geological Society of America Special Paper* 254, 81-94.
- Damon, P.E., Shafiqullah, M., Roldán-Quintana, J., Cochemé, J.J., 1983, El Batolito Laramide (90-40 Ma) de Sonora, en XV Convención Nacional de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Guadalajara, Jalisco, Mexico, Libro de resúmenes, 63-65.
- De la O-Villanueva, M., 1993, Sedimentología y Petrografía de la Formación Baucarit (Mioceno) en la cuenca de Tonichi-La Dura, Sonora, México: Hermosillo, Sonora, México, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Tesis de Maestría, 63 pp.
- Defant, M.J., Drummond, M.S., 1990, Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere: *Nature*, 347(6294), 662-665.
- Demant, A., 1984, The Reforma Caldera, Santa Rosalía area Baja California. A Volcanological petrological and mineralogical study, en Malpica-Cruz, V., Celis-Gutierrez, S., Guerrero-García, J., Ortlieb, L. (eds.), *Neotectonics and sea level variations in the Gulf of California area: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología*, 75-96.
- Dickinson, W.R., 1991, Tectonic setting of faulted Tertiary strata associated with the Catalina core complex in southeastern Arizona: *Geological Society of America Special Paper* 264, 106.
- Figueroa-Valenzuela, M.C., Grijalva-Haro, A.S., 1989, Geología de la hoja Opodepe H12D12, municipio de Opodepe, Sonora, México: Hermosillo, Sonora, México, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Tesis de Licenciatura, 83 pp.
- Fitton, J.G., James, D., Leeman, W.P., 1991, Basic magmatism associated with late Cenozoic extension in the western United States: compositional variations in space and time: *Journal of Geophysical Research*, 96(B8), 13693-13711.
- Gans, P.B., 1997, Large-magnitude Oligo-Miocene extension in southern Sonora: Implications for the tectonic evolution of northwest Mexico: *Tectonics*, 16(3), 388-408.
- Gastil, G., Krummenacher, D., Minch, J., 1979, The record of Cenozoic volcanism around the Gulf of California: *Geological Society of America Bulletin*, 90(9), 839-857.
- Gómez-Valencia, A.M., 2011, Petrografía y geoquímica del volcanismo Oligoceno- Mioceno medio en Rayón, Sonora: énfasis en el estudio y significado del volcanismo hipercalino en la región: Hermosillo, Sonora, México, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Tesis de Licenciatura, 142 pp.
- Gómez-Valencia, A.M., 2014, Evolución espacio-temporal y petrológica del magmatismo Oligoceno-Mioceno en Sonora, México: Énfasis en el magmatismo adakítico relacionado al cese de la subducción: Hermosillo, Sonora, México, Universidad de Sonora, Tesis de Maestría, 275 pp.
- Gómez-Valencia, A.M., Vidal-Solano, J.R., Castellón González, J., Olguín-Villa, A.E., Ortega Ochoa, R.E., 2009, Petrografía y geoquímica de la unidad volcánica Cerro Prieto, Rayón: comparación con el volcanismo potásico del Oligoceno-Mioceno de Sonora, en XIX Congreso Nacional de Geoquímica, Ensenada B.C.: Actas INAGEQ, 15(1), 41-47.
- Gómez-Valencia, A.M., Vidal-Solano, J.R., Barrera-Guerrero, S., Robles-Flores, E.D., 2010, Geoquímica de Rocas intrusivas y extrusivas con afinidad adakítica en la región de Rayón, Sonora, en XX Congreso Nacional de Geoquímica, Temixco, Morelos: Actas INAGEQ, 16(1), 235-240.

- González-Becuard, E., 2011, Geología, Geoquímica y Geocronología del área Puerta del Sol, Sonora central: México: Hermosillo, Sonora, México, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Tesis de Licenciatura, 65 pp.
- González-León, C.M., 1989, Estratigrafía y paleogeografía del Cretácico del área de Cerro de Oro, municipio de Rayón Sonora: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría, 103 pp.
- González-León, C.M., Valencia, V.A., López-Martínez, M., Bellon, H., Valencia-Moreno, M., Calmus, T., 2010, Arizpe sub-basin: A sedimentary and volcanic record of Basin and Range extension in north-central Sonora, Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 27(2), 292-312.
- Hausback, B.P., 1984, Cenozoic volcanic and tectonic evolution of Baja California Sur, Mexico, *en* Frizzell, V.A., Jr., (ed.), *Geology of the Baja California Peninsula: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section*, 39, 219-236.
- Huitrón-López, C.A., 2004, Geología de la región La Poza, municipio de Opodepe, Sonora, México: Hermosillo Sonora, México, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Tesis de Licenciatura, 62 pp.
- Irvine, T.N., Baragar, W.R., 1971, A guide to the Chemicals classification of the common volcanic Rocks: *Canadian Journal of Earth Science*, 8, 523-548.
- Izaguirre-Pompa, A., 2006, Estudio Petroológico y Geocronológico del volcanismo orogénico intermedio – ácido de edad Oligo-Mioceno del Norte de Caborca, Sonora, México: Hermosillo, Sonora, México, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Tesis de licenciatura, 80 pp.
- King, R.E., 1939, Geological reconnaissance in northern Sierra Madre Occidental of Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 50(11), 1625-1722, doi:10.1130/GSAB-50-1625.
- Kuiper, K.F., Deino, A., Hilgen, F.J., Krijgsman, W., Renne, P.R., Wijbrans, J.R., 2008, Synchronizing rock clocks of Earth history: *Science*, 320, 500-504, doi: 10.1126/science.1154339.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram: *Journal Petrology*, 27, 745-750.
- Le Maitre, R.W., Streckeisen A., Zanettin B., Le Bas, M.J., Bonin B., Bateman, P., Bellieni, G., Dudek, A., Efremova, S., Keller, J., Lameyre, J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H., Woolley, A.R., 2002, *Igneous rocks: A Classification and Glossary of Terms; Recommendation of the International Union of Geological Sciences, Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks: Reino Unido, Cambridge University Press*, 2a ed., 236 pp.
- Lonsdale, P., 1991, Structural patterns of the Pacific floor offshore of peninsular California, *en* Dauphin, J.P., Simoneit, B. (eds.), *The Gulf and Peninsular Province of the California: American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47*, 87-125.
- Mackenzie, W.S., Donaldson, C.H., Guilford C., 1982, *Atlas de Rocas Ígneas y sus Texturas: Barcelona, Ed. Masson, S.A.*, 149 pp.
- Martin, H., 1999, Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoides: *Lithos*, 46, 411-429.
- Martin, H., Smithies, R.H., Rapp, R., Moyen, J.-F., Champion, D., 2005, An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution: *Lithos* 79, 1-24.
- McBirney, A.R., 1993, *Igneous Petrology: Boston, Jones and Bartlett Publishers*, 2a ed., 508 pp.
- McDowell, F.W., Roldán-Quintana, J., 1991, Timing of late Tertiary extension in central Sonora, Mexico (resumen): *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 23(5), A247.
- McDowell, F.W., Roldán-Quintana, J., Amaya-Martínez, R., 1997, Interrelationship of sedimentary and volcanic deposits associated with Tertiary extension in Sonora, México: *Bulletin of the Geological Society of America*, 109, 1349-1360.
- McDowell, F.W., Roldán-Quintana, J., Connelly, J.N., 2001, Duration of Late Cretaceous- early Tertiary magmatism in east-central Sonora, México: *Bulletin of the Geological Society of America*, 113(4), 521-531.
- Miyashiro, A., 1974, Volcanic rock series in island arc and active continental margins: *American Journal of Science*, 274(4), 321-355, doi:10.2475/ajs.274.4.321.
- Mora-Álvarez, G., McDowell, F.W., 2000, Miocene volcanism during late subduction and early rifting in the Sierra Santa Úrsula of western Sonora, Mexico, *en* 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.
- Münch, P., 1993, *Pétrologie et géochimie des Tufs et des Roches Volcano-détritiques des Bassins Miocènes dans la Région du Sonora, Mexique. Contribution à l'étude du métamorphisme de très bas degré en contexte distensif: Francia, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille, Tesis de doctoral*, 224pp.
- Paz-Moreno, F.A., Jobin E., Demant A., 2009, La Sierra Basomari: Volcanismo potásico del Mioceno inferior en el NE de Sonora, México (resumen), *en* XIX Congreso Nacional de Geoquímica, Ensenada B.C., 15(1), 40.
- Paz-Moreno, F.A., Herrera-Urbina, S., Demant, A., Iriondo, A., Gracidas-Valdepeña, M., 2012, Cerro Prieto: Volcanismo orogénico andesítico-basáltico del Mioceno temprano, Puerto Peñasco, Sonora, México (resumen): *Geos*, 32(1), 279.
- Pearce, J.A., 1983, Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins, *en* Hawkesworth C.J., Norry, M.J., (eds.), *Continental basalts and mantle xenoliths: Cambridge, Mass., Shiva Publishing Ltd.*, 230-249.
- Peccerillo, A., Taylor, S.R., 1976, Geochemistry of Eocene cal-alkaline volcanic Rocks from the kastamonu area, Northern Turkey: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1), 63-81.
- Pérez-Segura, E., González-Partida, E., Valencia, V.A., 2009, Late Cretaceous adakitic magmatism in East-central Sonora, Mexico, and its relation to Cu-Zn-Ni-Co skarns: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 26(2), 411-427.
- Radelli, L., 1989, The Baucarit Problem: *Boletín del Departamento de Geología, Universidad de Sonora*, 6(1-2), 55-57.
- Richards, J.P., Kerrich, R., 2007, Special Paper: Adakite-like rocks: their diverse origins and questionable role in metallogenesis: *Economic Geology*, 102(4), 537-576.
- Rogers, G., Saunders, A.D., Terrell, D.J., Verma, S.P., Marriner, G.F., 1985, Geochemistry of Holocene volcanic rocks associated with ridge subduction in Baja California, Mexico: *Nature* 315, 389-392.
- Saunders, A.D., Rogers, G., Marriner, G.F., Terrell, D.J., Verma, S.P., 1987, Geochemistry of Cenozoic volcanic rocks, Baja California, Mexico: Implications for the petrogenesis of post-subduction magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 32(1-3), 223-245.
- Sawlan, M.G., 1986, *Petrogenesis of Late Cenozoic volcanic rocks from Baja California Sur, Mexico: University of California, Santa Cruz, Tesis Doctoral*, 174 pp.
- Sawlan, M.G., 1991, Magmatic evolution of the Gulf of California rift, *en* Dauphin, J.P., Simoneit, B.R. (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, *en* Frizzell, V.A., Jr. (ed.), *Geology of the Baja California Peninsula: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section*, 39, 237-251.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), 1999, Carta geológica, Rayón H12D22, Son., 1:50 000: Pachuca, Hgo., México, Consejo de Recursos Minerales (ahora Servicio Geológico Mexicano), 1 mapa.
- Steiger, R.H., Jäger, E., 1977, Subcommittee on Geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology: *Earth and Planetary Science Letters*, 36, 359-362.
- Sun, S.S., McDonough W.F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle compositions and process *en* Saunders A.D. Norry, M.J. (eds), *Magmatism in the ocean basins: Geological Society, London, Special Publications*, 42, 313-345, doi:10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19.
- Tarazón-Pacheco, R.A., 2002, *Petrología del volcanismo Terciario, Ranchos San Hipólito y El Cúmaro, municipio de Trincheras Sonora, México; Hermosillo, Sonora, México: Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Tesis de Licenciatura*, 65 pp.
- Tarazón-Pacheco, R.A., 2007, *Petrogénesis del volcanismo orogénico Terciario de la región de Sierrita Prieta, municipios de Trincheras y Benjamín Hill, Sonora, México: Hermosillo, Sonora, México, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Tesis de Maestría*, 86 pp.
- Tarazón-Pacheco, R.A., Paz-Moreno F.A., 2004, *Petrogénesis del volcanismo Terciario de la región de Sierrita Prieta, municipio de Trincheras*

- Sonora, México (resumen), en *Memorias del XIV Congreso Nacional de Geoquímica: Actas INAGEQ*, volumen 10(1), 111.
- Till, B.C., Gans, P.B., Spera, F.J., MacMillan, I., Blair, D.K., 2009, Perils of petrotectonic modeling: A view from southern Sonora, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186(3), 160-168.
- Umhoefer, P.J., Dorsey, R.J., Willsey, S., Mayer, L., Renne, P., 2001, Stratigraphy and Geochronology of the Comondú Group near Loreto, Baja California Sur, Mexico: *Sedimentary Geology*, 144(1-2), 125-147.
- Valenzuela-Rentería, M., 2001, Carta Geológica Carbó, escala 1:50,000: Hermosillo; Sonora, México: Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Tesis de Licenciatura, 61 pp.
- Vidal-Solano, J.R., 2005, Le volcanisme hyperalcalin d'âge Miocene Moyen du Nord-Ouest du Mexique (Sonora): Minéralogie, Géochimie, cadre géodynamique: Marseille, Francia, Universidad Paul Cézanne, Tesis de Doctorado, 256 pp.
- Vidal-Solano, J.R., Demant, A., Paz Moreno, F.A., Lapierre, H., Ortega-Rivera, M.A., Lee, J.K.W., 2008a, Insights into the tectonomagmatic evolution of NW Mexico: geochronology and geochemistry of the Miocene volcanic rocks from the Pinacate area, Sonora: *Geological Society of America Bulletin* 120, 691-708.
- Vidal-Solano, J.R., Lapierre, H., Stock, J.M., Demant, A., Paz Moreno, F.A., Bosch, D., Brunet, P., Amortegui, A., 2008b, Isotope geochemistry and petrogenesis of peralkaline Middle Miocene ignimbrites from central Sonora: relationship with continental break-up and the birth of the Gulf of California: *Bulletin de la Société Géologique de France* 179(5), 453-464 doi:10.2113/gssgfbull.179.5.453.
- Vidal-Solano, J.R., Lozano Santa Cruz, R., Zamora O., Mendoza-Cordova, A., Stock, J.M., 2013, Geochemistry of the extensive peralkaline pyroclastic flow deposit of NW Mexico, based on conventional and handheld X-ray fluorescence. Implications in a regional context: *Journal of Iberian Geology* 39(1), 121-130.
- Wilson, M., 1989, *Igneous Petrogenesis*: Dordrecht, Netherlands, Springer, 466 pp.
- York, D., Evensen, N.M., López-Martínez, M., De Basabe-Delgado, J., 2004, Unified equations for the slope, intercept, and standard errors of the best straight line: *American Journal of Physics*, 72(3), 367-375. <http://dx.doi.org/10.1119/1.1632486>.

Manuscrito recibido: Agosto 20, 2012
Manuscrito corregido recibido: Enero 26, 2015
Manuscrito aceptado: Febrero 21, 2015