



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
INSTITUTO DE GEOLOGÍA, ESTACIÓN REGIONAL DEL NOROESTE

**Geología de la Sierra los Mochos y Lomas de Arivaipa, Puerto  
Libertad, Sonora, México: implicaciones tectono-magmáticas en la  
evolución del Proto-Golfo de California**

**TESIS**  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
DOCTORA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**PRESENTA:**  
**ALEJANDRA MARISELA GÓMEZ VALENCIA**

**TUTOR:**  
Dr. Jesús Roberto Vidal Solano  
Departamento de Geología, UNISON

**MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR**  
Dr. Jesús Roberto Vidal Solano, Departamento de Geología, UNISON  
Dra. Laura Mori, Ingeniería, UNAM  
Dra. Margarita López Martínez, Departamento de Geología, CICESE  
Dr. Carlos González León, Instituto de Geología, ERNO-UNAM

Hermosillo, Sonora, junio 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
INSTITUTO DE GEOLOGÍA, ESTACIÓN REGIONAL DEL NOROESTE

**Geología de la Sierra los Mochos y Lomas de Arivaipa, Puerto  
Libertad, Sonora, México: implicaciones tectono-magmáticas en la  
evolución del Proto-Golfo de California**

**TESIS**  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTORA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**PRESENTA:**  
**ALEJANDRA MARISELA GÓMEZ VALENCIA**

**COMITÉ TUTOR**

Dr. Jesús Roberto Vidal Solano (Director)  
Dra. Laura Mori, Ingeniería (Miembro)  
Dra. Margarita López Martínez (Miembro)  
Dr. Carlos González León (Miembro)

**JURADO**

Dr. Alexander Iriondo Perrée, CGEO-UNAM (Presidente)  
Dra. Laura Mori, Ingeniería-UNAM (Vocal)  
Dr. Jesús Roberto Vidal Solano, UNISON (Secretario)  
Dr. José Antonio Pérez Venzor, UABCS (Suplente)  
Dra. Joann Stock, Caltech-USA (Suplente)

Tesis que forma parte del proyecto de ciencia básica CONACYT 180784  
Evolución geodinámica del Proto-Golfo de California: Énfasis en los vestigios  
volcánicos del Mioceno en Sonora, México.

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.

**c.Dra. Alejandra Marisela Gómez Valencia**  
Posgrado en Ciencias de la Tierra ERNO/UNAM

## **DEDICATORIA**

Esta tesis está dedicada a grandes personas  
que admiro con todo mi corazón y agradezco  
tanto apoyo, comprensión y amor:

A mi preciosa hija, Alexa Eleanor

A mi amado esposo, Luis Alberto

A mi increíble hermana, Arcelia Angelina

A mi gran amigo, Pablo Peñaflo

A mi familia presente y en el cielo

A Dios

¡Gracias infinitas!

## Agradecimientos

Especial agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme otorgado la beca doctoral durante el periodo febrero 2015- enero 2019.

Agradezco en gran medida al Dr. Jesús Roberto Vidal Solano, por haberme permitido la participación en su proyecto CONACYT 180784 “Evolución geodinámica del Proto-Golfo de California: Énfasis en los vestigios volcánicos del Mioceno en Sonora, México”, del cual además se produjo el financiamiento para el desarrollo de esta tesis doctoral. Gracias por todo su apoyo, por el aprendizaje obtenido, por la confianza, todos los comentarios constructivos y por su valiosa amistad.

Durante la etapa doctoral conté con tres comités de evaluación con quienes estoy íntegramente agradecida: (1) a mi comité tutor, Dra. Margarita López, Dra. Laura Mori, Dr. Carlos González León y Dr. Jesús Roberto Vidal Solano, gracias por el tiempo brindado cada semestre para evaluar mis avances doctorales; (2) a mi comité de candidatura doctoral, conformado por el Dr. Domingo Gimeno Torrente, la Dra. Joann Stock, el Dr. Luis Delgado Argote y Dr. Jesús Roberto Vidal Solano, muchas gracias por su apoyo e invaluable recomendaciones académicas y (3) a mi comité de grado constituido por, Dra. Joann Stock, Dra. Laura Mori, Dr. José Antonio Pérez Venzor, Dr. Alexander Iriondo Perrée, y Dr. Jesús Roberto Vidal Solano, muchas gracias por sus detalladas revisiones y apreciables sugerencias académicas y sobre todo, por aceptar ser parte de mi comité de titulación.

Un especial agradecimiento al Dr. Ricardo Vega Granillo, por acompañarme a campo, por su apoyo en el análisis estructural, por sus consejos académicos y por su invaluable amistad. También estoy totalmente agradecida con el Dr. Juan Carlos García y Barragán porque gracias a su tiempo, fungió como mi responsable académico y la ERNO pudo prestarnos un vehículo para realizar el primer trabajo de campo, así que mil gracias por acompañarme a campo en las primeras exploraciones a la Sierra Los Mochos, por todos sus consejos académicos, de la vida y su bonita amistad.

A la Geol. Aimée Adriana Orcí Romero, técnico de Laminación del Instituto de Geología de la Estación Regional del Noroeste por su apoyo en la elaboración de secciones delgadas, consejos e increíble amistad. Al Quím. Pablo Peñaflor Escárcega por la hospitalidad en su cubículo, por su invaluable amistad, apoyo mental, consejos y por su ayuda en la preparación de muestras de roca para análisis geoquímicos. Fue en este cubículo donde encontré amistad y sabiduría con el siempre tan querido club del café, gracias Pablo, Aimée, Juan Carlos, César†, Rosi, Alex y Raúl.

Durante este proceso doctoral tuve la oportunidad de realizar varias estancias de investigación donde tuve el apoyo de los siguientes investigadores: Dr. Domingo Gimeno Torrente, Quím. Rufino Lozano, Dr. Luigi Solari y Dr. Alexander Iriondo Perrée. Muchas gracias a todos ellos, sobre todo, al Dr. Gimeno, por ser como un padre para mí, en el momento que más lo necesité al otro lado del mundo.

También agradezco al Dr. César Jacques Ayala† por sus consejos, apoyo en la zona de estudio y su linda amistad.

A los dueños de los ranchos aledaños a la Sierra Los Mochos, por su apoyo con los accesos, hospitalidad y por la amistad que hemos entablado durante estos últimos 8 años, gracias a la Sra. Mony (Ramona) Tadeo León y a su esposo el Sr. Francisco Javier Campa Meléndrez, sin su apoyo no hubiera sido posible desarrollar el trabajo de campo.

A mi tesista Javier García Huerta derivado del reconocimiento geológico de la porción NW de Puerto Libertad, y de la porción Este de la Sierra Los Mochos, agradezco a mi tesista Gabriel Iván Herrera Acosta, gracias a ambos quiénes actualmente ya son geólogos. De la misma manera que agradezco a mis tesistas de maestría, las Ingenieras Mineras Aracely del Angel de la Cruz y Daniela Bojórquez Quintana, por todo su apoyo en varias etapas académicas.

Por su ayuda durante el trabajo de campo, agradezco a mis amigos Dr. Luis Velderrain, M.C. Javier García, I. M. Néstor Murrieta, Geol. Emmanuel Melgarejo, Ing. Dunnia Amigón, Ing. Luis Peña y Geol. Kevin Mexia; también muchas gracias a los estudiantes Carlos Armenta y Alfonso Robles.

A mis buenos compañeros y amigos de posgrado, Dra. Belem González, Dra. Alicia Sarmiento, Dr. Luis Velderrain, Dr. Arturo Barrón y c.Dr. Iván Espinoza, gracias por todos sus consejos y sobre todo por su valiosa amistad.

Por siempre apoyarme e incentivarme para cumplir mis metas, gracias a mis grandes amigos profes locos, Iván Espinoza y Arturo Barrón.

Por todas sus recomendaciones, por siempre impulsarme para culminar la etapa doctoral y por ayudarme con el inglés, mil gracias a mi amigo Dr. Raúl Lugo Zazueta. De igual manera muchas gracias al Dr. Francisco Abraham Paz Moreno y a la M.C. Alma Patricia Sámano Tirado, por el ánimo y estar siempre al pendiente de la culminación de esta importante etapa doctoral.

También agradezco a la M.C. Elizabeth Araux Sánchez, por no dejarme caer en esta etapa doctoral, por mostrarme el camino para seguir luchando por mis ideales y por abrirme las puertas en el mundo académico y de investigación aplicada con Fortalecimiento a la Minería Artesanal Sostenible (FAMA).

Por sus consejos, apoyo, amistad, por incluirme en su equipo de trabajo y por ser un gran ejemplo para nosotras en las Ciencias de la Tierra, infinitas gracias a la Dra. Diana María Meza Figueroa.

Sin lugar duda, en estos años de trabajo debo especial agradecimiento al Dr. Tomás Villegas Barba y a la M.A. Norah Olivia Armenta Icedo, ustedes saben cuánto apoyo fueron para mí.

A mis amigas, Adriana Hinojo, Adriana Aimée, Carmen Cecilia Bernal Terán, Ana María Espinoza Martínez y Adriana Piña Páez, que sería de mi sin su frescura mental.

Del Posgrado de Ciencias de la Tierra de la UNAM, agradezco el siempre tan rápido apoyo, aún con la distancia, de nuestras queridas Dra. María Colín, Araceli Chamán y María Luisa Reyes.

Casi para concluir, agradezco a la Universidad de Sonora, al Departamento de Geología y al Departamento de Ingeniería Civil y Minas, que por medio de los Dres. Silvia Martínez Retama, Francisco Javier Grijalva Noriega e Israel Miranda Pasos, obtuve apoyo en diversas ocasiones, sin su ayuda no hubiera sido posible culminar mi trabajo de campo o participar en eventos académicos.

Finalmente, todo mi agradecimiento a mi querida familia.

## Resumen

La Sierra Los Mochos (SLM) y Las Lomas de Arivaipa (LA) se localizan a 45 km al SW del poblado costero de Puerto Libertad, dentro del municipio de Pitiquito, Sonora. Cuentan con una extensión de 450 km<sup>2</sup> y su mayor elevación es de 640 msnm. La SLM presenta un basculamiento general al E y es fuertemente disectada por fallas asociadas a un evento de extensión oblicua sobrepuesto a otro ortogonal, lo cual provocó de manera general, la repetición de algunas unidades litológicas. En el área de LA, se identifican rasgos estructurales similares a los de la SLM, adicionando que la unidad volcánica que corona la secuencia muestra una morfología de flujo con pendiente al SW. Para ambos sectores, generalmente se aprecian orientaciones estructurales preferenciales NW-SE y NNW-SSE con echados generales hacia el NE. La cartografía geológica, el estudio petrográfico, geoquímico y de geocronología U-Pb en zircones, permitió establecer 9 grupos petrológicos: [1] basamento granítico Laramídico; [2] volcanismo tipo Sierra Madre Occidental; [3] sucesión sedimentaria tipo Báucarit con miembros volcánicos de arco; [4] volcanismo pre-rift; [5] depósitos ignimbríticos distales asociados al rift; [6] volcanismo toleítico de rift; [7] volcanismo synrift con tendencia adakítica; [8] conglomerados superiores; y [9] volcanismo alcalino de rift con peperitas ultrapotásicas.

Los rasgos geoquímicos del magmatismo estudiado, permite una clara distinción entre rocas orogénicas y anorogénicas. Estos rasgos los proporcionan principalmente las altas concentraciones en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO y MgO en las primeras, y de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> y K<sub>2</sub>O en las segundas. En cuanto a los elementos traza, los mejores discriminantes son el V, Zr y el Sr, siendo este último elemento, el que marca una total separación entre los grupos magmáticos al encontrarse relativamente con mayor concentración en las rocas orogénicas. Esta característica aporta un carácter adakítico y coincide con la alta ocurrencia de plagioclasa y anfíbol en varios episodios magmáticos de la SLM y LA, donde el magmatismo más joven con estas características presenta una edad U-Pb de 10.46 ± 0.19 Ma.

Finalmente, las relaciones petro-tectónicas encontradas en el área de estudio permiten evidenciar que, luego de la etapa final del arco volcánico Oligoceno-Mioceno relacionado con la subducción de las microplacas Soledad y Arguello, en el Rift Mioceno medio-tardío de la porción norte del Proto-Golfo de California, derivado en una cuenca pull apart ahora abandona, se produjo un importante volumen magmático de rift con firmas toleíticas, adakíticas, alcalinas y alcalinas ultrapotásicas, remarcando que la presencia del magmatismo de afinidad adakítica con edades tan jóvenes, se reporta por primera vez para el Estado de Sonora.

Esta tesis incluye material suplementario y el mapa geológico de la Sierra Los Mochos y de las Lomas de Arivaipa, Sonora, México.



## Abstract

The Sierra Los Mochos (SLM) and Las Lomas de Arivaipa (LA) are located 45 km SW of the coastal town of Puerto Libertad, within the municipality of Pitiquito, Sonora. They have an area of 450 km<sup>2</sup> and their highest elevation is 640 meters above sea level. The SLM presents a general tilt to the E and is strongly dissected by faults associated with an oblique extension event superimposed on an orthogonal one, which generally caused the repetition of some lithological units. In the LA area, structural features similar to those of the SLM are identified, adding that the unit that crowns the sequence shows a flow morphology sloping to the SW. For both sectors, preferential structural orientations NW-SE and NNW-SSE are generally appreciated with general dips towards the NE. The geological cartography, the petrographic, geochemical, and U-Pb geochronology study, allowed to establish 9 petrological groups: [1] Laramide granite basement; [2] Sierra Madre Occidental type volcanism; [3] Báucarit-type conglomerate with one of its volcanic arc members; [4] pre-rift volcanism; [5] distal ignimbritic deposits related to the rift; [6] tholeiitic rift volcanism; [7] syn-rift volcanism with adakitic tendency; [8] upper conglomerates; [9] alkaline rift volcanism with ultra-potassic peperites. The geochemical features of the studied magmatism allow a clear distinction between orogenic and anorogenic rocks. These traits are mainly provided by the high concentrations of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, and MgO in the former, and of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, and K<sub>2</sub>O in the latter. Regarding the trace elements, the best discriminants are V, Zr, and Sr; this last element is the one that marks a total separation between the magmatic groups, as it is found with a higher concentration in the orogenic rocks. This characteristic contributes an adakitic character and coincides with the high occurrence of plagioclase and amphibole in several magmatic episodes of the SLM and LA, where the youngest magmatism with these characteristics has a U-Pb age of 10.46 ± 0.19 Ma. Finally, the relationships found in the study area allow us to show that, after the final stage of the Petro-tectonics Oligocene-Miocene volcanic arc related to the subduction of the Soledad and Arguello microplates, in the mid-late Miocene Rift of the northern portion of the Proto-Gulf from California, derived in a pull apart basin that is abandoned, an important rift magmatic volume was produced with tholeiitic, adakitic, alkaline and ultrapotassic alkaline signatures, remarking that the presence of adakitic affinity magmatism with such young ages, is reported for the first time for the State of Sonora.

This thesis includes supplementary material and the geological map of the Sierra Los Mochos and the Lomas de Arivaipa, Sonora, Mexico.

# Índice general

Resumen.....	1
Abstract.....	2
Índice general.....	3
<b>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>5</b>
1. Introducción.....	5
1.1 Localización y accesibilidad a la zona de estudio.....	6
1.2 Hipótesis de trabajo.....	8
1.3 Justificación y objetivos.....	9
1.4 Metodología de trabajo y técnicas analíticas empleadas.....	10
1.4.1 Mapeo Geológico.....	11
1.4.2 Petrografía.....	12
1.4.3 Geoquímica.....	12
1.4.4 Análisis estructural.....	13
1.4.5 Geocronología.....	13
<b>CAPÍTULO II CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LA SIERRA LOS MOCHOS Y LOMAS DE ARIVAIPA.....</b>	<b>14</b>
2.1 Cartografía geológica y petrografía.....	14
2.1.1 Grupo 1: Basamento granítico Laramídico.....	17
2.1.2 Grupo 2: Volcanismo tipo Sierra Madre Occidental.....	19
2.1.3 Grupo 3: Sucesión sedimentaria tipo Báucarit con miembros volcánicos (~20–14 Ma).....	21
2.1.4 Grupo 4: Volcanismo Pre-Rift (~17–14 Ma).....	26
2.1.5 Grupo 5: Depósitos ignimbríticos distales asociados al rift (12.5 Ma).....	28
2.1.5.1 Toba de Arivaipa.....	28
2.1.5.2 Toba San Ignacio.....	28
2.1.5.3 Ignimbrita de Hermosillo-Toba de San Felipe.....	30
2.1.8 Grupo 6: Volcanismo toleítico de rift (~12.5–10.4 Ma).....	32
2.1.8.1 Riolitas e Ignimbritas.....	33
2.1.8.2 Islanditas.....	35
2.1.7 Grupo 7: Volcanismo de rift con afinidad adakítica (~10.4 Ma).....	37
2.1.6 Grupo 8: Conglomerados superiores (~12.5–10.6 Ma).....	39
2.1.9 Grupo 9: Volcanismo alcalino de rift con peperitas ultrapótasicas (~10.6 – 6.5 Ma).....	40
2.2 Geología estructural.....	44
<b>CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS Y GEOCRONOLÓGICAS.....</b>	<b>49</b>
3.1 Técnicas Analíticas.....	49
3.2 Rasgos geoquímicos generales.....	55
3.2.1 Diagramas de variación Harker para elementos mayores.....	55
3.2.2 Diagramas de variación Harker para elementos traza.....	58
3.3 Geoquímica del magmatismo de Arco.....	59
3.3.1 Geoquímica del basamento Laramídico Cretácico.....	59
3.3.2 Geoquímica del volcanismo tipo SMO.....	62
3.3.3 Geoquímica de los miembros volcánicos de Báucarit.....	63
3.4 Geoquímica del magmatismo de Rift.....	65
3.4.1 Geoquímica de los depósitos ignimbríticos distales, magmatismo transicional.....	65
3.4.2 Geoquímica del volcanismo toleítico.....	68
3.4.3 Geoquímica del volcanismo adakítico de rift.....	70
3.4.4 Geoquímica del volcanismo alcalino de rift.....	73
3.5 Geocronología U/Pb en zircones.....	77
3.5.1 Resultados.....	78
3.5.1.1 Dacita-Traquidacita Adakítica MAPL15-06.....	78

3.5.1.2 Riolita Toleítica SLM16-87.....	79
3.5.1.3 Riolita Toleítica SLM16-97.....	80
CAPÍTULO IV DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....	84
4.1 Implicaciones petrotectónicas .....	85
4.1.1 Magmatismo pre-Rift .....	87
4.1.2 Magmatismo ProtoGolfo-Rift y Sin-Rift .....	90
4.2 Significado tectónico para el Norte del proto-Golfo de California .....	95
4.3 Conclusiones .....	98
BIBLIOGRAFÍA.....	100
APÉNDICE A. Tablas Petrográficas .....	117
APÉNDICE B. Mediciones Estructurales.....	120
APÉNDICE C. Preparación de muestras y técnica analítica U–Pb en zircones .....	121
ANEXO 1 Artículo 1 .....	132
ANEXO 2 Artículo 2 .....	143
ANEXO 3 Artículo 3 .....	159

# CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

## 1. Introducción

La profusión de los productos magmáticos miocénicos en el NW de México está íntegramente relacionada a la evolución cinemática del límite tectónico Pacífico-Norteamérica (PAC-NAM), evidenciado a los ~12.5 Ma con el cese de la subducción de la placa Farallón, dando paso inmediato al establecimiento del Proto-Golfo de California (PCG) entre los ~12.5 y ~6 Ma y a la conformación del Golfo de California (GC) a los ~6 Ma ([Gastil and Krumenacher, 1977](#); [Stock and Hodges, 1989](#); [Wilson et al., 2005](#)).

En este periodo ocurrió el establecimiento de una imponente proliferación magmática resultante de la evolución de la litosfera ([Mora-Álvarez y McDowell, 2000](#); [Mora-Klepeis y McDowell, 2004](#); [Vidal-Solano et al., 2005](#); [Gómez-Valencia, 2011](#); [Barrera-Guerrero, 2012](#); [William-Herman, 2013](#); [Gómez-Valencia, 2014](#); [Bennett et al., 2017, 2016](#); [Darin et al., 2016](#); [Pérez-Aguilar, 2016](#); [Velderrain-Rojas, 2016, 2014](#); [Velderrain Rojas et al., 2018](#); [Umhoefer et al., 2018, Velderrain-Rojas, 2021](#); [Velderrain-Rojas et al., 2021](#)), en el límite de transición de un contexto de subducción a uno transtensivo con el establecimiento de un rift oblicuo con ocurrencia de fallas normales, fallas de rumbo dextral, estructuras en cola de caballo, cuencas pull-apart, grietas de tensión de escala regional, y rotaciones de bloques corticales, tanto al este, como al oeste del límite de placas PAC-NAM ([Figura 1A](#); [Bennett et al., 2013](#); [Bennett y Oskin, 2014](#); [García-Martínez et al., 2014](#); [Darin et al., 2016](#); [Umhoefer et al., 2018](#); [Velderrain-Rojas, 2021](#)). Estos eventos tectónico-estructurales provocaron que en la región costera de Sonora este presente una repetición de unidades litológicas, lo cual agrega dificultad para su estudio cartográfico y petrológico, pero su investigación aunada a estudios geoquímicos, estructurales y geocronológicos aporta un valor muy significativo para la formulación de modelos petroectónicos y para la interpretación geodinámica de la región.

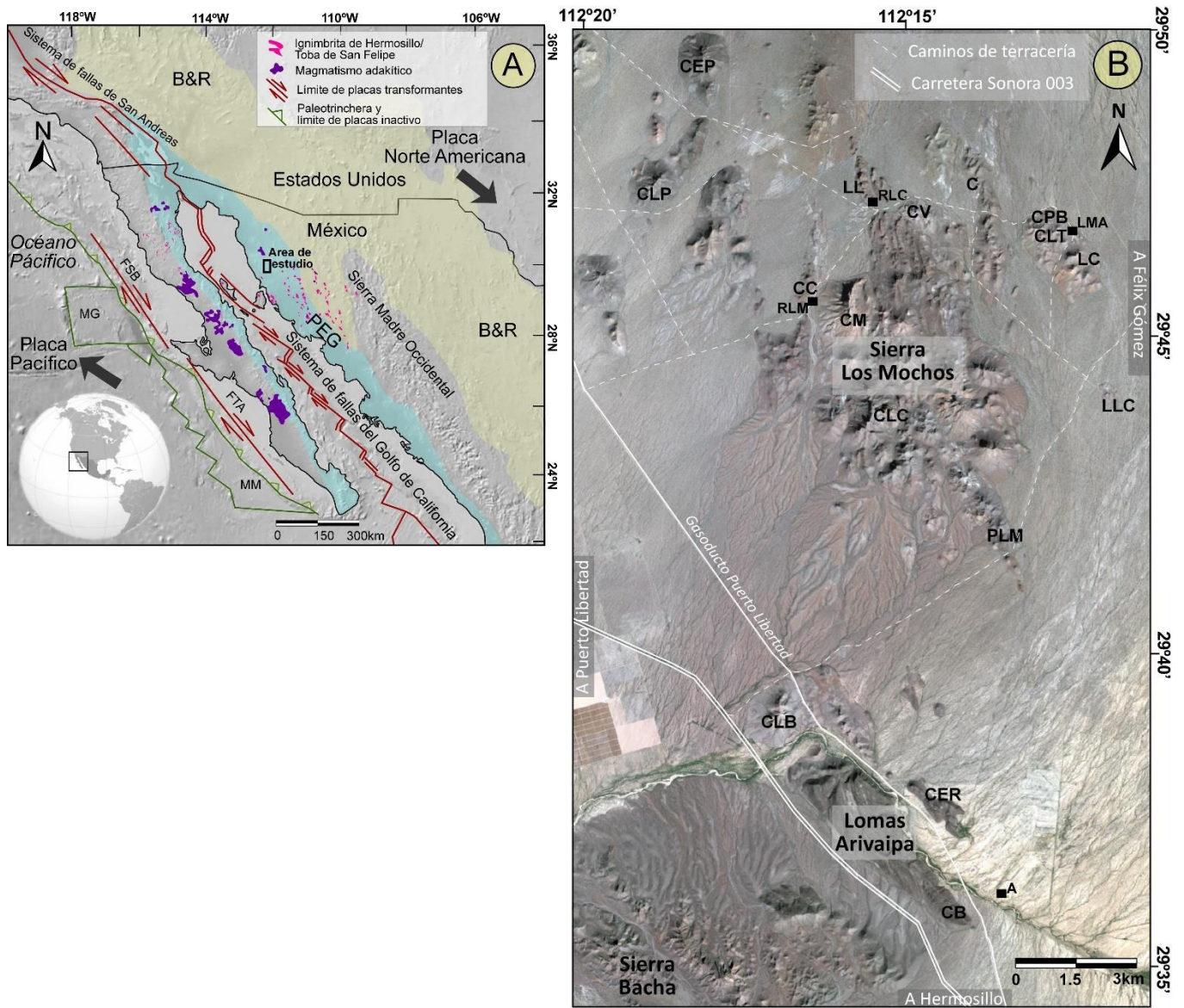
La presente tesis doctoral formó parte del proyecto de investigación de ciencia básica apoyado por el CONACYT 180784, el cual se tituló “Evolución Geodinámica del Proto-Golfo de California: Énfasis en los vestigios volcánicos del Mioceno en Sonora, México” ([Vidal-Solano, 2020](#)) y es una continuidad a las investigaciones realizadas en la tesis de maestría “Evolución espacio-temporal y petrológica del magmatismo Oligoceno-Mioceno en Sonora, México: énfasis en el magmatismo adakítico relacionado al cese de la subducción ([Gómez-](#)

Valencia, 2014). Con estos antecedentes y los datos resultantes como referencia, en sumatoria con las investigaciones próximas a la región de Puerto Libertad, Sonora, donde ocurren otras secuencias de rocas volcánicas con firmas geoquímicas orogénicas (Darin, 2011; Darin et al., 2016), es que se inició con las investigaciones en la Sierra Los Mochos, donde fue reconocida una abundancia de rocas magmáticas con características litológicas muy similares a los grupos de rocas con tendencia adakítica de edades muy jóvenes  $14.88 \pm 0.47\text{Ma}$  reportadas para Sonora (Gómez-Valencia, 2014), aunado a que, sorpresivamente, fue posible identificar nuevas unidades volcánicas no trabajadas con anterioridad en Sonora central con edades inclusive más jóvenes ( $\sim 10\text{ Ma}$ ).

Este trabajo doctoral, muestra los resultados de un nuevo mapeo geológico, análisis petrográfico, geoquímico, geocronológico y estructural de rocas del Mioceno tardío al Mioceno temprano de la Sierra Los Mochos-Lomas de Arivaipa, Sonora, México.

## **1.1 Localización y accesibilidad a la zona de estudio**

La Sierra Los Mochos (SLM) y las Lomas de Arivaipa (LA) se localizan a 140 km al NW de Hermosillo, Sonora y a 45 km al SE del poblado costero de Puerto Libertad, dentro del municipio de Pitiquito, Sonora. El área de trabajo cubre una extensión de  $450\text{ km}^2$  y su mayor elevación es representada por el Cerro Los Mochos, el cual cuenta con 640 msnm. La SLM y las LA están limitadas al occidente por la Sierra Bacha-Sierra Tordilla y al Este por una extensa llanura de inundación aluvial de los arroyos las Tinajas, San Ignacio y el Encanto. La principal vía de acceso es a partir de la carretera Sonora 003, o también llamada Carretera Costera, para posteriormente tomar caminos vecinales de terracería por el sector de las Lomas de Arivaipa, rumbo al sector sur de la SLM (Figura 1B). Finalmente, las localidades de estudio se encuentran enmarcadas dentro de varias rancherías (con abundantes caminos de terracería que cortan arroyos secos que en temporada de lluvias se inundan y se dificulta el acceso), cuyos permisos fueron otorgados por los señores Francisco Javier Campa Melendrez y Ramona Tadeo León, propietarios del Rancho Los Mochos, localizado al NE de la Sierra.



**Figura 1.** Localización del área de estudio: A) Mapa tectónico modificado de [Velderrain-Rojas et al. \(2021\)](#) que muestra el límite de placa PAC-NAM (rojo), la provincia Basin and Range (B&R) y la provincia Extensional del Golfo (PEG). FSB, Falla San Benito; FTA, Falla Tosco Abre Ojos; MG, Microplaca Guadalupe; MM, Microplaca Magdalena. La referencia del magmatismo adakítico y de la Ignimbrita de Hermosillo/Toba de San Felipe, fue tomado de [Gómez-Valencia \(2011\)](#), [Gómez-Valencia \(2014\)](#), [Velderrain-Rojas \(2016\)](#) y [Piña-Páez \(2020\)](#); y B) Mapa morfológico de la Sierra Los Mochos- Lomas de Arivaipa, donde se señalan las principales localidades estudiadas: CEP, Cerro el Picacho; CLP, Cerro La Pirinola; CC, Cerro La Cruz; CM, Cerro Mochos; LL, Las Lajas; CV, Cerro La Ventana; C, Las Cejas; CPB, Cerro Peñasco Blanco; CLT, Cerro Las Tinajas; LC, La Cueva; CLC, Cerro Las Cobrizas; LLC, Lomas Las Cobrizas; PLM, Puerto Los Mochos; CLB, Cerro Las Buras; CER, Cerro El Represo; y CB, Cerro La Ballena. Las principales rancherías se ilustran en los recuadros de color negro y corresponden a: RLM, Rancho Los Mochos; RLC, Rancho La Casona; LMA, Los Mochos Abandonado y A, Arivaipa.

## 1.2 Hipótesis de trabajo

El planteamiento para el inicio de este trabajo de tesis partió de la consideración de trabajos previos realizados en las inmediaciones de la Sierra Los Mochos (SLM) y Lomas de Arivaipa (LA), contemplando que en la Sierra Bacha ubicada al SW de estas regiones, se había reportado magmatismo de arco pre-Rift (Darin, 2011), el cual es similar en geoquímica y estratigráficamente al asociado a las etapas finales de la subducción y que en revisión de los datos analíticos presentaba rasgos adakíticos. Esta situación geológica había sido estudiada ampliamente en otras 10 localidades de Sonora en la tesis de maestría “Evolución espacio-temporal y petrológica del magmatismo Oligoceno-Mioceno en Sonora, México: Énfasis en el magmatismo adakítico relacionado al cese de la subducción” (Gómez-Valencia, 2014), por la autora de esta tesis doctoral. Una de las localidades está ubicada al Norte de la SLM y LA, se trata de la Sierra Picú, donde se reportó la máxima expresión de magmatismo orogénico adakítico (lávico y explosivo) de edades entre 17 y 12.7 Ma (Gómez-Valencia et al., 2019), conteniendo como rasgo particular el aumento de la firma adakítica hacia la cima de la secuencia (bajos valores de Y, Yb y elevadas concentraciones de Sr y Ba). Además, en esa investigación se describió a las lavas adakíticas más jóvenes reportadas en Sonora (~10 Ma).

Bajo estas referencias y en consideración de que la SLM y LA quedaba como un bloque aislado generalizado geológicamente por el Servicio Geológico Mexicano, como riolitas, tobas riolíticas, andesitas y basaltos del Mioceno (Guzmán y Vega, 2022), se planteó la posibilidad de si en este bloque aislado con abundante magmatismo, era posible encontrar más vestigios de magmatismo orogénico de naturaleza adakítica de las etapas finales de la subducción de alguna de las microplacas de la placa Farallón, por lo tanto:

1. Al igual que en la Sierra Picú, ¿Existirá evidencia de magmatismo orogénico adakítico de edades del Mioceno, cercanas al límite tectónico de subducción-rift?
2. ¿Se podrá en la SLM, encontrar argumentos tectono-magmáticos para definir a que microplaca pertenecen esas evidencias volcánicas?

Fue así que inició el trabajo de campo, con la **hipótesis** de encontrar evidencias tectónicas, estructurales y magmáticas que permitieran responder a las incertidumbres mencionadas, contemplando que en la revisión estratigráfica de localidades claves para el estudio, pudiéramos encontrar rasgos similares con otros magmas adakíticos y sobre todo encontrar al marcador estratigráfico de referencia, la Ignimbrita de Hermosillo-Toba de San

Felipe (edad promedio 12.5 Ma; [Stock et al., 1999](#); [Paz-Moreno, 2000](#); [Oskin et al., 2001](#); [Vidal-Solano et al., 2005, 2007, 2008](#); [Bennett et al., 2009](#); [Olguin-Villa, 2010](#); [Barrera-Guerrero y Vidal-Solano, 2010](#); [Darin, 2011](#); [Olguin-Villa et al., 2013](#); [Gómez-Valencia, 2011, 2014](#); [Gómez-Valencia et al., 2015](#); [Velderrain-Rojas, 2015, 2017](#); [Vidal-Solano, 2020](#); [Piña-Páez, 2020](#); [Herrera-Acosta et al., 2022](#)), la cual permitió corroborar que las lavas que afloran debajo de ella, efectivamente pudieran corresponder con magmas orogénicos de las etapas finales de la subducción posiblemente de la microplaca Arguello ([Gómez-Valencia et al. 2021](#)).

### **1.3 Justificación y objetivos**

La región NW de Sonora ha sido objeto de diversas investigaciones geológicas enfocadas en el estudio magmático y estructural en recuperación de las evidencias de la evolución del límite de placas Pacífico-Norte América (PAC-NAM). Particularmente, en las inmediaciones de Puerto Libertad (PL), se ha tenido conocimiento de vestigios del magmatismo de naturaleza hiperalcalina y recientemente se han reconocido eventos magmáticos con tendencia adakítica, por lo que en la tesis de maestría de la autora de este trabajo, se buscaron las evidencias de estas litologías en la región NW de PL correspondiente a la Sierra Picú ([Gómez-Valencia, 2014](#)), mientras que, al Sur de PL en la Sierra Bacha ([Darin, 2011](#)) se reconocieron vestigios de la evolución PAC-NAM. Aún con estas investigaciones, al SE de PL, quedaba un bloque aislado correspondiente a la Sierra Los Mochos y Lomas de Arivaipa, las cuales contienen una gran diversidad magmática de Rift y la presencia de magmas hidratados en este contexto. El estudio de la Sierra Los Mochos, permitirá esclarecer una conexión entre la Sierra Picú y la Sierra Bacha y contribuir en la conformación del magmatismo miocénico, la tectónica y estructural del NW de México.

#### **Objetivo general**

El objetivo central de este trabajo es poner en evidencia la amplia diversidad magmática de la Sierra Los Mochos y las Lomas de Arivaipa del sector costa NW de Sonora y obtener su contextualización dentro de la evolución geodinámica del Proto-Golfo de California.



## **Objetivos particulares**

- Elaborar la cartografía geológica a escala 1:50,000 de la Sierra Los Mochos y del sector de las Lomas de Arivaipa, lo cual permitirá contribuir al avance en el conocimiento de la geología del sector costero de Sonora.
- Desarrollar un detallado estudio petrográfico de las distintas unidades volcánicas de la Sierra Los Mochos, lo cual permitirá conocer las asociaciones minerales de los principales eventos magmáticos y además ayudará al establecimiento de la litoestratigrafía.
- Llevar a cabo una caracterización geoquímica (elementos mayores y traza) de los distintos eventos magmáticos reconocidos en el área de estudio.
- Llevar a cabo un estudio geocronológico con la técnica U-Pb en zircones, desde su preparación mineral hasta su fechamiento.
- Desarrollar un modelo tectónico de la evolución de los magmas involucrados en la formación de la Sierra Los Mochos y su relación con el Proto-Golfo de California.

## **1.4 Metodología de trabajo y técnicas analíticas empleadas**

La metodología de trabajo constó, en primera instancia, en la recopilación bibliográfica de trabajos previos en el área de estudio, en el desarrollo de un planificado trabajo de gabinete con el fin de realizar la identificación de los sectores claves para el trabajo de campo, el desarrollo de un mapa geológico preliminar con el apoyo de imágenes satelitales y la estimación logística para llevar a cabo el levantamiento de datos en el terreno. El trabajo de campo fue dividido en tres temporadas durante el 2015, 2016 y 2017 con un trabajo efectivo equivalente a 50 días, donde el principal enfoque fue el mapeo geológico a escala 1:50,000, la identificación, el levantamiento de datos estructurales, la descripción y el muestreo representativo de las secuencias volcánicas.

Una vez adquiridas las muestras, se efectuó el trabajo de laboratorio encaminado a la preparación de los materiales rocosos muestreados. Este consistió en la elaboración de los cortes de roca para la preparación de láminas delgadas, la obtención de polvos de roca para geoquímica y la separación de minerales (zircones) para geocronología.

Después de haber concluido con la etapa de preparación de los materiales rocosos muestreados, se fueron realizados los estudios analíticos, comenzando con un estudio petrográfico, seguido de un análisis químico completo involucrando los elementos mayores, traza y tierras raras con las técnicas FRX e ICP-MS. También fue posible desarrollar un análisis geocronológico bajo el método U-Pb en zircones.

Para cada etapa de trabajo del proyecto, se contempló trabajo de integración e interpretación de los resultados analíticos para, finalmente, desarrollar el trabajo de redacción y de difusión de los resultados en congresos nacionales como INAGEQ, UGM y SGM e internacionales como la GSA. Finalmente, fue realizada la redacción de la presente tesis doctoral y la publicación de tres artículos científicos que involucran temáticas puntuales del presente trabajo doctoral, publicaciones efectuadas en las revistas *Journal of South American Earth Sciences* y *Data in Brief*:

1. Geochemistry and geological control of Sonora obsidian: New insights into the provenance study of archaeological obsidians in Mexico (**Anexo A**).
2. Petrogenesis and Geodynamic implications of the Late Cretaceous granitoids in Puerto Libertad, Sonora, México: insights into geochemical signatures of adakite, adakitic affinity and calc-alkaline rocks in NW Mexico (**Anexo B**).
3. Handheld X-ray fluorescence geochemical data of geological and archaeological obsidian from Sonora, Mexico (**Anexo C**).

#### **1.4.1 Mapeo Geológico**

El mapa geológico preliminar se desarrolló con el apoyo de ortofotos digitales e imágenes satelitales de Google Earth, esto previo a la primera salida de campo durante el 2015 y posteriormente se hicieron actualizaciones conforme se avanzaba con el trabajo de campo. Los mapas topográficos utilizados del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), corresponden a dos cartas escala 1:50,000: H12C26, Arivaipa; y H12C17, Los Mochos.

En algunas localidades involucraron control geológico-estructural adicional, realizando en ellos una cartografía geológica a escala 1:25,000, esto debido a que el arreglo estratigráfico y estructural ameritaba un detalle mayor de comprensión de la repetición u omisión de unidades estratigráficas.

Por lo anterior, si bien el arreglo geométrico-estructural de la región de estudio no se evidencia por completo en exposición, su corroboración (principalmente de estructuras mayores), fue factible de hacer por medio de los mapas magnéticos del Servicio Geológico Mexicano (SGM).

#### **1.4.2 Petrografía**

Se realizaron 150 secciones con apoyo de los laboratorios de Laminado de la ERNO-UNAM y el Laboratorio de Laminado del Departamento de Geología de la UNISON, con el apoyo de la Geol. Aimée Orcí Romero y de la Lic. Sheila Corrales, respectivamente. El análisis petrográfico se llevó a cabo en el Laboratorio de Petrografía de la ERNO-UNAM con un microscopio Nikon Eclipse E400 y se culminó en el Departamento de Geología de la UNISON utilizando un microscopio LEICA DM750P. Con base en el análisis petrográfico mediante sus asociaciones mineralógicas y texturales de las facies y unidades litológicas del Mioceno-Mioceno Superior de la Sierra Los Mochos-Lomas de Arivaipa, fue posible corroborar correlaciones litológicas y delimitar el mapa geológico (la tabla del análisis petrográfico puede ser consultada en el [Apéndice A](#) de este documento).

#### **1.4.3 Geoquímica**

El primer paso consistió en la preparación de las muestras de roca por medio de la trituración y posterior pulverización en el Laboratorio de Preparación de muestras del Instituto de Geología de la ERNO-UNAM. Posteriormente, se analizaron un total de 58 muestras de rocas volcánicas correspondientes tanto a la región de la Sierra Los Mochos como a la región de las Lomas de Arivaipa. Primeramente, se analizaron 28 muestras con la técnica FRX del Laboratorio Nacional de la UNAM por medio de una estancia con apoyo PAEP y con la asesoría del Quím. Rufino Lozano Santa-Cruz. Un segundo análisis, que incluyó los ejemplares faltantes de analizar, fue realizado por medio de una estancia de Becas Mixtas CONACYT en la Universitat de Barcelona, España con el equipo ICP-MS e ICP-OS, con la asesoría del Dr. Domingo Gimeno Torrente (las técnicas analíticas y la tabla de datos, se abordarán en el apartado de geoquímica).

#### **1.4.4 Análisis estructural**

Durante el trabajo de campo, se llevó a cabo la medición de planos correspondientes a la estratificación, planos y líneas correspondientes a fallas medidas siguiendo la regla de la mano derecha. Para el análisis estructural de la Sierra Los Mochos-Lomas de Arivaipa, se utilizaron los programas Stereonet y Faultkin con la finalidad de entender los grupos o familias de estructuras para así obtener una interpretación (el listado de mediciones puede consultarse en el [Apéndice B](#) de este documento).

#### **1.4.5 Geocronología**

De los trabajos previos del sector sur del área de estudio, fue posible recopilar tres fechas realizadas con las técnicas geocronológicas K-Ar, Ar-Ar, y U-Pb, analizadas en rocas volcánicas del Mioceno Medio-Superior de las Lomas de Arivaipa ([Gastil y Krummenacher 1977](#), [Darin 2011](#); [Bennett et al. 2013](#)). Para el trabajo de la presente tesis doctoral, se consideró el fechamiento de un domo dacítico adakítico de las Lomas de Arivaipa y dos ejemplares dacítico islandíticos que coronan a la secuencia de la Sierra Los Mochos, para ello se utilizó la técnica U-Pb desarrollada en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) en el Centro de Geociencias (CGEO), UNAM, Campus Juriquilla, Querétaro, utilizando la técnica de ablación láser (LA-ICP-MS), con la asesoría del Dr. Luigi Solari y del Dr. Carlos Ortega (una breve reseña de la preparación de las muestras y la técnica de análisis, puede consultarse en el [Apéndice C](#) de este documento).

## CAPÍTULO II CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LA SIERRA LOS MOCHOS Y LOMAS DE ARIVAIPA

### 2.1 Cartografía geológica y petrografía

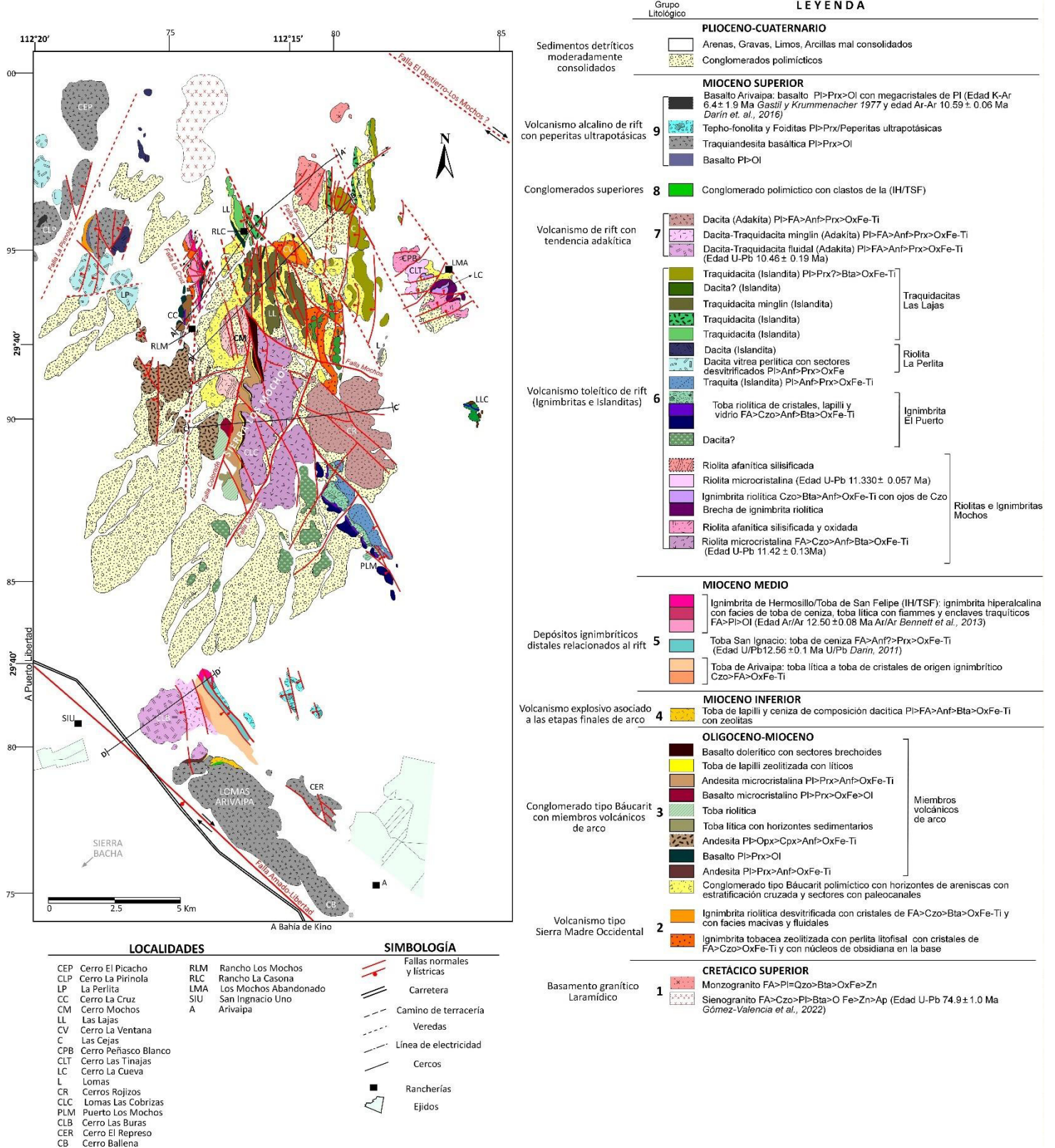
El mapeo geológico incluye el análisis litológico, petrográfico, geoquímico por FRX e ICP, estructural y geocronológico U-Pb, considerándose que para la reafirmación litológica se contó en promedio con 150 muestras de roca representativas del Cenozoico y Neógeno de las áreas de estudio en la Sierra Los Mochos y Lomas de Arivaipa.

La estratigrafía reconocida para la Sierra Los Mochos-Lomas de Arivaipa consta de 9 grupos tectono-magmáticos, mostrados en el mapa geológico de la [Figura 2](#), y para la definición con mayor detalle litológico para cada grupo, fue pertinente incluir columnas estratigráficas por sectores ([Figura 3A, B, C, D, E, y F](#)), una columna estratigráfica compuesta ([Figura 3G](#)) y secciones geológicas representativas ([Figura 4A, B, C y D](#)).

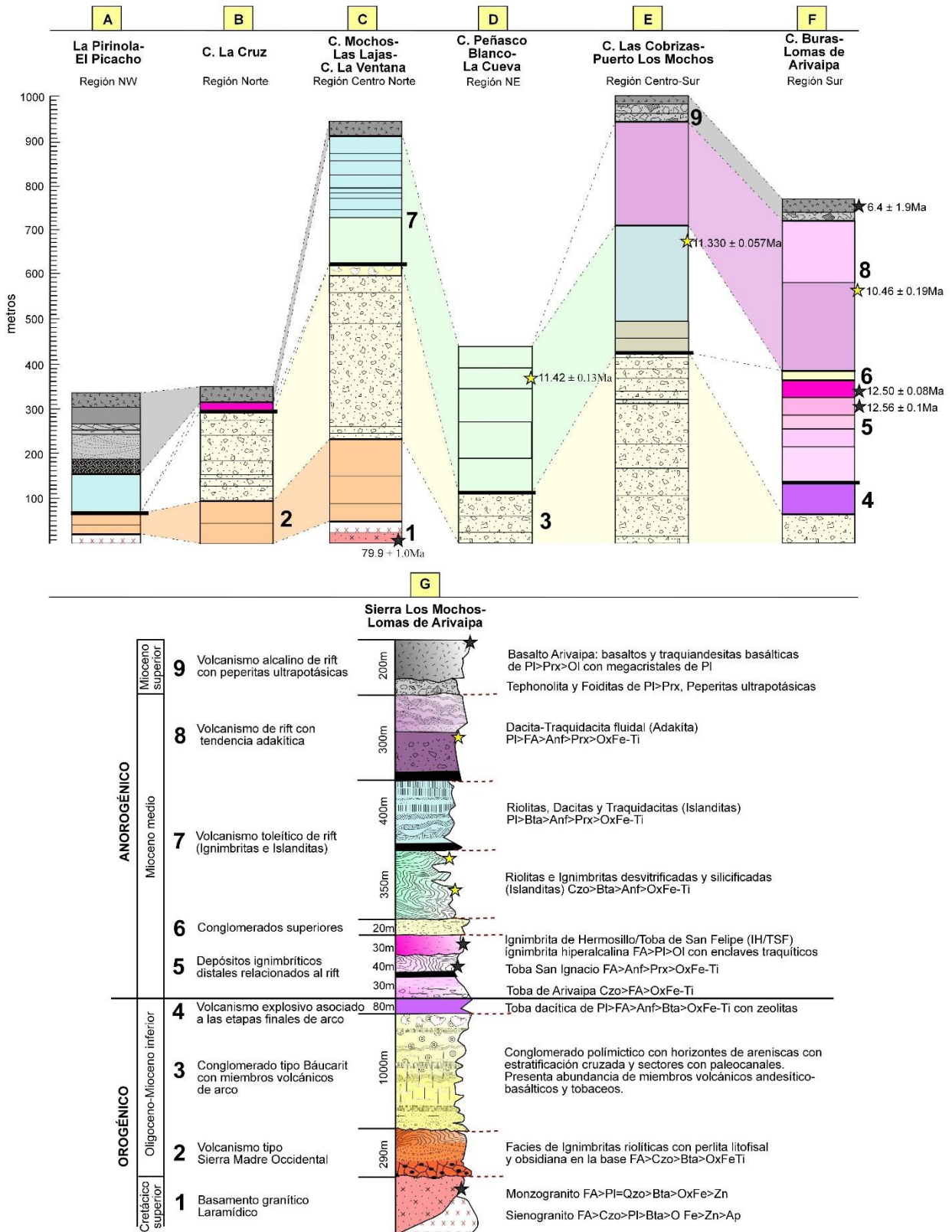
En este trabajo, permitió el reconocimiento de afloramientos de un basamento granítico Cretácico, correlacionable con trabajos previos donde son descritos a cuerpos ígneos intrusivos del batolito costero aflorante en las inmediaciones de Puerto Libertad ([Gastil and Krummenacher, 1976, 1977; Verdugo-Mariscal, 1985; Ramos-Velázquez et al., 2008; Darin, 2011; García-Martínez 2014; Gómez-Valencia, 2014; García-Huerta, 2015; Darin et al., 2016; Barrón-Díaz et al., 2021; Gómez-Valencia et al., 2022](#)).

Sobreyaciendo a este basamento granítico, se identificaron secuencias volcánicas asociadas a las etapas finales de la subducción ([Darin, 2011; Gómez-Valencia, 2014](#)) y a eventos extensivos relacionados con el Proto-Golfo y Golfo de California ([Darin, 2011; Darin et al., 2016; Gómez-Valencia et al., 2019](#)). En la Sierra Los Mochos, fue posible reconocer con un espesor de hasta 2740 metros, a una secuencia volcánica compuesta de sedimentos detríticos intercalados con flujos lávicos basálticos, andesíticos y dacíticos, relacionados; volcanismo explosivo dacítico y riolítico; lavas basálticas, andesíticas, dacíticas y riolíticas; y sedimentos carbonatados con fósiles de braquiópodos, intercalados con flujos basálticos; lo anterior es fácilmente identificable en el mapa de la [Figura 2](#).

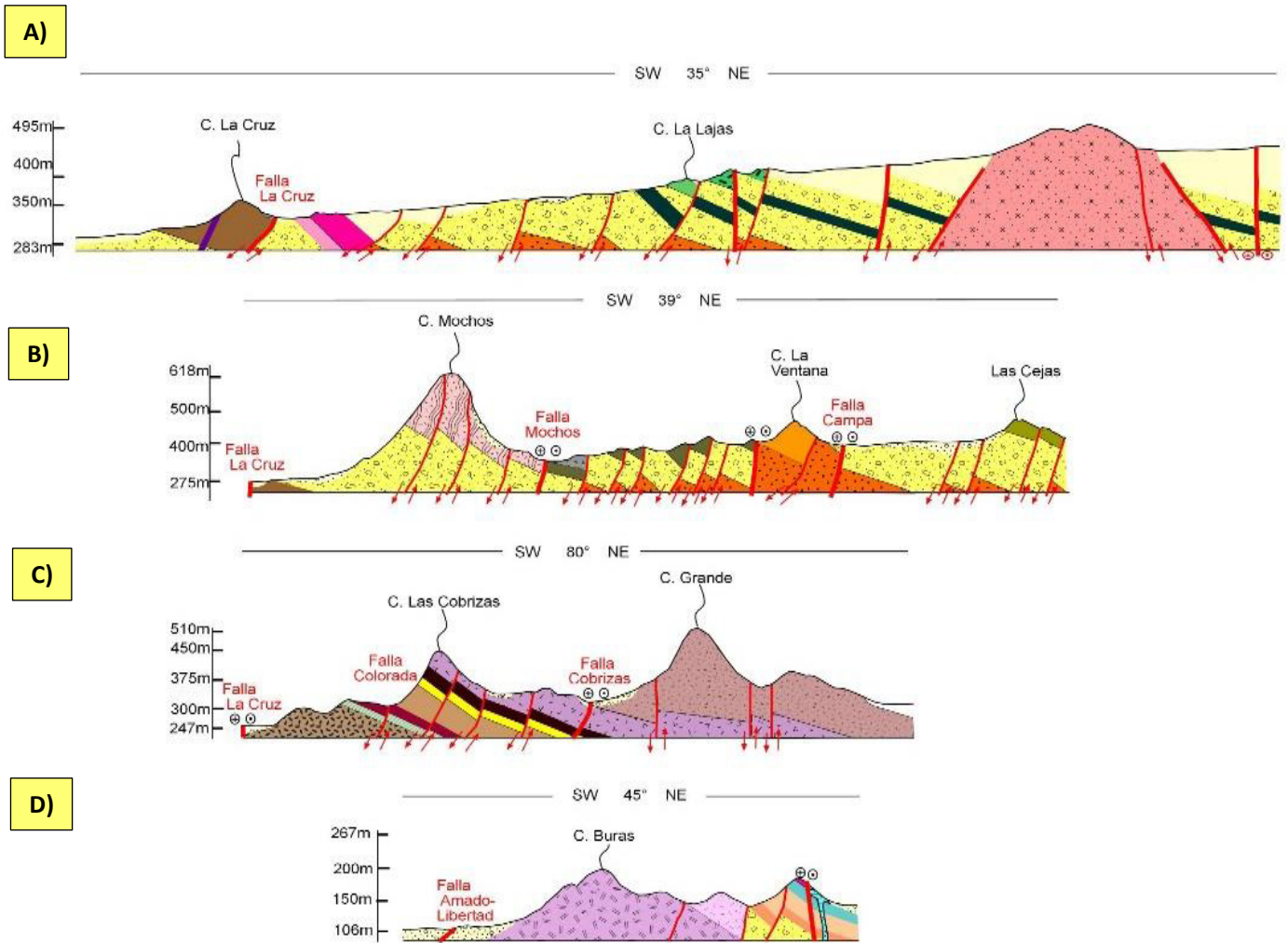
## GEOLOGÍA DE LA SIERRA LOS MOCHOS - LOMAS DE ARIVAIPA, SONORA, MÉXICO



**Figura 2.** Mapa geológico de la Sierra Los Mochos-Lomas de Arivaipa, Sonora, México (ver localización en la Figura 1A).



**Figura 3.** Columnas estratigráficas de la Sierra Los Mochos: A) B) C) D) E) y F) Estratigrafía típica de las principales localidades estudiadas, indicando espesores y límites con edades existentes en la literatura y reportadas en este trabajo; y G) Columna estratigráfica compuesta mostrando las características petrológicas generales de los 9 grupos litológicos encontrados en las áreas de estudio.



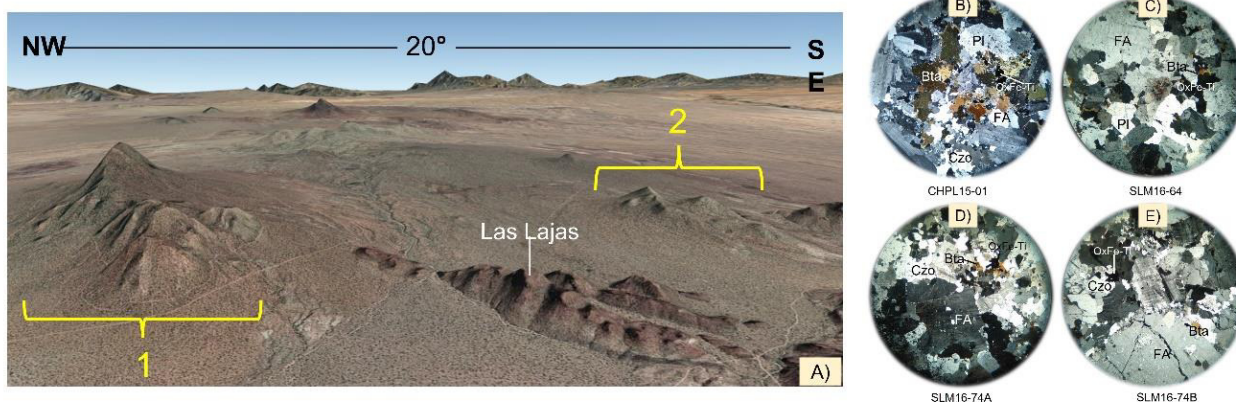
**Figura 4.** Secciones geológicas representativas de las regiones de estudio en la Sierra Los Mochos: A) Sección Cerro La Cruz-Cerro Las Lajas; B) Sección Cerro Mochos-Cerro La Ventana-Las Cejas; C) Sección Cerro Las Cobrizas-Cerro Grande; y D) Sección Cerro Buras. La simbología de las unidades litológicas se puede consultar en la [Figura 2](#).

### 2.1.1 Grupo 1: Basamento granítico Laramídico

El basamento de la Sierra Los Mochos (SLM), con elevaciones de 490 a 510 msnm, está conformado por rocas graníticas expuestas en la porción norte ([Figura 2](#), [Figura 4A](#), [Figura 5A](#)) y consisten en monzogranitos leucocráticos inequigranulares de grano medio con Bta, Ox-FeTi y Zr ([Figuras 5B y 5C](#), [Tabla en Apéndice A](#)); la roca presenta una importante oxidación hospedada en fracturas primarias y secundarias, lo cual añade una característica tonalidad rosada. Por otra parte, también se observaron afloramientos de sienogranitos leucocráticos



inequigranulares de grano medio a grueso con Bta, Ox-FeTi, Zr y Ap (Figuras 5D y 5E); existe una oxidación selectiva en ferromagnesianos. Ambas litologías exhiben a nivel afloramiento una morfología esferoidal con escamado concéntrico y una afectación estructural por fracturamiento y fallamiento con orientación preferencial NE-SW. Con las características mineralógicas y morfológicas descritas con anterioridad, aunado a la localización y distribución de estas rocas graníticas, es posible hacer una correlación con los intrusivos laramídicos calcoalcalinos (Cochemé, 1985; Damon et al., 1983; Valencia-Moreno et al., 2001, 2021) y/o con el también denominado batolito costero Sonorense (Ramos-Velázquez et al., 2008); situación que es corroborada con la determinación isotópica U-Pb para estas rocas cristalinas, donde Barrón-Díaz et al. (2021) y Gómez-Valencia et al. (2022) reportan una edad de  $74.9 \pm 1.0$  Ma para un sienogranito que aflora en la porción NE de la SLM; fechamiento consistente con edades reportadas en los alrededores del área de estudio, como por ejemplo, las edades de  $70.1 \pm 1.2$  Ma y  $71.7 \pm 1.4$  Ma (K-Ar) obtenidas por Gastil y Krummenacher (1977), al noroeste y oeste de la SLM; y una edad de  $71 \pm 1.1$  Ma reportada por García-Martínez et al. (2014), al sur de la SLM.

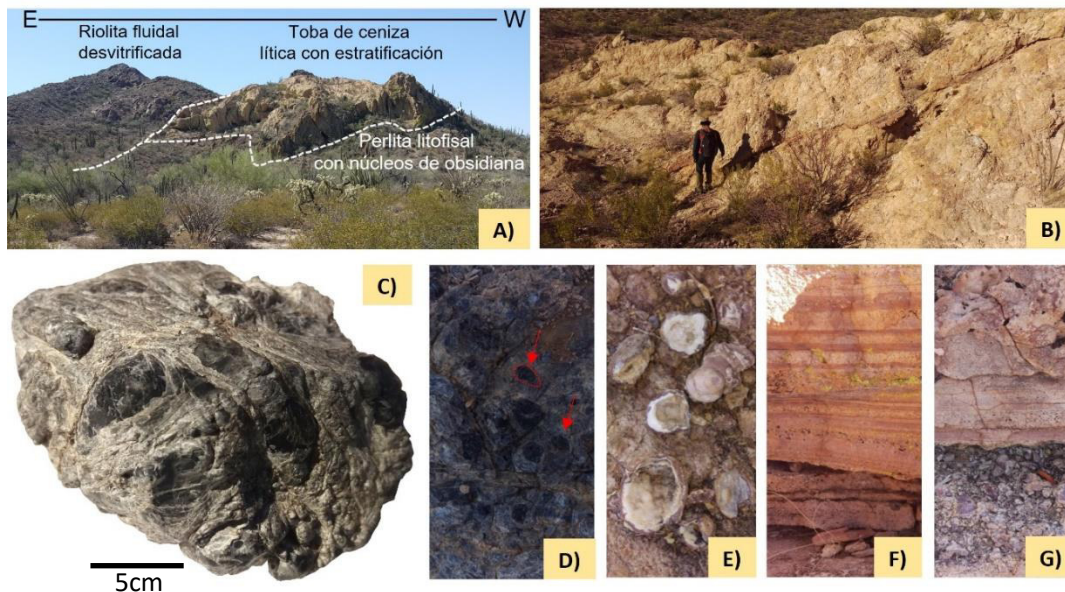


**Figura 5.** Afloramientos y microfotografías representativas de los intrusivos Cretácico superior del norte de la Sierra los Mochos: A) Panorámica que exhibe la morfología típica de los intrusivos: 1. Cuerpo Sienogranítico y 2. Cuerpo Monzogranítico; B) CHPL15-01, Monzogranito; C) SLM16-64A, Monzogranito; D) SLM16-71A, Sienogranito; y E) SLM16-71B, Sienogranito. Las abreviaturas de rocas y minerales son: FA. Feldespato Alcalino; Pl. Plagioclasa; Czo. Cuarzo; Bta. Biotita; OxFe-Ti. Óxidos de Hierro-Titanio; R. Riolita. Las descripciones petrográficas detalladas están disponibles en el [Apéndice A](#).

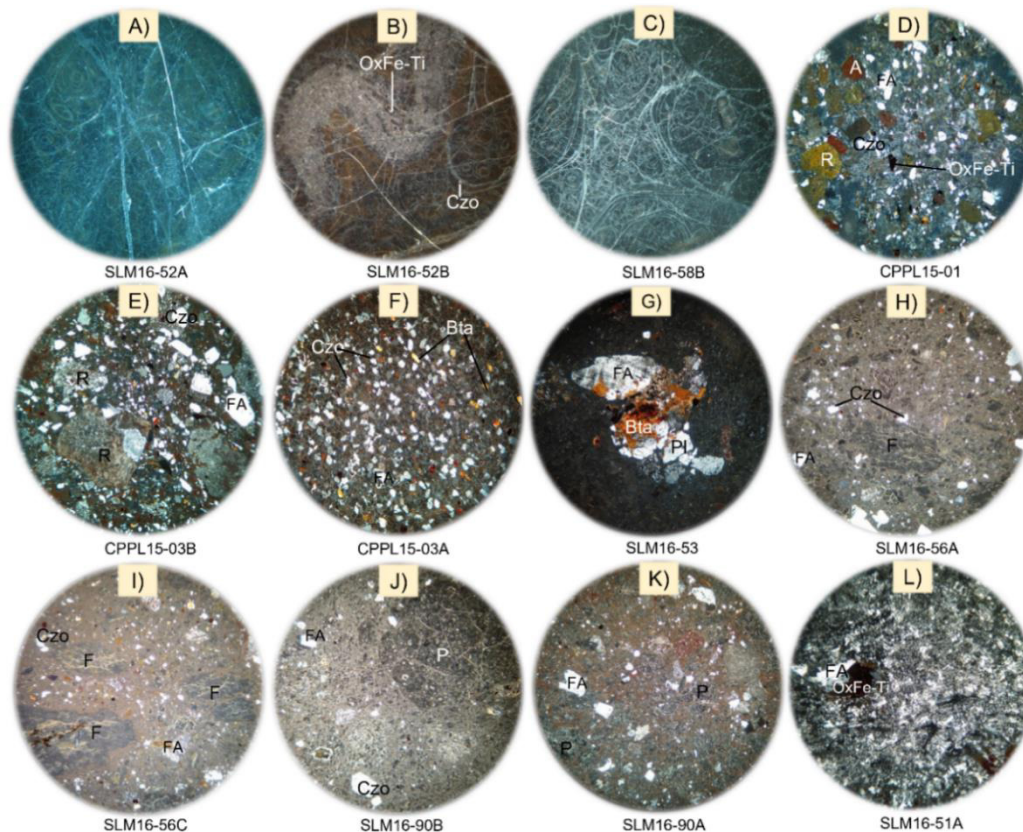
### 2.1.2 Grupo 2: Volcanismo tipo Sierra Madre Occidental

Discordante al basamento monzo-sienogranítico del Cretácico Superior ([Figura 3](#)), en la región norte (ver mapa en la [Figura 2](#)), principalmente en las localidades de La Pirinola-El Picacho, Cerro La Cruz y Cerro La Ventana ([Figuras 4B, 6A y B](#)), aflora una secuencia volcánica con 290 metros de espesor con facies de pulsos ignimbríticos riolíticos con fenocristales generales de FA > Qzo > Bta > OxFe-Ti. La mejor exposición de este tipo de magmatismo está ubicada en el Cerro La Ventana ([Figura 4B](#)), donde secuencia de la base a la cima consiste de: facies vítreas perlíticas con nódulos de obsidiana ([Figuras 6C y D, 7A, B y C, Vidal-Solano et al., 2017, 2020](#)); facies litofisal con mega esferulitas de hasta 60 cm de diámetro; facies masiva intermedia; facies tobácea (toba de ceniza estratificada, toba lítica y toba de cristales, [Figuras 6F y G, 7D, E, F, G, H, I, J y K](#)) zeolitizada color verde amarillento y facies superior fluidal desvitrificada ([Figura 7L](#)), ocasionalmente con presencia de geodas rellenas de calcedonia y cuarzo ([Figura 6E](#)).

Estas litologías, normalmente, corresponden a domos-colada de composición riolítica dentro de una secuencia volcánica sin-extensional que engloba ignimbritas riolíticas y lavas andesítico-basálticas. Este tipo de sucesión volcánica ya ha sido reportada en otras localidades de la región centro y serranía de Sonora ([McDowell y Clabaugh, 1979, Cameron et al., 1980; Demant et al., 1989; Cochemé et al., 1996; McDowell et al., 1997; Gómez-Valencia, 2011; Ferrari et al., 2007](#)), como depósitos de edad Oligoceno temprano-Mioceno, que forman parte de los últimos episodios volcánicos de la secuencia volcánica bimodal de la Sierra Madre Occidental donde sectorialmente han sido reconocidos por presentar importancia económica particularmente en perlitas ([González-Sandoval 1997; Vidal-Solano et al., 2014; Hinojosa-Prieto et al., 2016](#)) y tobas zeolitizadas ([González-Sandoval 1997](#)). Los vestigios volcánicos de la SLM afloran bajo estas mismas asociaciones estratigráficas, dentro de una secuencia del Oligoceno-Mioceno, donde todas las unidades son fuertemente deformadas por fallas normales, lítricas y laterales ([Figura 4A y B](#)) ligadas a un evento transtensivo ocurrido en el Mioceno superior.



**Figura 6.** Afloramientos y facies representativas del volcanismo tipo Sierra Madre Occidental de la Sierra Los Mochos: A) Panorámica E-W que exhibe la morfología típica de 3 de las principales facies de la secuencia volcánica que aflora en la zona del Cerro La Ventana; B) Aspecto general de la facies toba de ceniza silicificada de la porción oeste del Cerro La Ventana; C) Muestra de mano de perlita gris con nódulos de obsidiana con exfoliación concéntrica; D) Facies perlítica con concentración de nódulos de obsidiana; E) Facies fluidal con geodas rellenas de calcedonia y cuarzo; F) Facies toba de ceniza con estratificación normal y cruzada; y G) Contacto de facies de toba lítica con facies de toba de ceniza.



**Figura 7.** Fotomicrografías tomadas con el lente 4X, facies vítreas: A) SLM16-52A, Perlita; B) SLM16-52B, Riolita fluidal perlítica; C) SLM16-58B, Perlita; D) CPPL15-01, Toba de lapilli ignimbrítica; E) CPPL15-03B, Toba lítica ignimbrítica; F) CPPL15-03A, Toba de cristales ignimbrítica; G) SLM16-53, Toba lítica ignimbrítica; H) SLM16-56A, Toba ceniza lítica ignimbrítica; I) SLM16-56C, Toba ceniza lítica ignimbrítica; J) SLM16-90B, Toba de lapilli ignimbrítica; K) SLM16-90A, Toba de lapilli ignimbrítica; L) SLM16-51A, Riolita fluidal.

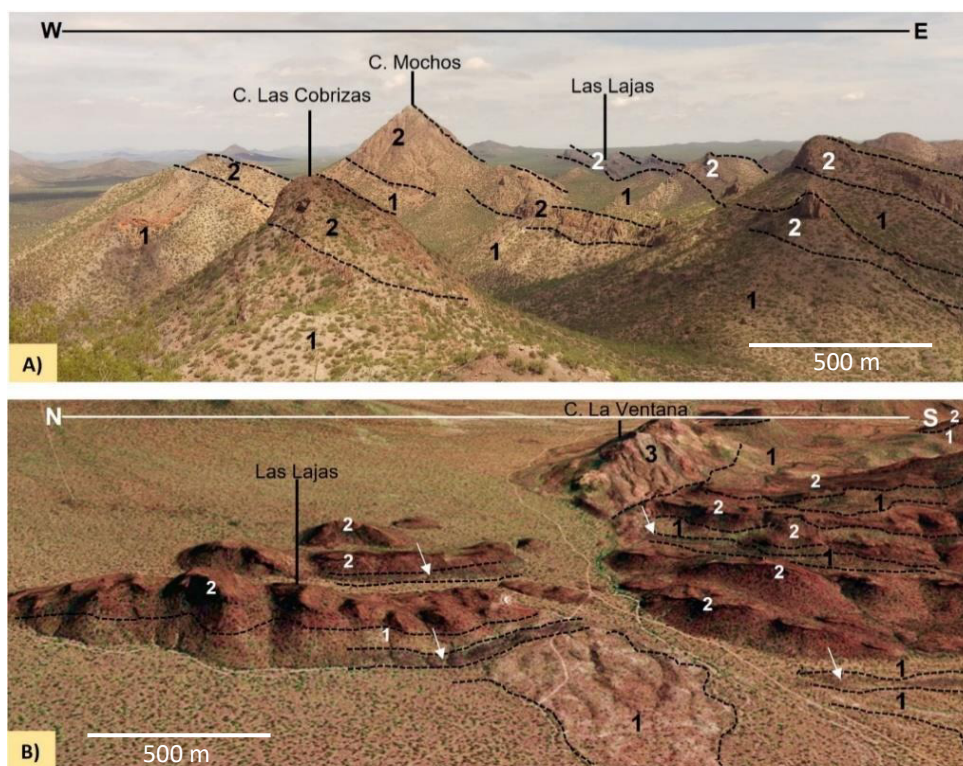
### 2.1.3 Grupo 3: Sucesión sedimentaria tipo Báucarit con miembros volcánicos (~20–14 Ma)

De acuerdo con [Gómez-Valencia \(2011\)](#) y [Gómez-Valencia et al. \(2015\)](#), la Formación Báucarit descrita inicialmente por [Dumble \(1899\)](#), [King \(1939\)](#), [Radelli \(1989\)](#), [De la O-Villanueva \(1993\)](#), corresponde a una sucesión sedimentaria de morfología en ruinas con contenido conglomerático, con intercalación y acuñaamiento de horizontes de limolitas y areniscas; la cual contiene variedades de miembros litoestratigráficos volcánicos piroclásticos, fluidales e hipabisales de naturaleza calcoalcalina y adakítica ([Gómez-Valencia et al. 2015](#)), además de presentar un alto grado de litificación y zeolitización, derivadas de un metamorfismo de bajo grado ([Münch, 1993](#); [Cochemé et al. 1994](#)). La edad de la Formación Báucarit ha sido definida en rangos de 27 a 22 Ma con edades de miembros volcánicos de hasta  $16.51 \pm 0.64$  Ma (Miembro volcánico Cerro Prieto, fechado por la técnica  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , [Gómez-Valencia, 2014](#); [Gómez-Valencia et al. 2015](#)) y las características litológicas generales de la sucesión se han documentado con variaciones en aporte clástico y magmático de acuerdo con su ocurrencia o como evidencia de la cuenca en la que aconteció, razón por la cual [Gómez-Valencia \(2011\)](#) y [Gómez-Valencia et al. \(2015\)](#), se refirieron a esta secuencia como conglomerado tipo Báucarit y en el presente trabajo de tesis nos referiremos como sucesión sedimentaria tipo Báucarit (SSTB).

Para la región de Puerto Libertad, [Morales-Morales et al. \(2007\)](#) y [García-Huerta \(2015\)](#) reportan por primera vez la presencia de este evento detrítico en la porción costera del Estado de Sonora (al NW de la SLM), refiriéndose a una sucesión con morfología en ruinas, estratificada con horizontes con conglomerados con gradación inversa y fracturas con rellenos de carbonatos de calcio. Por otra parte, en el área de estudio, [Darin \(2011\)](#), aunque no define terminológicamente como Sucesión sedimentaria tipo Báucarit, identificó y cartografió en la región noroeste de las Lomas de Arivaipa a un conglomerado indiferenciado con intercalación de flujos de ceniza y tobas de ceniza de composición riolítica, unidades piroclásticas que en este trabajo se correlacionan con el volcanismo pre-Rift adakítico, siendo similar a la Formación Volcánica Las Golondrinas de la Sierra Picú ([Gómez-Valencia, 2014](#)).

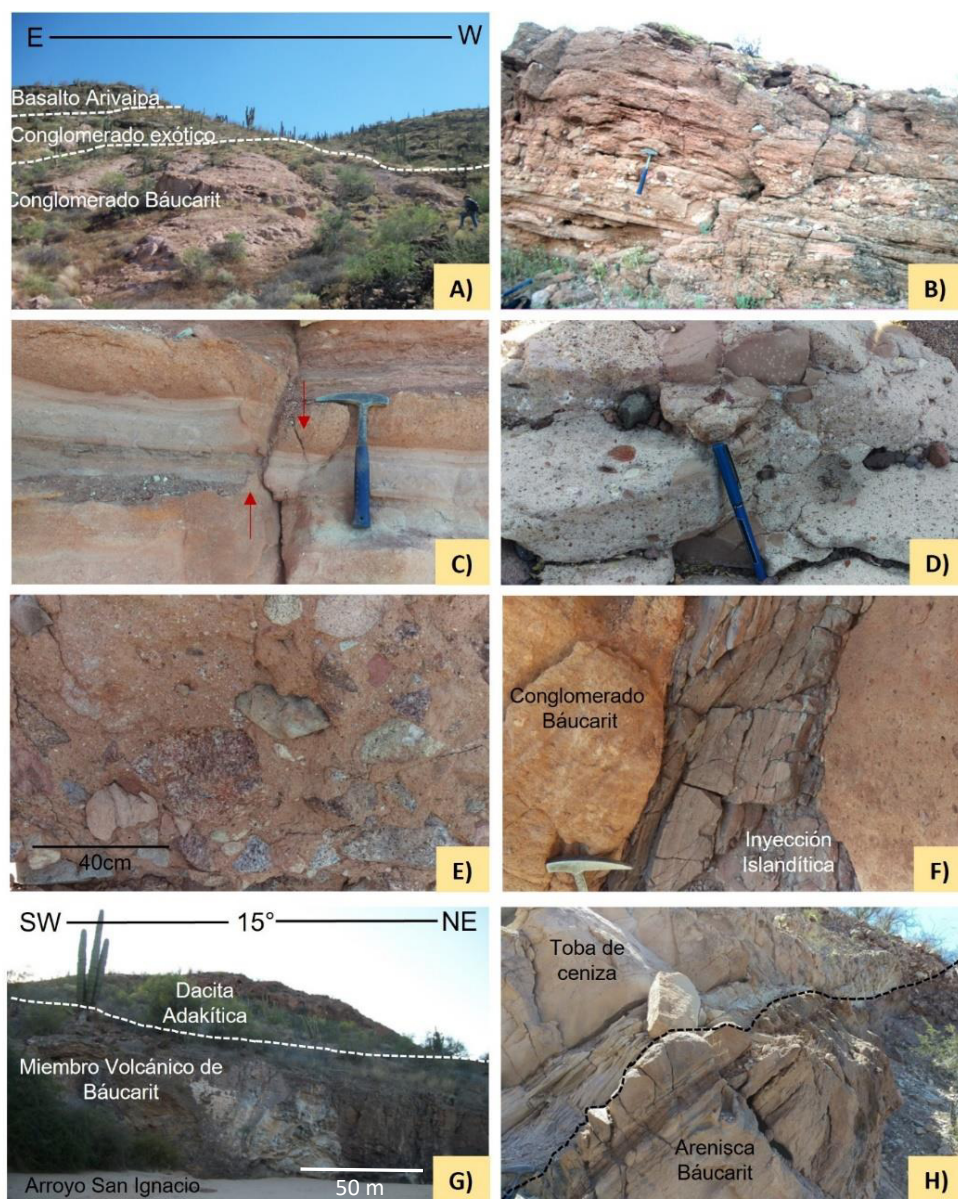
En la Sierra Los Mochos, la SSTB aflora principalmente en la porción norte ([Figuras 4A y B](#); [8A y B](#)) y se presentan escasos afloramientos en la porción NW de Las Lomas de Arivaipa ([Figuras 4D, 9A y B](#)). En general, en la SLM, la secuencia completa cuenta con una potente

exposición de 1000 metros de espesor con intercalación de conglomerados y areniscas con estructuras sedimentarias de estratificación cruzada (Figura 9H) y evidencias de paleocanales, secuencia que es repetida y a su vez disectada por fallas normales (Figura 9C) y lístrico (Figuras 2, 4A, B y D). Los mejores afloramientos identificados están ubicados en siete principales localidades: al norte entre el Cerro Mochos, Las Lajas, Rancho La Casona, Cerro La Ventana, Las Cejas, La Cueva y Cerro Las Cobrizas (Figura 8); y al sur, en la base noroeste de Las Lomas de Arivaipa. En la región de estudio, fue posible reconocer varias inyecciones magmáticas (diques) que cortan a la SSTB (Figura 9F) algunas en correspondencia composicional con los miembros piroclásticos félsicos ocasionalmente vítreos perlíticos con mineralogía general de  $Czo = FA > Bta > OxFe-Ti > Cpx$  (Figura 10A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L), lavas fluidales intermedias dacítico-andesíticas de  $Pl > Cpx > Opx > OxFe-Ti$  (Figuras 11H, N, Ñ, Q y S) a máficas de  $Pl > Opx > Cpx > Ol$  iddingsitizado  $> OxFe-Ti$  (Figuras 11A, B, C, D, E, F, G, I, J, K, L, M, O, P, R) y superiores máficos porfídicas de  $Pl > Ol$  iddingsitizado  $> Cpx > OxFe$  (Figuras 11D, G y H, ver tablas petrográficas en el Apéndice A).



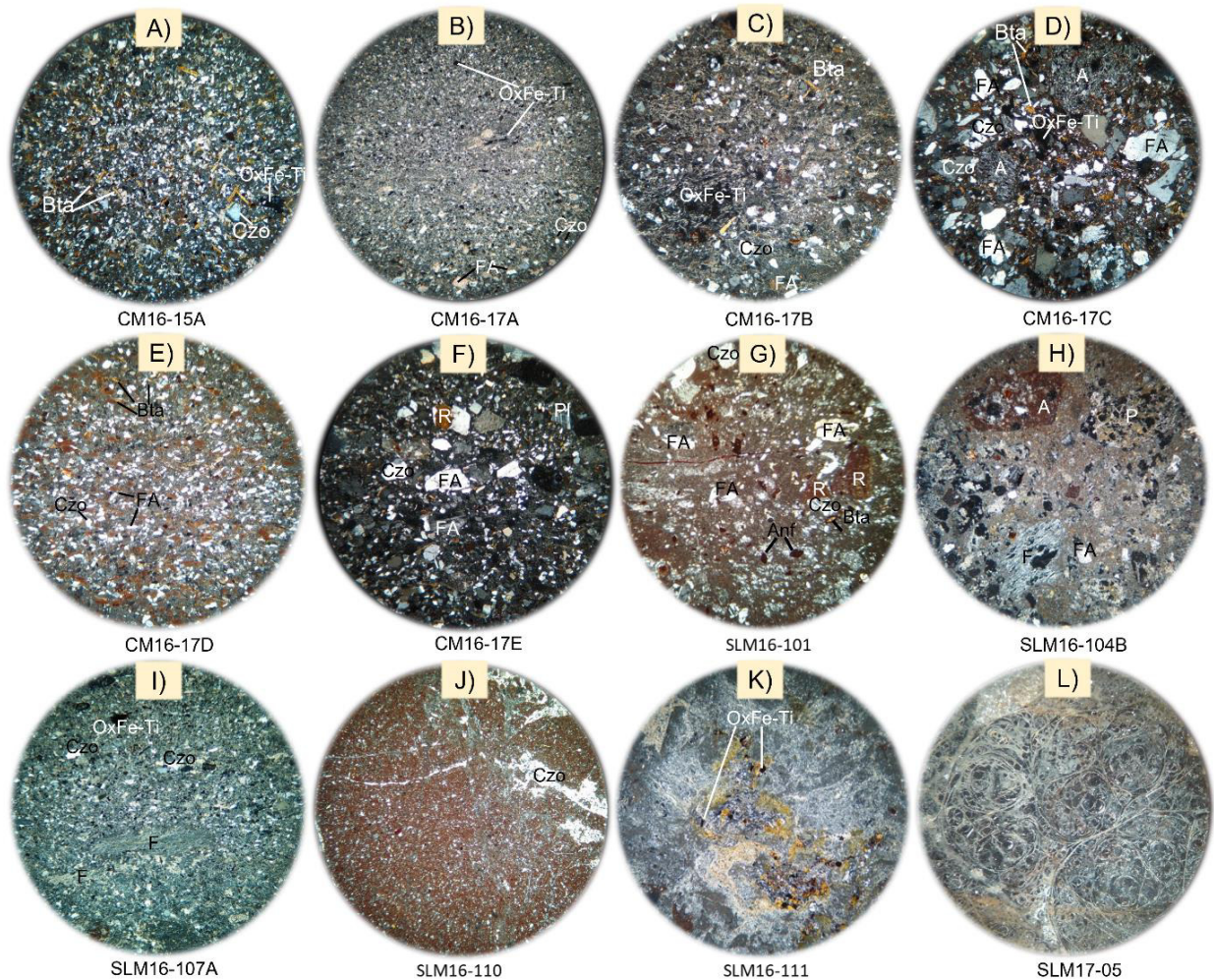
**Figura 8.** A) Fotografía panorámica con vistas al Norte, donde se exhibe la repetición y basculamiento de las unidades sedimentarias y magmáticas, 1. Sucesión sedimentaria tipo Báucarit y 2. Miembros volcánicos superiores; y B) Imagen Google Earth de uso factible para indicar la repetición de unidades: 1. Sucesión sedimentaria tipo Báucarit, 2. Volcanismo toleítico de rift (Islanditas), y 3. Volcanismo tipo Sierra Madre Occidental. Nótese que con flechas se indican los afloramientos del miembro volcánico superior de SDTB de la Figura 12.

Por otra parte, en el Cerro Mochos fue posible reconocer que la SSTB, a una altitud de 520 msnm, es coronada discordantemente por un lahar y un conglomerado rojizo (Figura 9E), zeolitizado y silicificado, altamente compacto con abundancia en clastos volcánicos (Figura 3) y clastos graníticos de hasta 2 metros de diámetro del monzogranito rosado rico en  $FA > PI = Qzo > Bta > OxFe > Zr$ , el cual fue descrito como parte del basamento pre-Terciario y fechado en  $74.9 \pm 1.0$  Ma por Gómez-Valencia et al. (2022).

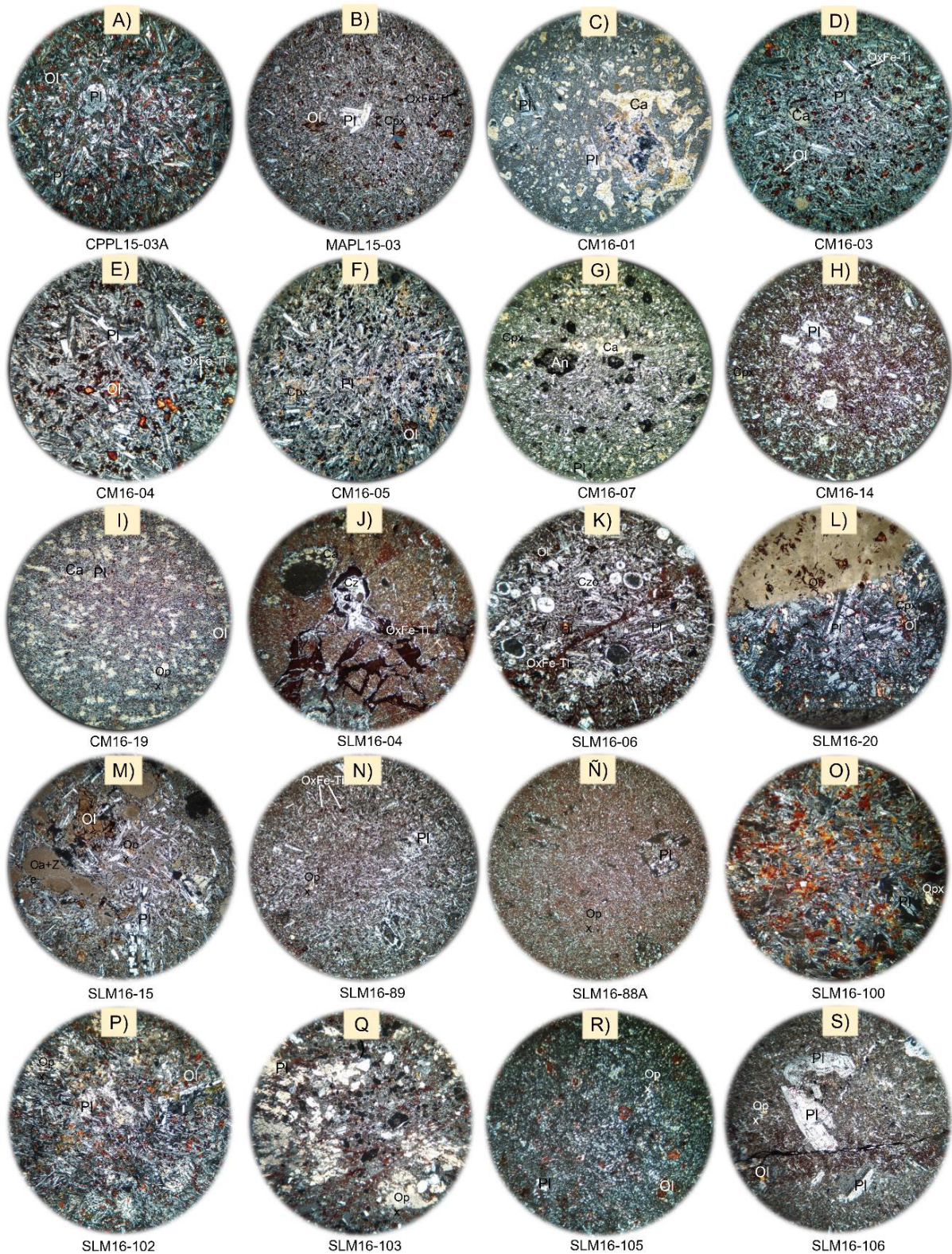


**Figura 9.** Fotografías de la SLM y LDA, que muestran algunas de las principales características de los SDTB: A) Fotografía panorámica con vista al Sur en la región de Lomas de Arivaipa; B) Morfología clásica de sedimentos detríticos tipo Báucarit en la región NW de las Lomas de Arivaipa; C) Sector estratificado de los SDTB, afectado por fallamiento normal; D) Toba de ceniza lítica miembro de SDTB; E) Conglomerado rojizo que corona a SDTB; F) Dique islandítico que corta la secuencia SDTB; G) Afloramiento de un miembro volcánico máfico de SDTB en la región Norte de Las Lomas de Arivaipa; y H) Morfología del miembro piroclástico de SDTB.

Este tipo de conglomerados rojizos zeolitizados, que coronan a las secuencias tipo Báucarit, han sido correlacionables con la unidad El Parián descrita en Mazatán por [Vega-Granillo \(1996\)](#) y para la región de Rayón como Unidad Detrítica del Mioceno Medio por [Gómez-Valencia \(2011\)](#). Esta secuencia detrítica superior en consideración del fechamiento de clastos y unidades volcánicas de cima pudo estimarse que fue formada en un rango entre ~13 y 12 Ma ([Münch, 1993](#); [Vidal-Solano, 2007](#); [Gómez-Valencia, 2011](#)).

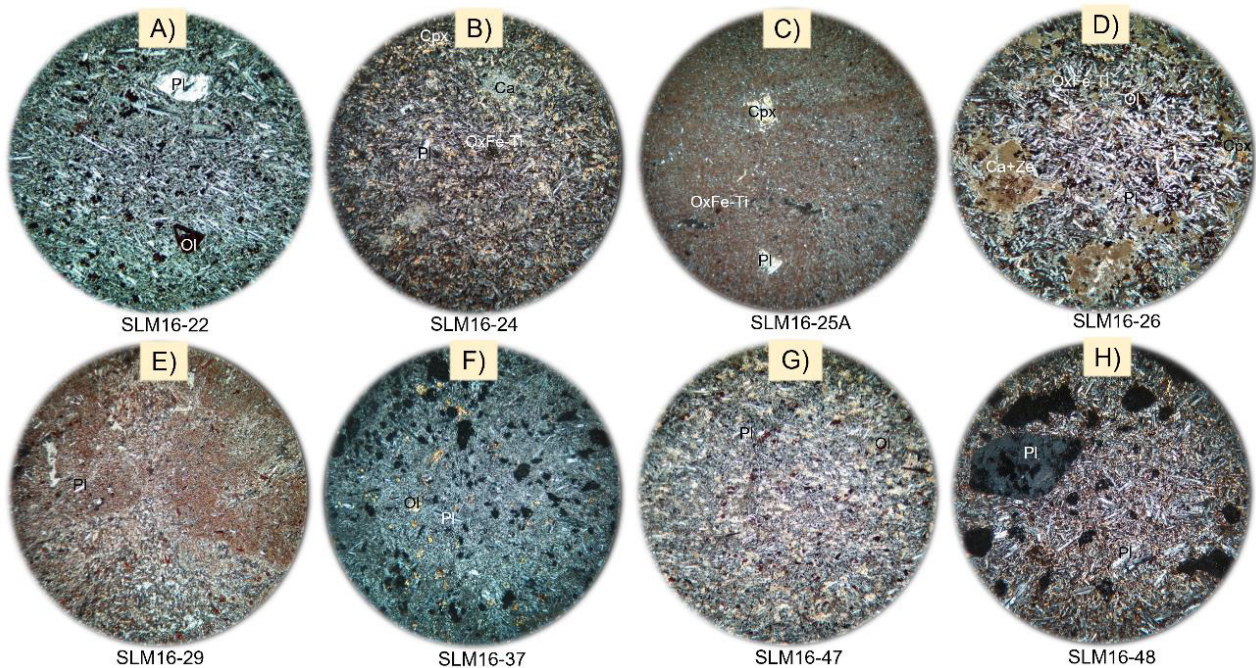


**Figura 10.** Fotomicrografías de ejemplares del miembro piroclástico félsico de SDTB, tomadas con el lente 4X: A) CM16-15A, Toba de ceniza lítica (Ignimbrita); B) CM16-17A, Toba de ceniza y cristales (Ignimbrita); C) CM16-17B, Toba de ceniza (Ignimbrita); D) y E) CM16-17C y D, Toba de ceniza lítica (Ignimbrita); F) CM16-17E, Toba de ceniza (Ignimbrita); G) SLM16-101, Toba de ceniza lítica (Ignimbrita); H) SLM16-104B, Toba de lapilli con líticos; I) SLM16-107A, Toba ceniza y cristales (Ignimbrita); J) y K) SLM16-110 y SLM16-111, Riolita; L) SLM17-05, Perlita. Las descripciones petrográficas detalladas están disponibles en el [Apéndice A](#).



**Figura 11.** Fotomicrografías de ejemplares correspondientes a los miembros intermedios y máficos de los SDTB, tomadas con el lente 4X: A) CPPL15-03A, Basalto dolerítico; B) MAPL15-03, Basalto; C), D), E) y F) CM16-01, CM16-03, CM16-04 y CM16-05, Basaltos; G) CM16-07, Basalto microcristalino; H) CM16-14, Andesita; I) CM16-19, Basalto; J) SLM16-04, Andesita; K) SLM16-06, Basalto dolerítico; L) SLM16-20 Basalto amigdalario; M) SLM16-15, Basalto; N) y Ñ) SLM16-89 y SLM16-88A, Andesitas; O) SLM16-100, Basalto dolerítico; P) SLM16-102, Basalto; Q) SLM16-103, Andesita; R) SLM16-105, Basalto; y S) SLM16-106, Dacita. Las descripciones petrográficas detalladas están disponibles en el [Apéndice A](#).





**Figura 12.** A) Fotomicrografías de las lavas del miembro volcánico superior de SDTB, tomadas con el lente 4X: A) SLM16-22, Basalto traquítico; B) SLM16-24, Basalto amígdalar de carbonatos; C) SLM16-25A, Basalto fluidal microcristalino; D) SLM16-26, Basalto hipabisal; E) SLM16-29, Basalto Minglín; F) SLM16-37, Basalto vesicular; G) SLM16-47, Basalto microcristalino; H) SLM16-48, Dique basáltico vesicular microcristalino; I) SLM16-49, Basalto microcristalino. Las descripciones petrográficas detalladas están disponibles en el [Apéndice A](#).

#### 2.1.4 Grupo 4: Volcanismo Pre-Rift (~17–14 Ma)

Con este nombre es definida la secuencia volcánica Pre-Rift asociada al magmatismo superior de las etapas finales de la subducción, el cual ha sido reportado para un rango de edades entre 17 y 14 Ma en otras localidades de Sonora, como rocas intermedias calcoalcalinas, adakíticas y con afinidad adakítica ([Gómez-Valencia et al. 2015](#)). Este magmatismo fluidal o explosivo, normalmente aflora coronando las secuencias detríticas Báucarit y tipo Báucarit ([Gómez-Valencia, 2014](#)). Magmatismo con estas características también es reportado al norte de la SLM, específicamente en la Sierra Picú, donde son descritas tres formaciones volcánicas: tobas, andesitas y traquitas adakíticas eruptadas entre ~17 y 12.7 Ma ([Gómez-Valencia et al. 2019](#)). Particularmente, la secuencia tobácea de la Sierra Picú muestra rasgos muy parecidos a un pequeño afloramiento de tobas de ceniza de origen ignimbrítico ubicado en el límite noreste de las Lomas de Arivaipa en el área de estudio. En este lugar, la secuencia denominada Formación volcánica Las Golondrinas fue fechada en ~17 Ma por [Gómez-Valencia \(2014\)](#),

quién describe que, por las características geoquímicas, esta secuencia piroclástica exhibe rasgos con afinidad adakítica. Esta litología corresponde con potentes afloramientos con facies de una toba de ceniza de origen ignimbrítico color beige amarillento predominantemente lítica con fenocristales de  $Pl > FA > Anf > Bta > Prx$  que se caracteriza por constituir morfologías en ruinas, con relieve abrupto y bien marcado por procesos erosivos.

En el área de estudio en el único lugar donde aflora este tipo de litología es las Lomas de Arivaipa (ver mapa geológico en la Figuras 2 y 13A), donde es posible observar en exposición, un afloramiento con toba de ceniza (Figura 13B), toba de lapilli, toba lítica (Figura 13) porfídica de  $Pl > Anf > Bta > Prx$  color beige amarillento (Figura 3F y G). Los lapillis de pómez están zeolitizados y los líticos son predominantemente asociados con rocas volcánicas intermedias. Esta unidad muestra características adakíticas, mismas que serán detalladas en el apartado 3 de este trabajo y es correlacionable con la Formación volcánica Las Golondrinas de la Sierras Picú (Gómez-Valencia, 2014), con posible correspondencia distal. Por otra parte, es posible que esta litología sea correlacionable con las tobas líticas amarillas indiferenciadas descritas por Darin (2011) para la Sierra Bacha, ubicada al SE de Las Lomas de Arivaipa. La petrografía de esta litología se adjunta en las descripciones del grupo litológico 7 (Figura 21 A, B, C y D).



**Figura 13.** Morfología típica de las tobas dacíticas Pre-Rift: A) Imagen que muestra el contacto de la toba dacítica adakítica correlacionable con la Formación Volcánica Las Golondrinas y los sedimentos detríticos Plio-cuaternarios (de izquierda a derecha en la fotografía aparecen los Dres. Ricardo Vega Granillo, Juan Carlos García y Barragán y Jesús Roberto Vidal Solano); y B) Detalle que exhibe la facies toba de ceniza con horizontes líticos.

## 2.1.5 Grupo 5: Depósitos ignimbríticos distales asociados al rift (12.5 Ma)

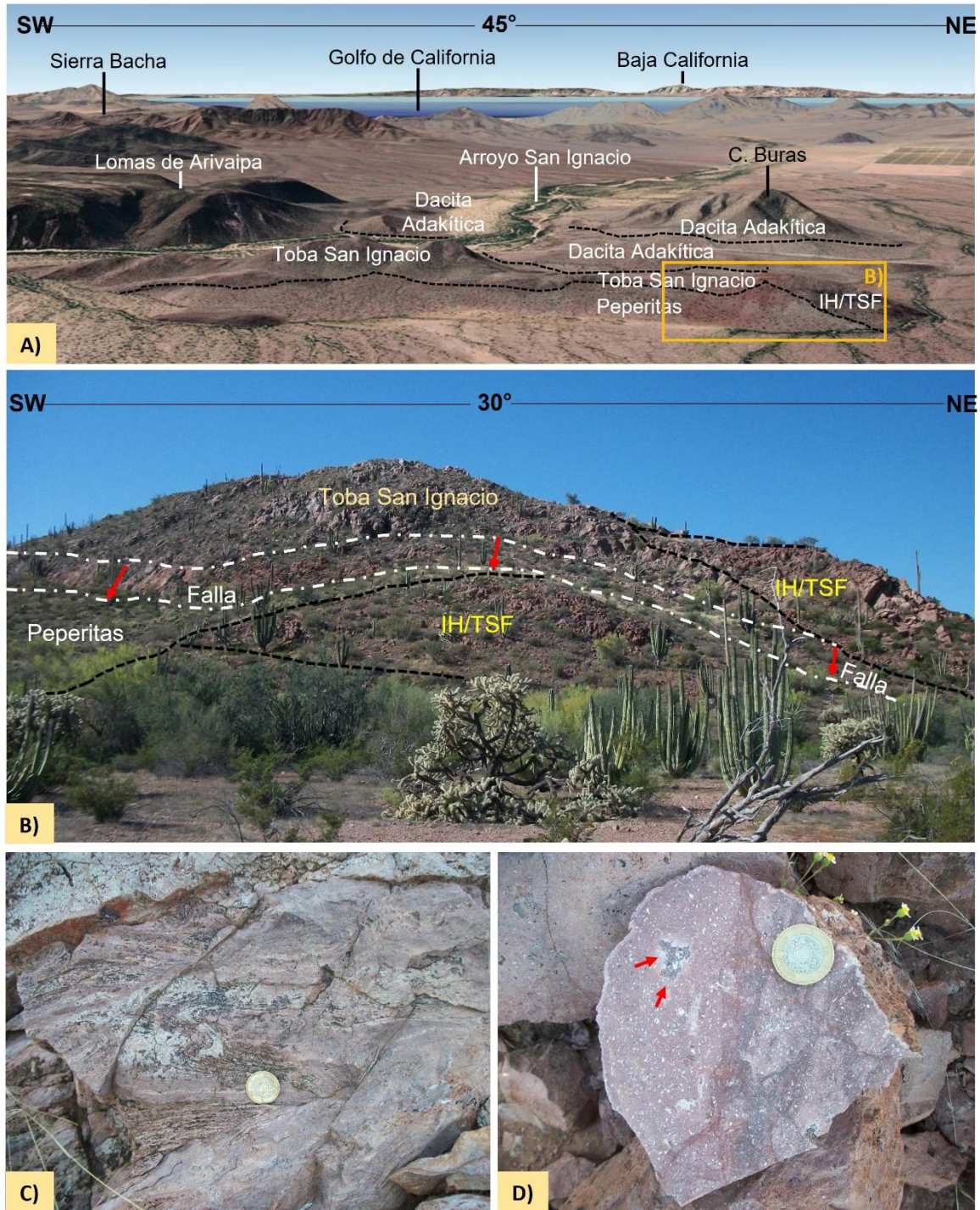
Definimos en este grupo como depósitos ignimbríticos distales asociados al rift a facies de tobas relacionadas con un evento tectónico extensivo:

### 2.1.5.1 Toba de Arivaipa

La Toba de Arivaipa, reportada inicialmente por [Darin \(2011\)](#), aflora exclusivamente en la porción sur del área de estudio, específicamente al Este del Cerro Buras ([Figura 14A](#)). En esta localidad, aflora con un espesor relativo a los 30 m, predominantemente una toba lítica moderadamente soldada, color café rojizo con fenocristales de  $Qzo > FA > Ox-Fe$  con fiammes ocasionales ([Figura 3F y G](#)). Característicamente el cuarzo simula por sectores el aspecto de ojos de cuarzo, por otra parte, es sumamente destacable que esta litología está excesivamente cargada de líticos de rocas volcánicas y presenta horizontes de tobas de ceniza con zeolitas, lo que brinda una tonalidad color amarilla, con aspecto parecido al de la puzolana (término industrial). Además de estas facies observadas en este trabajo, [Darin \(2011\)](#) describió que esta unidad cuenta con una brecha de base cargada en líticos.

### 2.1.5.2 Toba San Ignacio

La Toba San Ignacio (TSI) nombrada por primera vez y fechada en  $12.56 \pm 0.09$  Ma por [Darin \(2011\)](#), fue descrita tanto en la Sierra Bacha como en el sector norte de las Lomas de Arivaipa para referirse a una toba de ceniza riolítica soldada con esferulitas de desvitrificación con afloramientos de hasta 350 m de espesor. En el sector sur del área de estudio, específicamente al Este de Cerro Buras ([Figura 14A](#)), observamos que la TSI está en contacto con la Ignimbrita de Hermosillo/Toba de San Felipe ([Figura 14B](#)) y presenta dos principales facies de enfriamiento, comenzando por 5 m de espesor de un vitrófiro perlítico a vitroclástico color café verdoso porfídico de  $FA > OxFe-Ti$ , seguido de 35 m de espesor de la facies superior contorsionada intensamente silicificada, ligeramente porfídica de  $FA > Anf > Bta > Qzo > OxFe-Ti$  con ocasionales litofisas rellenas de cuarzo ([Figuras 3F, 3G, y 14C](#)).



**Figura 14.** Morfología y rasgos generales de los depósitos ignimbríticos distales asociados al rift de la región de Lomas de Arivaipa: A) Imagen panorámica que muestra las principales localidades de las inmediaciones de las Lomas de Arivaipa y el Cerro Buras; B) Acercamiento de la porción inferior derecha de la Figura 14 A, donde se destaca la morfología de los afloramientos de la Toba San Ignacio y la Ignimbrita de Hermosillo/Toba de San Felipe (IH/TSF), incluyendo una zona de falla que segmenta a la IH/TSD; C) Facies superior contorsionada de la TSI; D) Toba vítrea soldada de origen ignimbrítico correspondiente a la IH/TSF, se destaca la presencia de enclaves traquíticos señalados con las flechas de color rojo.

### 2.1.5.3 Ignimbrita de Hermosillo-Toba de San Felipe

La Ignimbrita de Hermosillo-Toba de San Felipe (IH/TSF) corresponde a un flujo piroclástico hiperalcalino de origen ignimbrítico que incluye varias facies de enfriamiento como vitrófiro, tobas de ceniza, tobas de cristales con asociación mineralógica de  $FA > Cpx > Fy > OxFe > Zr$  (feldespato alcalino, clinopiroxeno, fayalita, óxidos de hierro y zircón). Estas facies han sido descritas en por lo menos 30 localidades en Baja California y 70 localidades en Sonora (Vidal-Solano et al. 2020). En Baja California, se conoce a esta unidad como Toba de San Felipe (Stock et al., 1999; Oskin et al., 2001; Olguin-Villa, 2010; Olguin-Villa et al., 2013) y en Sonora ha sido descrita como la Ignimbrita de Hermosillo (Paz-Moreno, 2000; Vidal-Solano et al., 2005, 2007, 2008; Barrera-Guerrero y Vidal-Solano, 2010; Gómez-Valencia, 2011, 2014; Gómez-Valencia et al., 2015; Velderrain-Rojas, 2015, 2017; Piña-Páez, 2020).

Particularmente en Sonora, la extensión de la IH/TSF es tan amplia, que se pueden designar límites distales, al Norte en las regiones de la Sierra Bacha (Darin, 2011) y Rayón, Sonora (Gómez-Valencia, 2011; Gómez-Valencia et al., 2015), al Este en las inmediaciones de San José de Batúc (Palomino-Medina y Vidal-Solano, 2009), al Oeste en la porción costera de Bahía de Kino-Punta Chueca (Bennett et al. 2009) y Guaymas-San Carlos (Velderrain-Rojas, 2015; Piña-Páez, 2020) y al Sur en el área de Ciudad Obregón (Vidal-Solano et al., 2010).

Este extraordinario pulso ignimbrítico constituye un importante marcador estratigráfico que permite contribuir con la reconstrucción tectónica del NW de México (Stock y Hodges, 1989; Oskin, 2002; Demant, 2005; Vidal-Solano et al., 2007; Bennett, 2009), donde Piña-Páez (2020) ha destacado nueva relevancia tectónica al correlacionar con fundamento paleomagnético, una facies de la IH/TSF que aflora en San Carlos, Sonora, con una facies distal de la misma unidad que aflora en Cataviñá, Baja California, con 430 km de distancia entre sí.

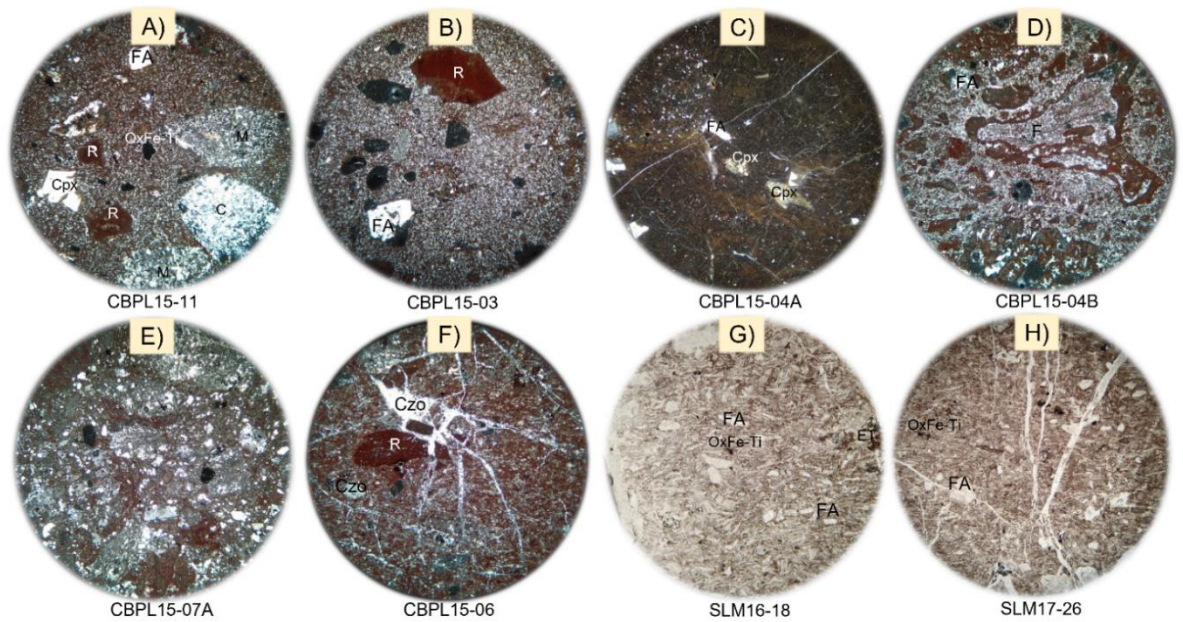
Por la naturaleza espacial del evento piroclástico, Vidal-Solano et al. (2008) sostienen que esta unidad posiblemente cubrió un área aproximada a 50,000 km<sup>2</sup>, producto de una mega-erupción durante el Mioceno medio. Por su parte, Barrera-Guerrero (2012) y Olguin-Villa (2013) corroboraron esta información, estableciendo que un punto de emisión con importante concentración del magmatismo hiperalcalino donde se encuentra también la IH/TSF, se ubica en la Sierra Libre, lo anterior evidenciado entre otros aspectos geológicos y geoquímicos, con la presencia de facies con remorfismo, las cuales son cercanas a un punto de emisión (Vidal-Solano et al. 2013). Finalmente, Gómez-Valencia (2014) propuso que, en consideración a la

representatividad espacial de este magmatismo en el NW de México, esta secuencia magmática anorogénica del Mioceno Medio debía nombrarse Grupo Sierra Libre.

En la Sierra Los Mochos la IH/TSF, aflora en la porción Norte, específicamente al NE del Cerro La Cruz y al NE del Cerro Mochos (Figura 4A), sobreyace al volcanismo tipo Sierra Madre Occidental. En este sector, fue posible observar al menos tres litofacies, de la base a la cima afloran al menos 40 m de un vitrófiro negro con fiammes, seguido de 5 m de una litofacies color rosa correspondiente a una toba de ceniza a toba de lapilli silicificada y 10 m de una facies masiva color rosa amoratado con contenido de enclaves traquíticos. Estas facies son seccionadas por abundantes fallas normales y de deslizamiento lateral derecho (Figura 2).

En el área norte de las Lomas de Arivaipa, justo en el sector oeste del Cerro Buras (Figura 4D) en discordancia y con una actitud de  $18^{\circ}/25$  (mediciones tomadas aplicando la regla de la mano derecha), afloran 10 m de espesor de una facies de una toba vitroclástica desvitrificada, sobreyacida por al menos 20 m de espesor de una facies superior prismática conformada por una toba de ceniza lítica con importante concentración de enclaves traquíticos (Figura 14D). En general la IH/TSF presenta una asociación mineral de  $FA > Cpx > Fy > OxFe$ . Cabe destacar que, en esta localidad, la IH-TSF es fuertemente seccionada por una falla normal regional con componente oblicuo con actitud  $352^{\circ}/76^{\circ}$ ; pitch  $45^{\circ}$  desde el NW (Figura 14B).

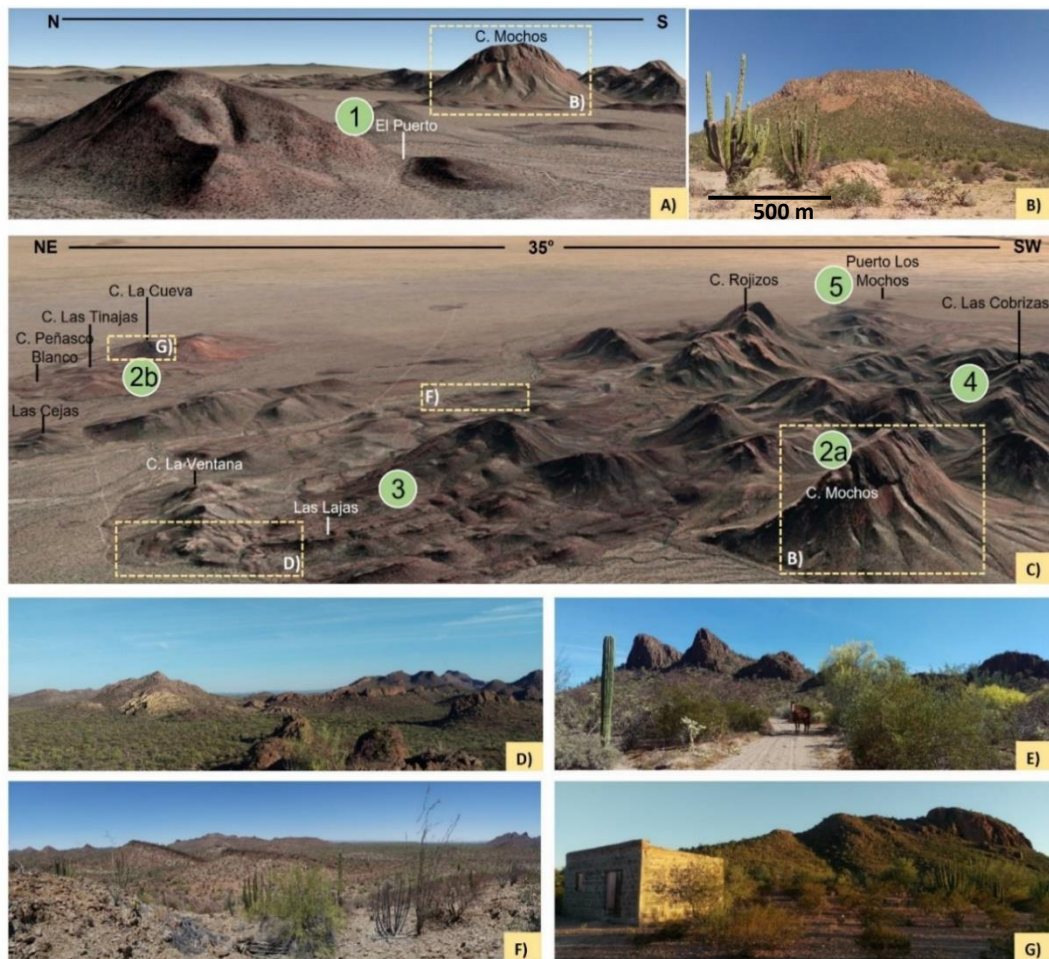
Por otra parte, en las inmediaciones del Cerro Buras y en la SLM, la IH/TSF ha sido reconocida con hasta 70 m de facies soldadas con fiammes y sectores traquíticos que incluye a un vitrófiro basal de hasta 1 m de espesor para la región de Desemboque y Sierra Bacha (Darin, 2011), ubicadas al oeste y suroeste de la Sierra los Mochos. Además, Bennett et al. (2007) informan una edad  $^{40}Ar/^{39}Ar$  de  $12.50 \pm 0.08$  Ma para la IH/TSF en la región costera, edad correlativa considerada para los afloramientos de la IH/TSF en este trabajo.



**Figura 15.** Fotomicrografías de las facies de los depósitos ignimbríticos distales asociados al Rift, tomadas con el lente 4X: A y B) CBPL15-11 y CBPL15-03, Tobas líticas ignimbríticas correspondientes a la unidad Toba de Arivaipa; C) CBPL15-04A, vitrófiro correspondiente a una facies de la Toba San Ignacio; D) CBPL15-04B, toba de ceniza ignimbrítica correspondiente a la Toba San Ignacio; E, F, G y H) CBPL15-07A, CBPL15-06, SLM16-18, y SLM17-26, tobas de ceniza ignimbrítica correspondientes con facies de la Ignimbrita de Hermosillo/Toba de San Felipe. Las abreviaturas de rocas y minerales son: FA. Feldespato Alcalino; Cpx. Clinopiroxeno; Czo. Cuarzo; OxFe. Óxidos de Hierro; R. Riolita; C. Cuarcita; M. Monzonita; ET. Enclave traquítico y F. Flamas o Fiammes. Las descripciones petrográficas detalladas están disponibles en el [Apéndice A](#).

### 2.1.8 Grupo 6: Volcanismo toleítico de rift (~12.5–10.4 Ma)

El volcanismo toleítico de rift está evidenciado en la región por al menos 18 unidades volcánicas félsicas e intermedias agrupadas en riolitas-ignimbritas y dacitas-traquidacitas e islandíticas, constreñidas en un rango de edad entre ~12.5 a 10.4 Ma en consideración de las edades de las secuencias inferior y superior que limita a esta sucesión magmática de ~750 m de espesor ([Figura 3G](#)), que cubre ~30 Km<sup>2</sup> en un área que esta disectada estructuralmente y provoca la repetición de las unidades, por lo que no fue posible identificar un solo afloramiento que cuente con la secuencia completa. Las principales localidades donde afloran estas unidades magmáticas están comprendidas en ([Figura 16A y C](#)): 1. El Puerto (al SE del Cerro La Pirinola; [Figura 16A](#)); 2a. Cerro Mochos ([Figura 16A y B](#)); 2b. Cerros La Cueva ([Figura 16G](#)), Las Tinajas, Peñasco Blanco y Las Cejas ([Figura 16C](#)); 3. Las Lajas ([Figura 16C y E](#)); 4. Cerro Las Cobrizas ([Figura 16C](#)); y 5. Puerto Los Mochos ([Figura 16C](#)).



**Figura 16.** Morfología y rasgos generales del magmatismo toleítico de rift del Norte de la Sierra Los Mochos (SLM): A) Panorámica Google Earth con vista al Este, donde se exhiben las localidades con magmatismo félsico toleítico El Puerto y Cerro Mochos; B) Acercamiento de la porción superior derecha de la Figura 16A, donde se destaca la morfología del Cerro Mochos, lugar emblemático de la SLM; C) Imagen panorámica Google Earth, donde se muestran las principales localidades estudiadas: 1. El Puerto (al SE del Cerro La Pirinola); 2a. Cerro Mochos; 2b. Cerros La Cueva, Las Tinajas, Peñasco Blanco y Las Cejas; 3. Las Lajas; 4. Cerro Las Cobrizas; y 5. Puerto Los Mochos. D) Acercamiento de la porción inferior izquierda de la Figura 16C, donde se aprecia el contacto del magmatismo toleítico de rift con el magmatismo correspondiente al Volcanismo tipo Sierra Madre Occidental; E) Fotografía representativa de la porción Norte de las Islanditas del sector de Las Lajas; F) Acercamiento de la porción central de la Figura 16C, para mostrar la morfología típica en meseta de las Islanditas superiores; y G) Morfología típica de las riolitas e ignimbritas Islánditicos en el sector del Rancho Los Mochos abandonado.

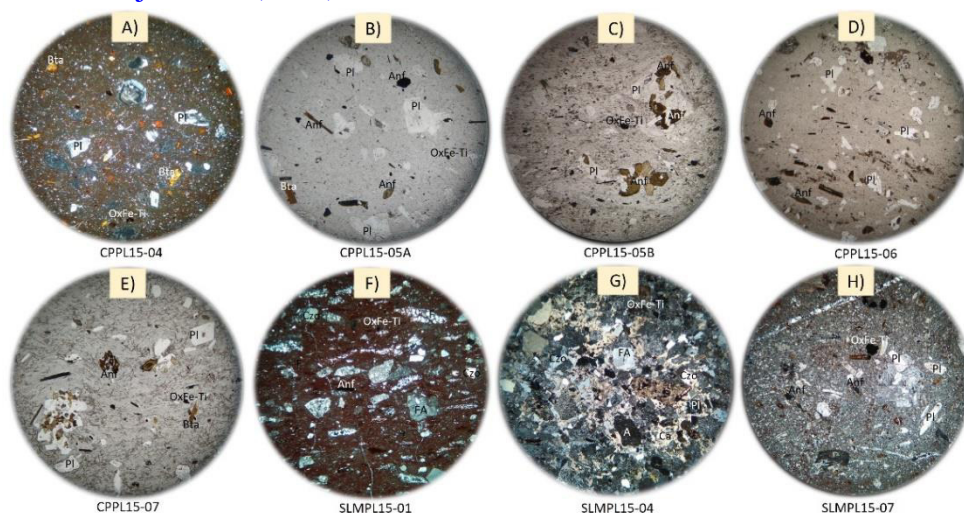
### 2.1.8.1 Riolitas e Ignimbritas

Estas unidades se componen de 6 litologías félsicas, agrupadas como Ignimbritas y Riolitas Mochos e Ignimbrita El Puerto (Figura 2), cinco de ellas afloran en el sector 2B (Figura 16C), constituyendo un total cercano a 1000 m de espesor entre miembros volcánicos de riolitas porfídicas de FA > Czo > Anf > Bta > OxFe-Ti (Figura 17) presentando una facies de brechas, vidrio y masiva con prismas de enfriamiento y sectores con abundancia de ojos de cuarzo (Puerto Los Mochos; Figura 17F, G y H) fechado con la técnica geocronológica U-Pb en 11.42



$\pm 0.13$  (Cerro Cobrizas). Por otro lado, a este grupo de rocas félsicas también se le atribuye afloramientos abruptos de una riolita vítrea perlítica con sectores desvitrificados con asociación mineralógica correspondiente con  $Pl > Anf > Prx > OxFe-Ti$  (Figura 17A, B, C, D y E). Estas lavas vítreas únicamente afloran al noroeste de la Sierra Los Mochos, dentro de las inmediaciones del Cerro La Pirinola.

Por otra parte, también se identifican cuerpos riolíticos ricos en  $Czo > OxFe$  (Figura 18) con la presencia de una incipiente a muy marcada alteración potásica, oxidación y silicificación (Figura 16C, zona 2a y 2b). La situación de la alteración es un rasgo característico de estos afloramientos, al añadir una destacable tonalidad blanca, que lo convierte en una identidad típica para este tipo de afloramientos (Cerros Las Tinajas y Peñasco Blanco). Sobreyaciendo esta secuencia, se tiene una toba de cristales ignimbrítica de  $Czo > Bta > OxFe-Ti$  con ojos de cuarzo (Cerro la Cueva) y una riolita microcristalina fechada con la técnica geocronológica U-Pb  $11.33 \pm 0.06$  Ma (SE Cerro Las Tinajas). Si partimos de una consideración del tipo de magmatismo en el proto-Golfo de California, estas unidades volcánicas son equiparables con el enjambre de diques ácidos de biotita de grano fino de la Isla San Pedro Nolasco fechados en  $9.62 \pm 0.36$  Ma por Velderrain-Rojas et al. (2022).



**Figura 17.** Fotomicrográficas de las facies félsicas del magmatismo toleítico de Rift, tomadas con el lente 4X: A) CPPL15-04, vidrio riolítico; B, C, D y E) CPPL15-05A, 05B, 06, 07, vidrio perlítico con Bta y Anf; F) SLMPL15-01, facies eutaxítica con fiammes, de una toba vítrea ignimbrítica; G) SLMPL15-04, toba de cristales ignimbrítica con alteración en parches; y H) SLMPL15-07, toba microcristalina de origen ignimbrítico. Las abreviaturas de rocas y minerales son: FA, Feldespato Alcalino; Pl, Plagioclasa; Anf, Anfibol; Bta; Biotita; Czo, Cuarzo; y OxFe, Óxidos de Hierro. Las descripciones petrográficas detalladas están disponibles en el [Apéndice A](#).

Finalmente, en cuanto este grupo magmático se refiere, en el sector NW de la SLM y en el cerro emblemático del área denominado Cerro Mochos, se identificó aflorando en la cima con

poco más de 100 m de espesor, a una riolita blanca a color beige rosado afanítica a microcristalina silicificada (**Figura 18A y B**), la cual está fuertemente fracturada con presencia de abundantes óxidos en las superficies de planos, litología muy similar a las riolitas alteradas de los cerros Las Tinajas y Peñasco Blanco (**Figura 18 del inciso D al N**).

Estas rocas volcánicas son afectadas estructuralmente por fallas normales que secciona y desplaza las unidades, particularmente en el Cerro Mochos, se destaca la presencia de tres fallas normales NW-SE que son paralelas y repiten la unidad riolítica, lo que provocó la formación de un suelo en la porción central y NE del mismo cerro.

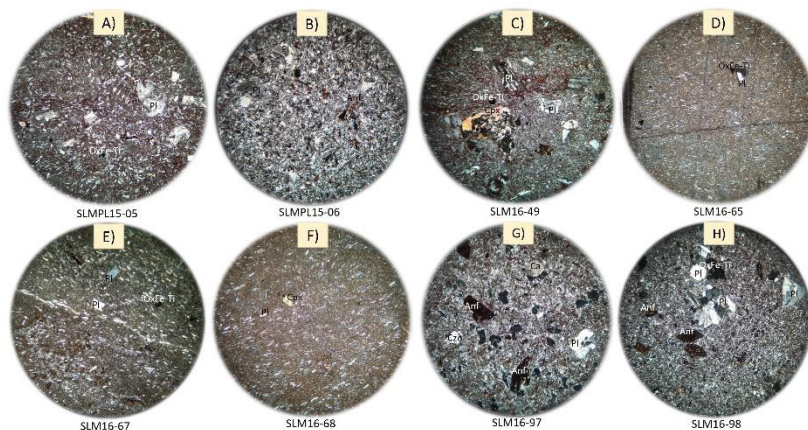
### **2.1.8.2 Islanditas**

Las rocas intermedias a félsicas del magmatismo toleítico son de una asociación mineralógica anhidra y tienen recurrentemente la presencia de pigeonita como una característica mineralógica distintiva. En Sonora se han encontrado dentro de la secuencia magmática de rift del Protogolfo de California en un rango de edades entre 11 y 9 Ma, identificadas en la región de La Colorada y Sierra San Antonio por [Vidal Solano et al. 2009](#); en la Sierra Los Cerros Colorados y Sierra Siete Cerros por [Gómez-Valencia \(2014\)](#), reconociéndose en esta última localidad, a la máxima expresión de este tipo de unidades magmáticas con un espesor aproximado a 200 m, que incluye facies de brechas, vidrios, perlitas, fluidales y microcristalinas; confirmando la anterior afirmación por el basto magmatismo toleítico con islanditas de la Sierra El Bacatete, descrito por [Vidal-Solano y Lozano-Santa Cruz \(2015\)](#).

Las dacitas, traquidacitas e islanditas, tienen una presencia dominante en el Norte de la Sierra Los Mochos (**Figura 16C**, sector 3 correspondiente a las Lajas y las Cejas) en las localidades del Cerro La Pirinola, Las Lajas, Rancho La Casona, Las Cejas y en el Puerto Los Mochos localizado en el sector SE de la SLM (**Figura 16C**, zona 5). Estos afloramientos que consisten en al menos 12 diferentes pulsos magmáticos intermedios representadas por brechas basales, facies vítreas, facies fluidales y facies prismáticas, suman un espesor relativo a los 200 m y morfológicamente son visualizadas como una serie de mesas basculadas alargadas con orientación dominante N-S y NW-SE. Las litológicas que componen a esta unidad, varían de dacitas, traquidacitas y traquitas con asociación mineralógica general de  $Pl > Anf > Czo > OxFe-Ti$  (**Figura 19**).



**Figura 18.** Fotomicrográficas de las facies félsicas con alteración del magmatismo toleítico de Rift, tomadas con el lente 4X: A y B) CM16-29, 30, riolita microcristalina con silicificación; vidrio riolítico; C) SLM16-39A, ignimbrita riolítica silicificada; D) SLM16-72, riolita silicificada; E al J) Riolita silicificada con oxidación en parches; K y L) SLM16-83 y SLM16-84, riolita microcristalina con silicificación; M) SLM16-85, riolita fluidal con silicificación; N) SLM16-87, riolita microcristalina; O) SLM17-08, riolita vítrea con silicificación y P) SLM17-18, toba riolita desvitrificada con líticos. Las abreviaturas de rocas y minerales son: FA. Feldespato Alcalino; Pl. Plagioclasa; Qzo. Cuarzo; OxFe. Óxidos de Hierro y A. Andesita. Las descripciones petrográficas detalladas están disponibles en el [Apéndice A](#).



**Figura 19.** Fotomicrográficas de las facies intermedias del magmatismo toleítico de Rift, tomadas con el lente 4X: A y B) SLMPL15-05 y 06, traquita microcristalina porfídica con textura traquítica; C) SLM16-49, traquidacita porfídica de  $Pl > Cpx > OxFe$ ; D) SLM16-65, dacita vítrea a microcristalina; E y F) SLM16-67 y 68, traquitas ligeramente fluidales con  $Pl > Cpx > OxFe$ ; G y H) SLM16-97 y 98, traquidacitas ligeramente microcristalinas con  $Pl > Qzo > Anf > OxFe$ . Las abreviaturas de rocas y minerales son: FA. Feldespato Alcalino; Pl. Plagioclasa; Anf. Anfíbol; Qzo. Cuarzo; y OxFe. Óxidos de Hierro; Las descripciones petrográficas detalladas están disponibles en el [Apéndice A](#).

### 2.1.7 Grupo 7: Volcanismo de rift con afinidad adakítica (~10.4 Ma)

La cartografía geológica, el estudio petrográfico, geoquímico y de geocronología U-Pb en zircones, permitió establecer en la secuencia syn-rift la presencia de un volcanismo con tendencia adakítica de  $10.46 \pm 0.19$  Ma, que es reportado por primera vez para esa edad en Sonora. Consiste en al menos tres pulsos magmáticos con facies de brechas vítreas, fluidales y masivas (Figuras 20B, C y D) provenientes de estructuras dómicas vítreas de composición dacítica y traquidacíticas con alto contenido en plagioclasas y anfíboles (Figura 20 y 21). La asociación mineralógica general corresponde a  $Pl > FA > Anf > Prx > OxFe-Ti$ , con un dominio de texturas porfíricas y de inmiscibilidad de magmas (mingling, Figuras 20B y 21F), uno de color gris con concentración mineral rica en  $Pl > Anf$  (Figura 21G) y otro de color marrón con textura porfídica y asociación mineral de  $Pl > Prx > Anf > OxFe$  (Figura 21H). La mejor exposición de estos afloramientos se encuentra en las localidades de los Cerros Rojizos en la SLM, en las inmediaciones de las Lomas de Arivaipa (LA) y el Cerro Buras (norte de LA), en donde presentan espesores 350 m. Es importante mencionar que, en la base de estas unidades volcánicas comúnmente ocurren xenolitos microcristalinos de color blanco, enclaves y líticos (hasta 7 m de diámetro), situación que provocó que el estudio geocronológico tuviera un minucioso detalle para la selección de los zircones necesarios para fechamiento, dado que al inicio del análisis se obtenían fracciones con edades Cretácicas.

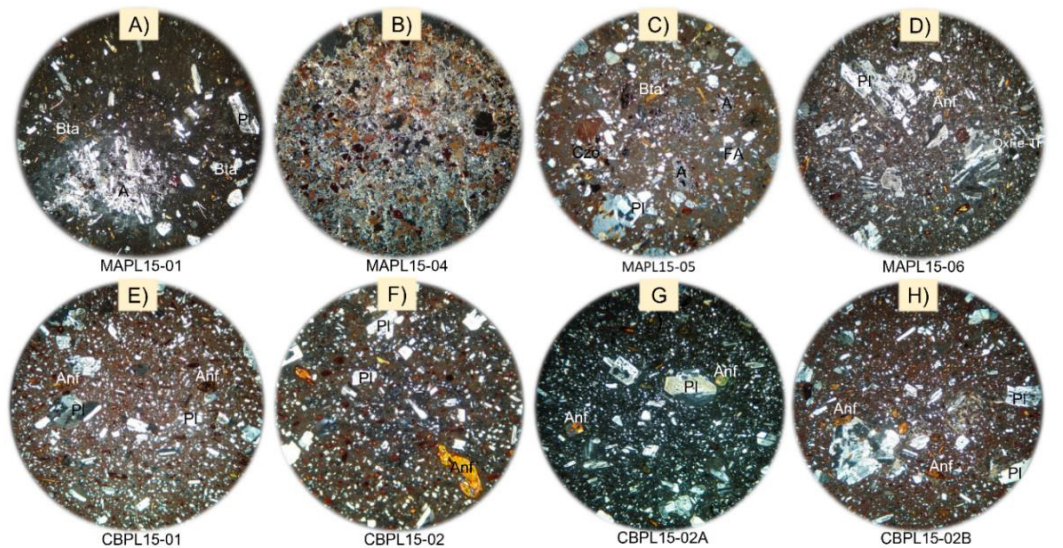
El volcanismo de rift con tendencia adakítica, ha sido ampliamente reconocido en la región de Baja California en al menos 8 localidades con edades que son agrupadas entre el Mioceno (~18 Ma) y el Plio-Cuaternario (~22 Ka): La Purísima y San José de Comondú (Umhoefer et al. 2001; Bellon et al., 2006; Bryan et al., 2013); Jaraguay (Pallares, 2007; Pallares et al., 2007); San Borja (Pallares et al., 2007); Santa Clara (Aguillón-Robles, 2002; Pallares, 2007; Pallares et al., 2007); Santa-Rosalía (Conly et al., 2005); Tres Vírgenes (Sosa-Ceballos et al., 2019); Loreto (Umhoefer et al. 2001; Aguillón-Robles, 2002); Isla Santa Margarita (Bonini y Balwin, 1998). Particularmente en la región correspondiente a Sonora, solo estaba identificado magmatismo adakítico en la Isla San Esteban (Pallares, 2007; Calmus et al., 2008) y en la Isla del Tiburón (Aguillón-Robles, 2002).

En lo que concierne a las inmediaciones del área de estudio, solo se ha identificado magmatismo de tal naturaleza con edades del Oligoceno al Mioceno inferior en la Sierra Picú

(Gómez-Valencia, 2014) y de la misma manera con asociación a la subducción de la placa Farallón debajo de la Norteamericana. Darin (2011) reconoció litologías con la misma asociación mineralógica en la Sierra Bacha (ubicada al SW de la SLM).



**Figura 20.** Morfología y rasgos generales del magmatismo de rift con tendencia adakítica de la Sierra Los Mochos (SLM) y del área de Cerro Buras: A) Panorámica Google Earth con vista al Este, donde se destaca la zona de Cerro Buras y Arroyo San Ignacio como principales sitios adakíticos de rift y se señala la zona de fechamiento; B) Facies mingling; C) Facies vítrea; D) Facies masiva a fluidal.



**Figura 21.** Fotomicrograffas del magmatismo adakítico de la Sierra los Mochos y Lomas de Arivaipa tomadas con el lente 4X: magmatismo adakítico pre-rift, A, B, C y D) MAPL15-01, MAPL15-04, MAPL15-05 y MAPL 15-06 tobas e ignimbritas dacíticas porfídicas de  $Pl > FA > Bta > OxFe$ . Facies de las dacitas y traquidacitas del volcanismo de rift con tendencia adakítica, E) CBPL15-01, brecha dacítica de  $Pl > Anf > OxFe-Ti$ ; F) CBPL15-02, facies de mingling donde se destacan las zonas gris y marrón; G) CBPL15-02A, facies vítrea gris oscuro muy porfídica de  $Pl, Pr, Anf, OxFeTi$ ; H) CBPL15-02B, facies marrón porfídica de  $Pl > Anf > OxFeTi$ . Las abreviaturas de rocas y minerales son: Pl. Plagioclasa; FA. Feldespato Alcalino; Bta. Biotita; OxFe. Óxidos de Hierro. Las descripciones petrográficas detalladas están disponibles en el [Apéndice A](#).

### 2.1.6 Grupo 8: Conglomerados superiores (~12.5–10.6 Ma)

Con el nombre de conglomerados superiores son agrupadas en este trabajo las unidades detríticas discordantes que predominantemente afloran sobreyaciendo a las unidades magmáticas Pre-Rift, Syn-Rift, formándose en una etapa erosiva posterior a los ~12.5 Ma.

La unidad detrítica dominante con un espesor ~20 m (Figura 3G), corresponde a un conglomerado polímitico mal clasificado, moderadamente consolidado con estratificación normal por sectores y horizontes arenosos. Presenta líticos de rocas volcánicas de rift con tendencia adakítica observadas en el Cerro Buras y clastos de la Ignimbrita de Hermosillo/Toba de San Felipe (IH/TSF).

Bajo la consideración de la presencia de clastos de la IH/TSF en este conglomerado es ya ha sido reportado por [Gastil et al. \(1973\)](#) mencionando rasgos equiparables para un conglomerado al que denominó como conglomerado exótico.

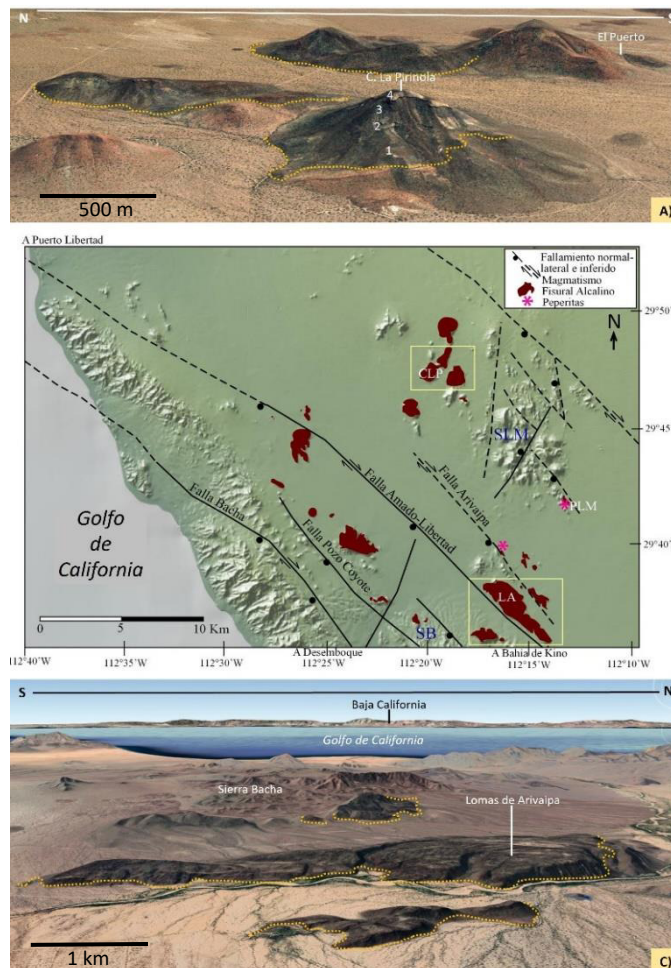
La mejor exposición litológica de esta unidad aflora consiste de un afloramiento ~20 m de espesor en la Loma de Arivaipa y es sobreyacida por contacto discordante por el Basalto de Arivaipa (descrito en el apartado 2.19). Este basalto había sido generalizado en el área por [Darin \(2011\)](#), por lo que en su cartografía geológica no se representa.



**Figura 22.** Rasgos generales del mejor representante del Conglomerado Superior que aflora en las Lomas de Arivaipa, al Sur de la Sierra Los Mochos. En la fotografía se señala la presencia de un clasto de la Ignimbrita de Hermosillo/Toba de San Felipe.

### 2.1.9 Grupo 9: Volcanismo alcalino de rift con peperitas ultrapotásicas (~10.6 – 6.5 Ma)

En el volcanismo alcalino de rift están incluidos al menos cuatro pulsos magmáticos máficos predominantemente de composición basáltica alcalina, cuyos afloramientos alcanzan hasta 40 m de espesor, que exhiben a manera de mesas sub-horizontales y con tendencia a presentar drenajes fluidales con dirección preferencial al suroeste. Esta unidad magmática ha sido denominada Basalto Arivaipa y al Norte de la Sierra Bacha, fue fechado con la técnica geocronológica K-Ar en  $6.4 \pm 1.9\text{Ma}$  (Gastil y Krummenacher, 1977) y verificado en  $10.59 \pm 0.06\text{Ma}$  con la técnica geocronológica  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  (Darin, 2011). Las diferencias geocronológicas son evidentes en cuanto a la técnica empleada y el año en que se efectuó la fecha, sin embargo, con las observaciones geológicas de campo tiene mayor coherencia la edad más joven.



**Figura 23.** Morfología y rasgos generales del magmatismo alcalino de Rift en la Sierra Los Mochos (SLM) y en el área de Lomas de Arivaipa: A) Apilamiento de cuatro pulsos magmáticos máficos alcalinos en el Cerro la Pirinola, ubicado al NW de la SLM; B) Mapa de relieve, que muestra en polígonos de color guinda, los principales afloramientos del y las inmediaciones del área de estudio. Se destaca con estrellas de color rosa, los únicos sitios donde se detectó la presencia de peperitas ultrapotásicas; C) Morfología fluidal, del magmatismo máfico de rift en las Lomas de Arivaipa, nótese el típico afloramiento en meseta de color oscuro que caracteriza a estos magmas.

Estas unidades magmáticas de textura porfídicas con asociación mineral de  $Pl > Cpx > Opx > Ol$  con arreglo traquítico (Figura 24B, D, E, F) y doleríticas (Figura 24A, C, I). Abundan las facies fluidales, masivas, vesiculares y amigdalares con vetillas de caliche y calcita (Figura 24J, K, L). Estos basaltos tienen como característica la presencia de megacrístales de plagioclasa de la variedad labradorita. En algunas localidades como en las Lomas de Arivaipa, se presentan brechas de base con tonalidades rojizas.

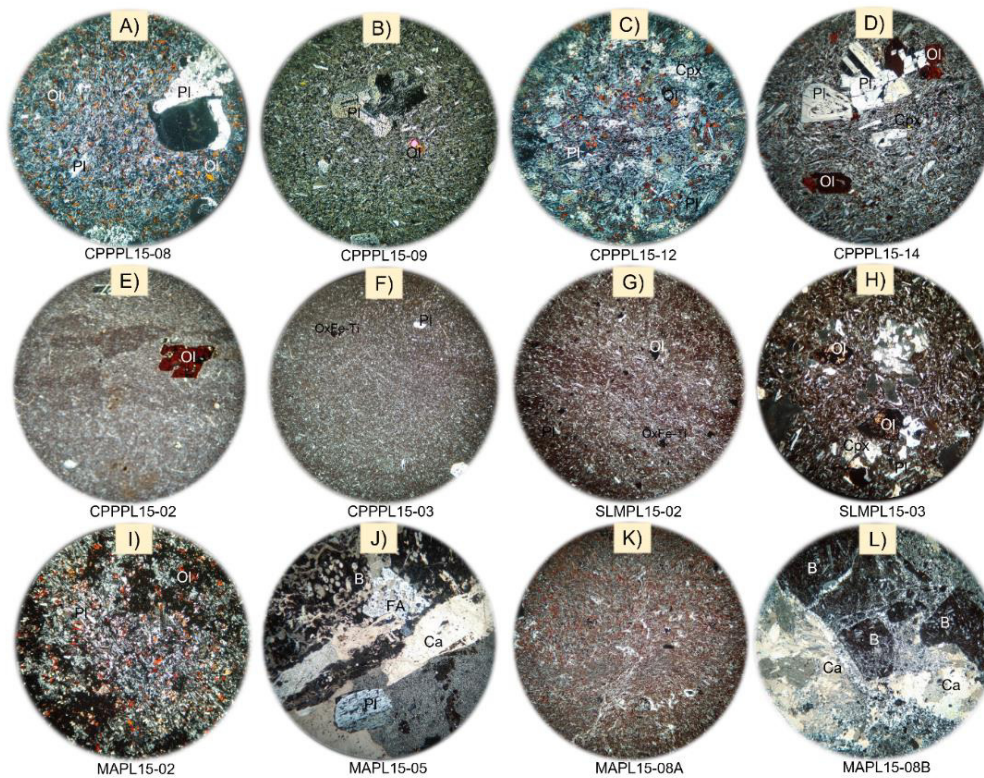
Dentro de los grupos magmáticos estudiados en este sector, en donde destacan rocas básicas como lavas, también afloran evidencias de las intrusiones de magmas máficos subvolcánicos (Figura 25A, B) en sedimentos carbonatados (Figuras 24G, H, J, K, L; 25C, D, E) con contenido en bioclastos de braquiópodos y moluscos (Figura 25H). Esta interrelación magmatismo-sedimentos, es conocida genéticamente como peperitas (Figura 25F, White et al., 2000; Skilling et al., 2002). Las peperitas en el área de estudio, afloran selectivamente en las localidades al NE del Cerro Buras en el sector de las Lomas de Arivaipa y al E del Puerto Los Mochos ubicado al sur de la SLM. La observación en campo de este grupo litológico consistió en identificar inyecciones magmáticas (Figura 25A) que incluyen grandes bloques de rocas carbonatadas de apariencia típica de calizas gris azulado con intemperismo kárstico (Figura 25G) y viceversa, bloques de caliza que incluyen fragmentos brechoides del magmatismo máfico (Figura 25E). Cabe destacar que, por la acción del contacto por calor del magma con el sedimento, en realidad el material carbonatado muestra recristalización tal que, en términos de clasificación estricta debe de considerarse como una meta-caliza.

Por lo anterior y dadas las características texturales correspondientes a mega brechas irregulares de magmatismo con sedimento consolidado, este tipo de peperitas clasifican como peperitas blocosas (White et al., 2000; Soto y Alvarado, 2012).

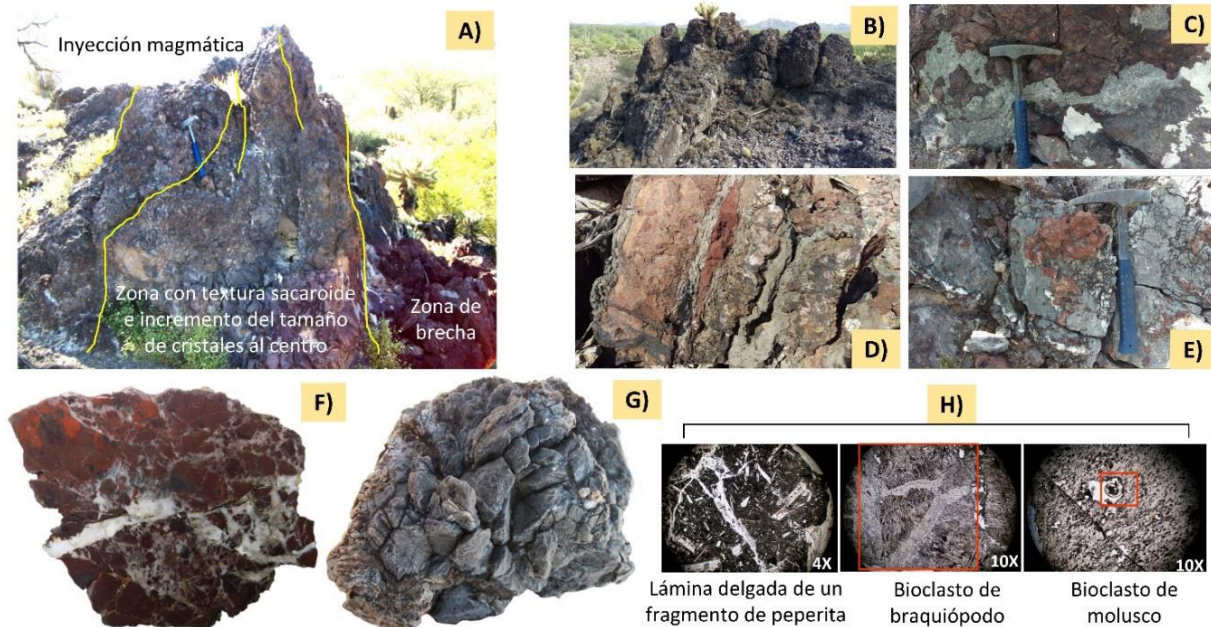
Adicionalmente de manera secundaria, observamos que estos afloramientos son invadidos por vetillas ricas en sílice y mineralización económica rica en fierro.

Finalmente, la parte magmática normalmente afanítica, micro a criptocristalina (Figura 24K) de estas peperitas, cuenta con bajas concentraciones en  $SiO_2$  y elevados valores de  $K_2O + Na_2O$ , son clasificadas como foiditas y tefri-fonolitas, rasgo geoquímico que es confirmado por la presencia de feldespatoides normativos (información detallada en el apartado de geoquímica).





**Figura 24.** Fotomicrografías del magmatismo alcalino de rift con peperitas tomadas con el lente 4X: A) Basalto dolerítico del Cerro La Pirinola; B) Basalto traquíutico de  $Pl > Ol > OxFe-Ti$ ; C) Basalto dolerítico-ofítico  $Pl > Cpx < Ol > OxFe-Ti$ ; D) Basalto traquíutico con megacristales de  $Pl > Ol$ ; E y F) Basaltos microcristalinos de  $Pl > Ol > OxFe$ ; G y H) Fases magmáticas de los magmas peperíticos de la SLM; I) Basalto de las Lomas de Arivaipa  $Pl > Cpx > Ol$  iddigsitizado; J, K, L) Peperitas de las Lomas de Arivaipa. Las abreviaturas de rocas y minerales son: Pl. Plagioclasa; FA. Feldespato alcalino; Ol. Olivino; Cpx. Clinopiroxeno; OxFe. Óxidos de Hierro; Ca. Calcita; B. Basalto. Las descripciones petrográficas detalladas están disponibles en el [Apéndice A](#).



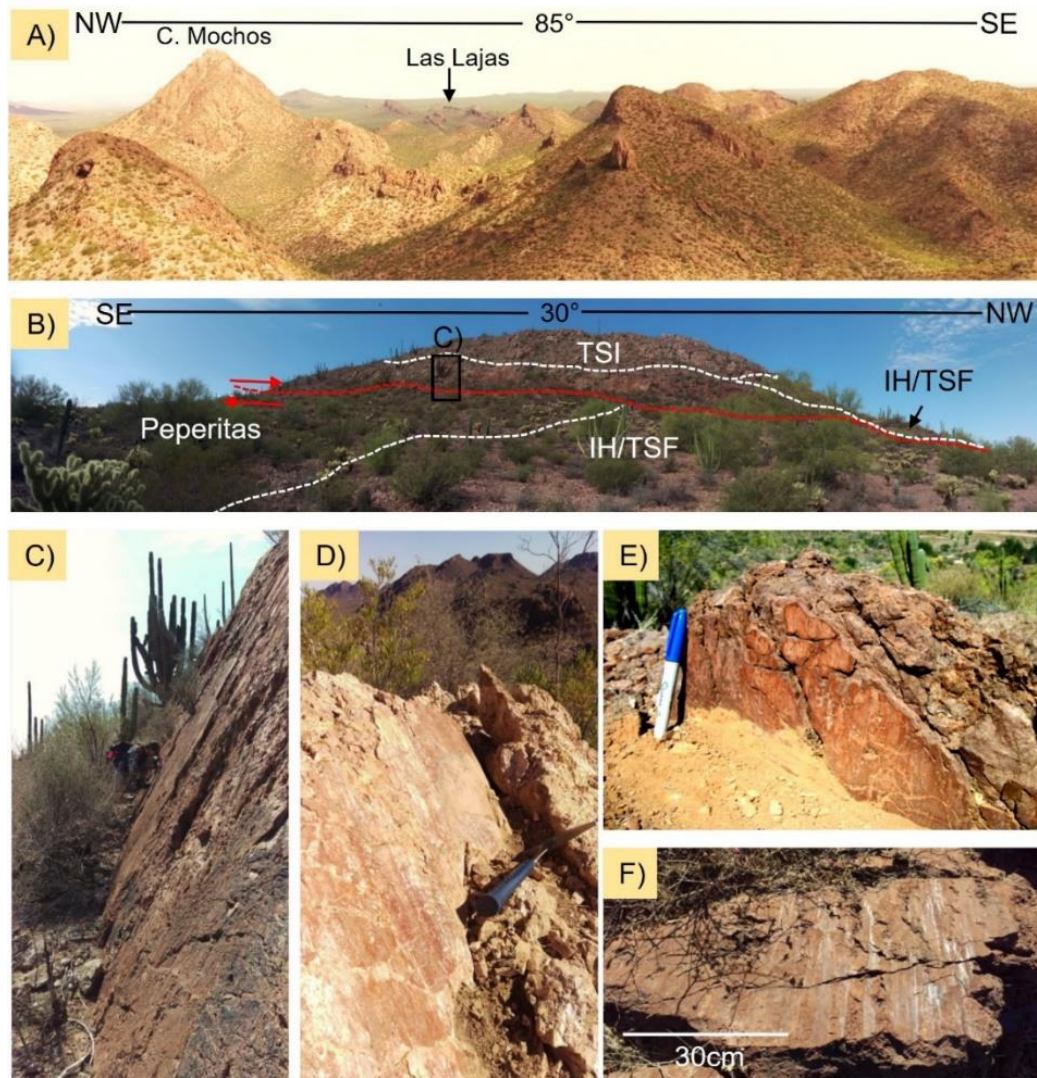
**Figura 25.** Morfología y rasgos generales del magmatismo alcalino de rift con peperitas de la Sierra Los Mochos (SLM) y del área de Lomas de Arivaipa: A) Inyección magmática peperítica en la zona de la falla Arivaipa, mayor detalle en la [Figura 23B](#); B) Facies brechoide en zona de inyección magmática; C) Magmatismo con bloques de meta-calizas, peperita; D y E) Meta-Calizas con bloques de magmatismo máfico; F) Peperita con vetillas de calcita; G) Meta-caliza con clásica apariencia kárstica; H) Magmatismo y remanentes de sedimentos carbonatados con bioclastos de braquiópodos y moluscos.

El magmatismo alcalino ha sido ampliamente estudiado en otras localidades de Sonora, como lo es en los campos volcánicos del Sáric, Rosario de Tesopaco y San Francisco de Batúc, con edades entre 8 y 3 millones de años y han sido englobados de un sector con abundante magmatismo alcalino en el reconocido “Alineamiento Pápago-Yaqui” (Paz-Moreno, 1992; Corella-Santa Cruz, 2017). Por otra parte, con edades Plioceno-Cuaternario entre 0.78 y 1.10 Ma Paz-Moreno et al. (2004) han reportado en el campo volcánico El Pinacate, para la presencia de un vulcanismo basáltico con firmas geoquímicas alcalinas, mostrando características típicas de magmatismo intraplaca (Donnelly, 1974; Lynch, 1981; Paz-Moreno, 1992; Paz-Moreno et al., 2003).

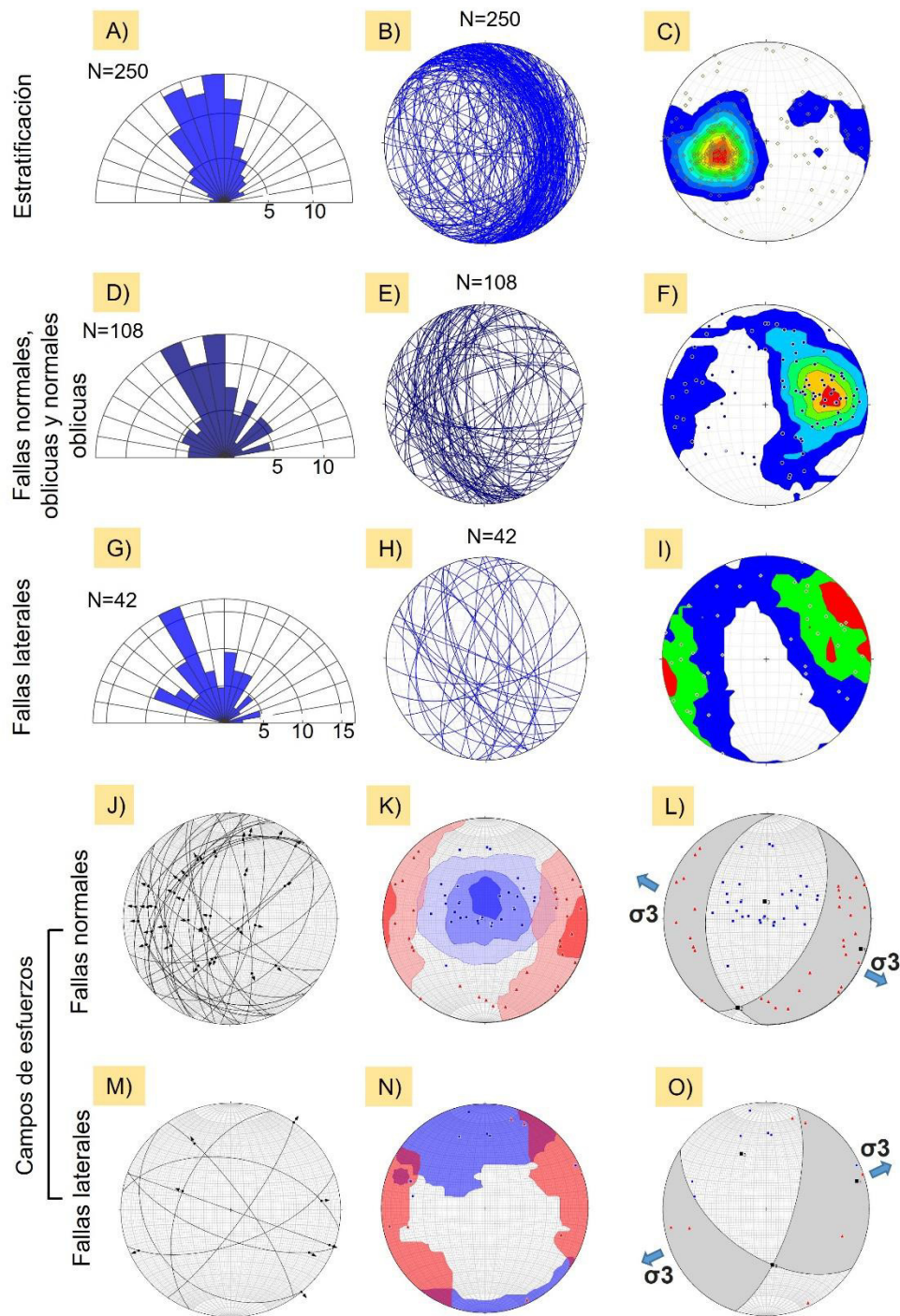
En la región costera, en las inmediaciones de Puerto Libertad, este magmatismo alcalino (~ 6 Ma) ha sido identificado en la región de Pozo Coyote y descrito por Gastil y Krummenacher (1977) refiriéndose a basaltos y andesitas basálticas alcalinas del Mioceno Superior con megacristales de plagioclasa. Destacando una asociación con una emisión de tipo fisural tanto para estos afloramientos costeros como para los de Sonora Central (Alineamiento Pápago-Yaqui; Paz-Moreno, 1992).

## 2.2 Geología estructural

Las estructuras geológicas medidas en la Sierra Los Mochos y Las Lomas de Arivaipa corresponden a la estratificación, los contactos entre las unidades litológicas y al fallamiento que disecta a las estructuras anteriores (Figura 26). Es importante destacar que estas localidades se encuentran dentro de la Provincia Extensional del Golfo, una región con una gran exposición de estructuras geológicas primarias y secundarias, las cuales fueron medidas utilizando la regla de la mano derecha con una brújula declinada.



**Figura 26.** Representación de los principales rasgos estructurales de la Sierra Los Mochos y Lomas de Arivaipa: A) Fotografía panorámica de la porción norte de la Sierra Los Mochos, donde se aprecia un basculamiento preferencial de las unidades hacia el sureste; B) Sector Este del Cerro Buras, donde apreciamos el contacto entre la Toba San Ignacio (TSI) y la Ignimbrita de Hermosillo/Toba de San Felipe (IH/TSF), donde esta última es disectada por una falla lateral derecha; C) Detalle del plano de falla señalado en el inciso B; D) Evidencia de plano de falla de la zona del Cerro La Ventana al Norte de la SLM; E) Evidencia de plano de falla de los Cerros Las Lajas; y F) Plano de falla con espejo y estrías de falla del sector Las Lajas, ubicado al norte de la SLM.



**Figura 27.** Representación gráfica de la estratificación: A) Diagrama de rosetas de la estratificación de las unidades litológicas del área de estudio; B) Representación gráfica de los planos de estratificación; C) Mapa de contorno de polos de los planos de estratificación. Visualización gráfica de las fallas normales y normales oblicuas: D) Diagrama de rosetas de las fallas normales y normales oblicuas del área de estudio; E) Representación gráfica de las fallas normales y normales oblicuas; F) Mapa de contorno de polos de los planos de las fallas normales y normales oblicuas. Gráficos de las fallas laterales: G) Diagrama de rosetas de las fallas laterales; H) Representación gráfica de las fallas laterales; I) Mapa de contorno de polos de los planos de las fallas laterales. Campos de esfuerzos de las fallas normales procesados en el programa Faultkin: J) Planos de fallas normales; K) Mapa de contornos de Kamb para observación del esfuerzo tensional; L) Gráfico de esfuerzos de fallas normales. Campos de esfuerzos de las fallas laterales procesados en el programa Faultkin: M) Planos de fallas laterales; N) Mapa de contornos de Kamb para observación del esfuerzo tensional; O) Gráfico de esfuerzos de fallas laterales.

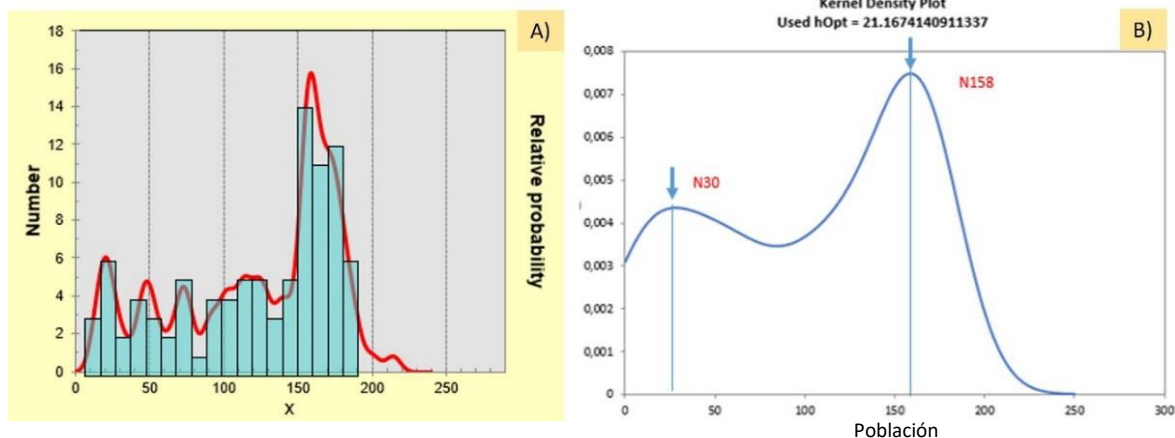
Un total de 250 datos de estratificación fueron obtenidos y representados en el diagrama de rosetas de la **Figura 27A**, los cuales presentan una orientación preferencial N-S y NW-SE (**Figura 27B y C**) con un rango de entre 60 y 75° NW-SE

Por otra parte, en cuanto a las fallas, fue posible hacer las mediciones de rumbos y echados de 108 fallas normales, oblicuas y normales oblicuas (**Figura 27D**) que comparten una orientación preferencial NW-SE y N-S y en menor proporción con una orientación NE-SW, correspondiente con un sistema conjugado de estructuras (**Figura 27E y F**).

Para las fallas laterales, los datos obtenidos llegaron a 42 medidas (**Figura 27G**) con una diversidad de orientaciones, en donde es posible visualizar una división en los datos del rumbo como NE-SW y NW-SE correspondiente con varios grupos de estructuras (**Figura 27H e I**).

Un análisis de paleoesfuerzos con el método de diedros rectos a partir de sitios donde fue posible la identificación de indicadores cinemáticos como estrías y escalones de falla (**Figura 36D, E y F**), es posible observar que la distribución mostrada en la **Figura 27J**, las fallas normales son derivadas de un esfuerzo tensional al W (**Figura 27K y L**), mientras que en las fallas laterales al ser mínimas las consideradas con indicadores de falla, no se muestra claridad en la indicación de esfuerzos, mostrándose tanto al E como al W en un medio conjugado.

En general, los datos estructurales de las fallas (150 datos) en las dos zonas estudiadas muestran diferentes poblaciones (**ver Apéndice B**), mencionando que 28 de ellas presentaban indicadores de falla. Para la identificación de familias, se realizó un histograma de frecuencia que incluyó a la curva del polígono de frecuencias acumuladas (**Figura 28**) y un gráfico de la distribución de datos, utilizando el cálculo de la función de la densidad de Kernel (**Zucchini, 2003; Vega-Granillo et al., 2015**). Con antecedente de estos cálculos, fue posible determinar que: a) la función de densidad de Kernel separa las fallas en dos familias de rumbos, donde el límite de la familia 1 va de 0° a 95° y la segunda de 95° a 250° (**Figura 28B**); b) el polígono de frecuencias separa a las fallas en cinco familias: 1) con límites que van de 0° a 38°; 2) 38° a 66°; 3) 66° a 83°; 4) 83° a 132°; y 5) 132° a 188°, respectivamente (**Figura 28A**).



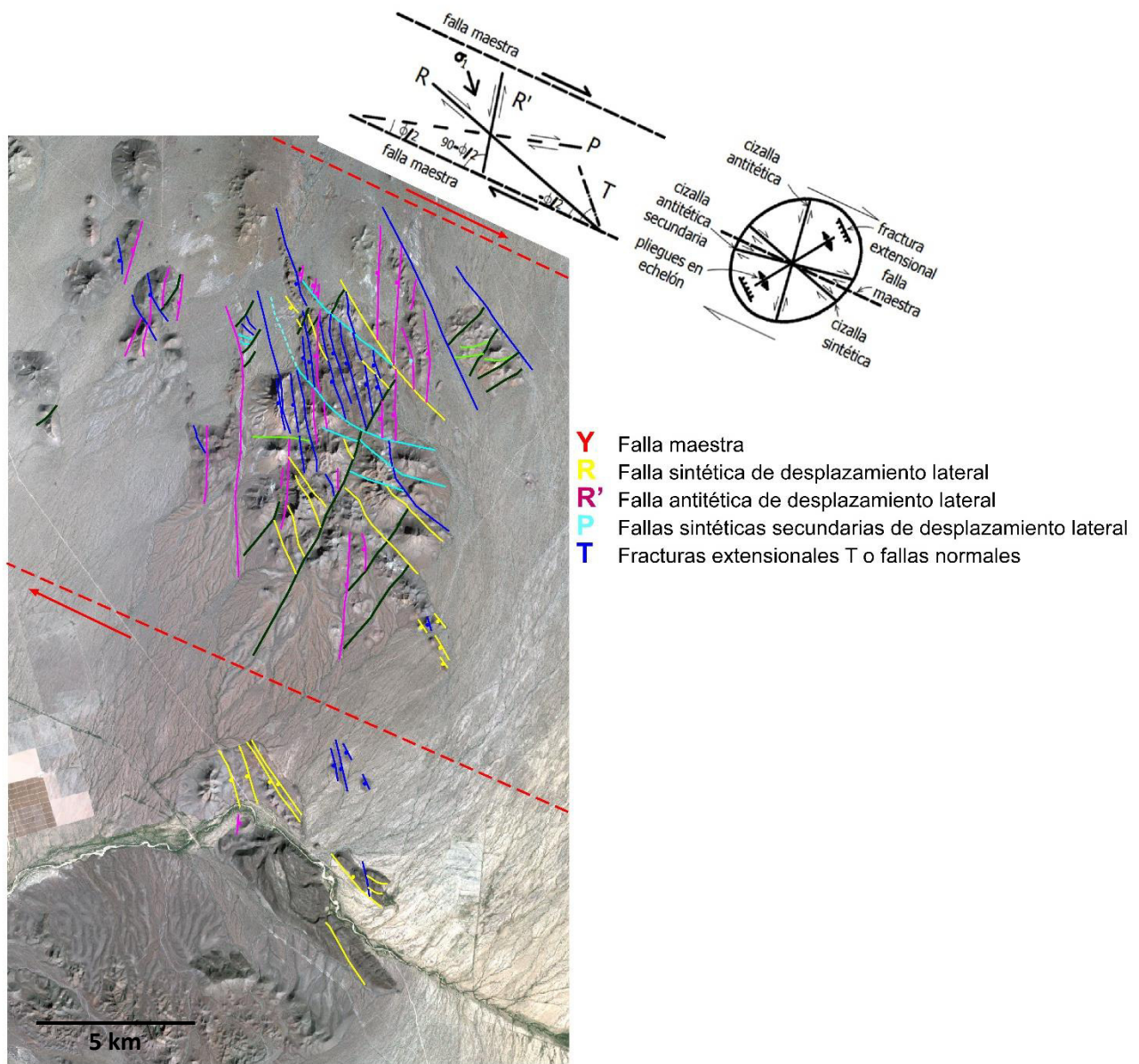
**Figura 28.** A) Histograma de frecuencias de los planos de fallas, la línea de color rojo representa la estimación de frecuencias; B) Diagrama que muestra la función de estimación de densidad de Kernel (Zucchini, 2003). Número de fallas = 150.

Con la información anteriormente descrita, es posible resumir que el conjunto de estructuras correspondiente a las fallas (Figura 27E), presentan un domino NW-SE y N-S con echados predominantemente al W y que de manera general estas estructuras controlan la disectación de la estratificación con dominio NW-SE con echados preferenciales al E. Cabe destacar que existen estructuras que seccionan a la Sierra Los Mochos en bloques, tal es el caso de las fallas laterales (Figura 27H) que muestran orientaciones tanto NW-SE como NE-SW, evidenciando la presencia de un sistema conjugado de estructuras.

Haciendo un análisis general de las estructuras como fallas y fracturas de toda la región de estudio (Figura 29), podemos corroborar las orientaciones de las estructuras medidas en campo y en parte verificar asociación con modelos estructurales como, por ejemplo, el de flores negativas (negative flowers, Woodcock y Ficher, 1986), donde su origen también es explicado mediante procesos de deformación tipo Riedel (Davis y Reynolds, 1996), que son generados por un dominio de transtensión.

Evidencias de un dominio de transtensión ocurridas entre los 9 y 7 Ma han sido documentadas en las regiones de Bahía de Kino-Punta Chueca (Bennet, 2009; Seiler et al., 2011; Darin et al., 2016), regiones correspondientes con el Norte del Proto-Golfo de California. Localmente en la región de Puerto Libertad, Darin (2011), de manera equiparable, describió para la Sierra Bacha una evolución de deformación extensiva NE-SW ocurrida entre los 10 y 7 Ma, dominando en el sector una etapa transtensiva entre los 7 y 6 Ma. La Sierra Barra se localiza justo 7 km al SW de la Sierra Los Mochos y en ella, con el análisis geológico y las relaciones

de corte de las estructuras, podemos proponer el inicio de una etapa extensiva entre los 11 y 10 Ma.



**Figura 29.** Imagen Google Earth que ilustra la variabilidad de estructuras identificadas en La Sierra Los Mochos-Lomas de Arivaipa.

## **CAPÍTULO III CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS Y GEOCRONOLÓGICAS**

Un total de 58 ejemplares de rocas volcánicas e hipabisales representativas de las unidades magmáticas identificadas en las localidades de las Lomas de Arivaipa y en la Sierra Los Mochos, Puerto Libertad, Sonora, fueron utilizadas para el análisis geoquímico de roca total para determinar los elementos mayores, elementos traza y tierras raras.

Los ejemplares analizados seleccionados a partir del interés y de la visualización de cambios litológicos y mineralógicos. La recolección de muestras fue llevada de manera sistemática procurando obtener una cantidad suficiente de esquirlas (tamaño aproximado de 5 cm) que cumplieran con las condiciones de representatividad estadística de la roca, para lo cual, es pertinente seleccionar ejemplares de la mejor calidad posible, evitando alteraciones e intemperismo, vetillas y amígdalas rellenas de algún material secundario.

A la par del muestreo para geoquímica, y con la finalidad de hacer un estudio petrográfico previo, fue pertinente seleccionar ejemplares que permitieran cerciorarse de la viabilidad del análisis geoquímico y, por lo tanto, de la confiabilidad de los resultados. Un aspecto fundamental en este proceso es el etiquetado y control de la muestra.

En muchos de los casos era posible observar que la matriz y minerales de la roca estaban muy frescos, no obstante, contenían amígdalas y en el caso de las ignimbritas, se presentaban abundantes líticos ajenos al depósito piroclástico. Estas muestras requirieron de una preparación especial al realizar una selección y eliminación miscelánea de los fragmentos líticos para que la muestra residual correspondiera principalmente a los componentes originales del depósito.

### **3.1 Técnicas Analíticas**

La etapa de laboratorio comenzó en el laboratorio de preparación de muestras del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, Estación Regional del Noroeste (UNAM-ERNO).

Para la etapa de trituración de roca, se utilizó la quebradora de quijadas de acero inoxidable Braun Chipmunk, procurando el obtener gravilla de tamaño inferior a 0.5 cm, la cuál es factible para pasar a la etapa de pulverizado de roca, para pretender alcanzar una fracción de



particulado estándar malla 230 ( $>64\mu$ , la partícula se siente al tacto como el talco y con ello es posible considerar que se han pulverizado hasta los minerales más duros como el zircón).

La preparación de los polvos de roca o pulverizado de al menos 10 g de material, consistió de dos etapas: la primera se llevó a cabo en el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X (FRX) del Instituto de Geología de la UNAM en Ciudad Universitaria, utilizando la pulverizadora SPEX con contenedor de tungsteno para posteriormente analizar solo 28 ejemplares de roca por la técnica de FRX utilizando estándares del Instituto de Geología IGLseries, producidos en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), siguiendo la metodología de [Lozano-Santa Cruz y Bernal \(2005\)](#); y la segunda etapa de pulverización consistió en trabajar los 30 ejemplares restantes y se llevó a cabo en el Laboratorio de preparación de rocas de la Estación Regional del Noroeste del Instituto de Geología de la ERNO-UNAM, con la pulverizadora Retsch PM 100 con contenedor de ágata, para posteriormente analizar los polvos de roca por las técnicas de IC-MS e ICP-OS del Departamento de Geoquímica y Prospección Geológica de la Universidad de Barcelona, España por medio de una estancia académica ([Figura 30](#)).

Los resultados de los 58 análisis de roca por elementos mayores, presentados como óxidos (% en peso), el cálculo de la Norma CIPW (base anhidra), y los resultados de elementos de tierras raras, traza y cálculos petrogenéticos son presentados en las [Tabla 1](#). Para los cálculos de la norma CIPW y la elaboración de los diagramas presentados en este documento, se utilizó el programa IGPET 2007 ([Carr and Gazel, 2017](#)). Se verificó el correcto uso de los datos, asegurándonos previamente de que los valores de los análisis estuvieran en base anhidra, es decir, que hayan sido eliminados los volátiles  $H_2O^+$ ,  $H_2O^-$ , y/o LOI (pérdida por ignición) y que al final se recalcularan los datos al 100%, tal como lo establecen las normas de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS).



**Figura 30.** Ejemplificación de metodología y algunas técnicas analíticas empleadas: A) Mortero de ágata, utilizado para homogenizar muestras; B) Instrumento de fusión marca CLAISSE; C y D) Polvos de roca en preparación y perlas generadas con el instrumento de fusión; E) Montaje de pastillas y perlas para análisis por la técnica de FRX; F) Equipo de Fluorescencia de Rayos X marca RIGAKU; G) preparación de muestras con la técnica de digestión en ácidos; y H) Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP).



Grupo			Magmatismo Toleítico de Rift																	
Edd	Localidad	Ignimbritas de Rift																		
		CBPLIS-04A	CBPLIS-06	SIMPLIS-01I	SIMPLIS-04I	SIMPLIS-05I	SIMPLIS-07I	CPPLIS-04I	CPPLIS-05I	CMIG-30	SIMIG-73A	SIMIG-83	SIMIG-84	SIMIG-87	SIMIG-97	SIMIG-31C	SIMIG-38	SIMIG-48B	SIMIG-65	SIMIG-69
Coordenadas	N	3281788	3285063	3285778	3285798	3285825	3285241	3291681	3291673	3292115	3294707	3294502	3294379	3294416	3294532	3294616	3294225	3294225	3294225	3295109
E	E	376240	376232	381782	381834	381874	381693	372782	372774	373227	382400	383358	383318	377947	377927	377933	376882	380207	385220	385210
Tipo de Roca	TR	TR	R	R	R	T	R	R	R	R	R	R	R	R	R	TD	TD	TD	TD	TD
Fecha de Fechamiento	12.560±1 Ma U/Pb	12.560±0.8 Ma Ar/Ar	(B)													11.42±0.13 Ma U/Pb (A)				T
Mayor %																				
SiO2	68.96	72.7	74.55	60.36	73.59	71.97	70.56	74.81	76.44	77.78	78.59	75.37	75.37	66.24	64.36	66.29	64.11	64.36	64.43	67.72
TiO2	0.15	0.34	0.29	0.82	0.32	0.33	0.34	0.14	0.11	0.1	0.07	0.09	0.09	0.47	0.98	0.64	0.65	1.12	1.12	0.34
Al2O3	12.6	13.22	9.75	16.1	12.88	13.88	14.16	12.64	12.11	11.24	11.03	12.25	12.25	15.51	15.33	14.77	14.25	15.69	15.69	15.61
Fe2O3	1.44	2.45	2.19	5.43	1.95	2.04	2.02	1.51	1.39	0.95	1.03	1.39	1.39	3.15	5.36	4.97	4.49	6.04	6.04	3.39
MnO	0.03	0.04	0.03	0.08	0.03	0.03	0.04	0.01	0.01	0.02	0.04	0.02	0.02	0.03	0.05	0.11	0.11	0.1	0.1	0.06
MgO	0.23	0.34	0.43	1.6	0.59	0.54	0.56	0.05	0.11	0.11	0.07	0.09	0.09	0.34	1.04	0.78	0.85	1.1	1.1	0.18
CaO	3.48	0.45	2.33	1.96	0.3	1.97	1.89	0.19	0.19	0.26	0.19	0.45	0.45	2.98	2.84	2.27	2.37	3.31	3.31	0.69
Nb2O5	3.11	1.02	0.57	4.58	1.93	3.86	3.71	1.43	3.4	2.1	1.98	3.21	3.21	4	4.31	4.42	3.25	4.32	4.6	4.6
K2O	0.85	7.77	7.44	6.31	7.43	4.28	4.07	8.83	5.43	6.7	6.34	6.21	6.21	5.29	3.92	4.51	6.22	3.76	3.76	6.4
P2O5	0.02	0.08	0.08	0.25	0.08	0.09	0.09	0.02	0.02	0.02	0.05	0.01	0.01	0.11	0.27	0.2	0.21	0.34	0.06	0.06
LOI	9.03	0.99	2.26	2.42	0.77	0.86	2.42	0.39	0.95	0.61	0.61	0.79	1.86	1.53	1.06	3.39	0.75	0.75	0.97	0.97
Total	99.889	99.931	99.925	99.907	99.871	99.851	99.868	99.988	99.988	99.883	99.99	99.885	99.985	99.999	99.99	99.987	99.887	99.942	99.942	99.999
Trazas ppm																				
Rb	174	168	295	225	307	128	123	397	205	276	223	224	224	178	124	135	244	102	102	129
Sr	1646	145	52	200	103	268	257	29	30	19	14	7	7	249	332	241	264	355	355	18
Ba	993	630	624	835	1174	1390	1114	202	382	236	184	154	154	884	1143	1335	1111	1002	1002	300
Co	1	2	4	11	12	3	3	6	5	5	7	4	4	8	11	10	10	13	5	5
Cu	2	6	6	8	7	7	7	6	6	5	7	4	4	8	9	8	8	11	6	6
Cr	2	3	41	6	20	3	3	2	69	26	2	2	2	28	6	2	2	2	2	2
Ni	1	2	15	5	7	3	3	10	10	10	10	9	9	10	6	6	7	6	6	6
V	1	29	22	49	57	28	32	17	4	1	3	2	2	30	67	56	45	83	14	14
Zn	61	100	47	40	89	39	52	75	56	31	24	34	34	63	70	71	91	75	53	53
Zr	172	212	97	247	183	118	119	198	125	87	106	305	305	200	405	446	450	359	693	693
Y	27	35	24	18	22	17	14	58	34	39	39	50	50	34	38	40	54	37	39	39
Nb	13	16	15	12	11	24	13	12	14	13	17	27	27	11	19	19	18	20	20	20
Pb	19	21	20	9	38	19	21	20	22	18	20	22	17	17	15	15	17	16	17	17
Th	14	15	12	7	6	11	12	13	16	19	15	16	16	9	9	10	10	9	11	11
Cs	240	3	2	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ga	20	18	11	22	28	19	19	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Hf	24	26	13	28	22	16	16	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Sn	5	4	3	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ta	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
U	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
W	2	1	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
La	37	50	27	28	31	45	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39
Ce	71	59	52	54	70	75	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Pr	8	7	6	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Nd	28	25	23	26	28	28	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Sm	5	8	4	5	4	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Eu	6	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Gd	8	5	4	5	4	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Tb	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Dy	5	5	4	5	4	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Ho	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Er	3	4	2	3	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Tm	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Yb	3	3	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Lu	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Norma CPW																				
Q	41.43	38.62	38.62	3.31	31.08	27.00	27.57	30.73	33.51	37.42	40.52	30.45	30.45	16.38	16.30	16.53	15.58	14.82	13.65	13.65
or	5.63	47.80	34.56	38.07	45.13	25.74	24.87	53.51	32.79	40.73	38.61	37.47	37.47	31.96	23.72	27.12	38.49	22.62	38.11	38.11
an	31.33	9.54	33.00	5.43	41.99	17.82	34.46	13.17	31.20	19.40	18.33	29.44	29.44	36.73	39.63	40.39	30.57	39.49	41.63	41.63
ab	19.23	1.14	1.75	2.20	4.84	0.99	9.09	0.63	0.76	1.19	0.64	0.69	0.69	8.94	11.17	7.27	6.21	12.54	3.06	3.06
lc	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
ne	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
di	nd	nd	nd	2.52	2.74	0.80	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1.92	1.16	2.29	3.74	1.54	nd	nd
hy	0.71	0.40	0.96	nd	4.88	1.68	1.12	1.60	0.31	0.31	0.20	0.00	0.00	3.38	2.80	2.80	1.65	3.89	1.00	1.00
wo	nd	nd	nd	2.55	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.26	0.26	1.22	nd	nd	nd	nd	nd	nd
di	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.00	nd	nd	nd	nd	nd	nd
ml	nd	0.22	0.32	2.48	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1.59	2.66	2.28	2.35	2.79	1.94	1.94
il	0.05	0.25	0.48	0.43	1.17	0.23	0.32	0.02	0.02	0.04	0.06	0.03	0.03	0.67	1.40	0.91	0.95	1.59	0.48	0.48
ap	0.05	0.07	0.17	0.18	0.53	0.17	0.19	0.04	0.06											

Grupo	Magmatismo Adakítico de Rift						Magmatismo Alcalino de Rift										
Edad																	
SAMPLE	CBPL15-01	CBPL15-02A	CBPL15-02B	MAPL15-01	MAPL15-05	MAPL15-06	CPPL15-02	CPPL15-03	CPPL15-12	CPPL15-14	CBPL15-05	CBPL15-08	MAPL15-02	SLMPL15-02	SLMPL15-03	SLM16-03	
Localidad	Cerro Las Buras			Lomas de Arivaipa			N La Perlita		NE Cerro La Pirinola		Cerro Las Buras		Lomas de Arivaipa		Puerto Los Mochos		
Coordenadas	N	E															
Tipo de Roca	D	D	D	R	D	D	TAB	TAB	B	TAB	F	TF	B	TF	TF	B	
Fecha													6.4±1.9 Ma K/Ar (5)				
Fechario							10.46±0.19 Ma U/Pb (4)							10.59±0.06 Ma Ar/Ar (6)			
<b>Mayores %</b>																	
SiO <sub>2</sub>	67.33	66.55	66.52	63.73	63.59	66.14	55.08	54.76	46.51	51.65	41.01	51.18	45.73	49.24	49	45.81	
TiO <sub>2</sub>	0.51	0.51	0.49	0.43	0.47	0.51	1.94	2.01	2.24	2.34	1.01	2.8	2.67	2.06	1.39	2.63	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.91	16.25	15.83	13.84	15.21	16.64	16.75	16.72	16.34	16.86	11.91	17.76	15.76	15.32	14.38	16.4	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.26	3.33	3.21	2.58	3.06	3.35	9.41	9.58	11.58	10.06	5.51	11.65	11.97	12.84	7.63	12.02	
MnO	0.07	0.06	0.06	0.03	0.05	0.06	0.14	0.14	0.18	0.16	0.15	0.09	0.18	0.18	0.13	0.17	
MgO	1.17	1.39	1.48	1.13	1.42	1.08	2.73	2.8	5.89	4.16	0.4	1.43	5.52	0.8	0.79	5.64	
CaO	3.88	3.97	4.14	2.16	3.93	3.77	6.11	6.23	9.75	7.97	16.25	1.04	9.62	4.16	8.13	8.84	
Na <sub>2</sub> O	4.44	4.75	4.63	5.58	4.43	4.63	4.97	4.99	3.5	4.26	0.06	1.63	3.2	1.46	0.64	3.73	
K <sub>2</sub> O	2.46	2.05	2.14	2.32	2.04	2.59	1.6	1.57	0.49	1.26	10.24	9.43	1.07	9.94	10.84	0.77	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.16	0.15	0.15	0.1	0.14	0.17	0.35	0.34	0.32	0.43	0.2	0.54	0.52	1.3	0.23	0.42	
LOI	0.67	0.87	1.24	8.01	5.54	0.94	0.86	0.78	3.19	0.81	13.13	2.36	3.73	2.59	6.75	3.45	
Total	99.855	99.887	99.884	99.901	99.882	99.882	99.93	99.933	99.985	99.95	99.883	99.904	99.972	99.884	99.917	99.885	
<b>Trazas ppm</b>																	
Rb	67	63.63	67.83	46.86	58.29	67.51	36.04	34.63	5.44	23.31	528.54	503.6	17.32	372.25	401.78	22	
Sr	603	583.19	564.87	496.06	542.06	581.61	465.06	469.91	442.6	481.77	367.4	475.07	487.22	236.78	162.21	490	
Ba	1344	953.13	1065.83	859.01	902.55	1067.42	640.43	628.18	142.28	466.68	976.04	873.99	274.69	1080.16	743.27	nd	
Co	21	6.11	5.84	5.38	9.24	5.99	21.24	21.75	42.99	27.91	13.03	31.88	38.02	21.67	20.35	44	
Cu	5	8.76	8.44	7.56	13.52	9.27	20.4	23.93	49.27	32.35	24.73	38.31	43.48	25.23	31.01	31	
Cr	8	19.2	9.07	11.75	25.34	8.67	1.65	2.2	106.23	17.32	54.13	61.52	100.3	2.24	112.78	145	
Ni	7	49.36	4.57	6.39	12.85	3.75	2.09	2.4	51.93	8.5	14.08	45.31	48.71	3.5	30.44	44	
V	54	50.8	46.6	41.38	66.65	55.78	232.63	239.64	242.17	248.62	99.44	163.53	283.65	95.26	151.3	233	
Zn	54	74.22	72.98	50.63	68.7	72.21	114.16	109.79	113.59	104.59	50.69	76.34	122.09	193.62	70.68	86	
Zr	181	124.98	119.21	101.14	93.1	121.78	217.87	208.64	142.48	206.9	66.4	248.69	119.89	456.56	143.84	211	
Y	19	13.88	14.67	12.99	16.34	15.08	29.21	27.97	30.18	29.14	10.37	31.13	29.93	51.66	20.26	15	
Nb	19	9.1	10.1	10.53	11.95	10.25	11.84	13.1	6.36	15.04	4.53	15.13	18.43	36.79	10.24	23	
Pb	15	12.57	14.78	13.4	13.3	13.45	7.46	7.47	2.09	5.39	3.89	3.72	3.52	7.93	4.56	5	
Th	5	4.84	5.51	8.06	6.19	5.25	3.09	2.96	0.61	2.17	0.54	2.15	1.71	2.38	2.15	3	
Cs	nd	1.72	1.8	2.62	3.55	1.17	1.64	1.62	0.45	0.19	2.95	9.86	4.86	3.57	2.26	nd	
Ga	nd	20.43	20.4	17.59	18.74	20.94	23.38	23.31	21.04	22.03	8.59	22.4	22.19	23.7	13.09	nd	
Hf	nd	16.96	14.4	13.71	10.77	15.96	23.11	23.33	12.24	20.55	7.15	27.79	11.93	44.27	14.94	nd	
Sn	nd	2.04	2.22	2.27	3.25	2.1	2.07	2.26	1.58	1.97	1.12	2.35	1.5	2.35	1.68	nd	
Ta	nd	1	1	1	1	1	1	1	nd	1	nd	1	1	2	1	nd	
U	nd	1.42	1.58	1.86	1.48	1.35	0.96	0.91	0.27	0.72	1.09	0.39	0.6	0.91	0.8	nd	
W	nd	0.88	0.89	1.16	1.41	1.14	0.38	0.41	0.15	0.32	3.65	2.37	0.29	6.14	5.87	nd	
<b>REE ppm</b>																	
La	nd	25.74	29.71	28.65	28.55	28.57	25.14	24.15	13.18	23.16	6.77	25.65	23.27	54.34	16.61	nd	
Ce	nd	49.86	56.67	50.29	56.64	56.04	53.98	52.2	33.75	51.87	15.39	59.73	52.68	123.06	36.29	nd	
Pr	nd	5.85	6.5	5.98	6.47	6.45	7	6.79	4.96	6.78	2.1	7.85	6.99	16.8	4.72	nd	
Nd	nd	21.41	23.31	21.17	24.06	23.43	29.28	28.56	22.99	29.16	9.38	32.74	30.35	70.22	19.75	nd	
Sm	nd	3.98	4.19	3.72	4.47	4.27	6.43	6.36	5.79	6.56	2.25	7.11	6.88	14.16	4.49	nd	
Eu	nd	1.01	1.03	0.88	1.14	1.07	2.03	1.99	2.03	2.09	0.88	2.37	2.26	3.94	1.53	nd	
Gd	nd	0.94	4.12	3.66	4.56	4.21	6.81	6.68	6.38	7	2.43	7.47	7.33	14.16	4.85	nd	
Tb	nd	3.54	0.57	0.5	0.63	0.58	1.06	1.05	1.07	1.09	0.39	1.17	1.16	2.09	0.78	nd	
Dy	nd	3.01	3.23	2.85	3.59	3.29	6.39	6.2	6.44	6.46	2.27	6.91	6.82	11.86	4.61	nd	
Ho	nd	0.54	0.56	0.5	0.64	0.57	1.2	1.16	1.23	1.19	0.43	1.28	1.27	2.14	0.88	nd	
Er	nd	1.57	1.67	1.51	1.89	1.69	3.49	3.42	3.6	3.44	1.2	3.75	3.7	6.1	2.47	nd	
Tm	nd	0.22	0.23	0.21	0.25	0.23	0.48	0.47	0.5	0.47	0.16	0.51	0.5	0.81	0.34	nd	
Yb	nd	1.43	1.5	1.33	1.65	1.51	3.08	3.01	3.17	2.99	1.04	3.23	3.15	5.16	2.16	nd	
Lu	nd	0.22	0.23	0.2	0.24	0.23	0.46	0.45	0.47	0.45	0.16	0.49	0.48	0.79	0.32	nd	
<b>Norma CIPW</b>																	
Q	21.46	19.92	20.18	17.24	20.14	18.94	3.81	3.29	nd	1.23	nd	0.87	nd	nd	nd	nd	
or	14.70	12.23	12.82	14.77	12.78	15.47	9.62	9.44	3.03	7.58	nd	59.00	6.69	62.82	41.10	4.78	
ab	40.32	43.07	42.15	53.99	42.17	42.03	45.42	45.59	32.87	38.98	nd	15.50	30.41	2.67	0.00	34.20	
an	16.40	17.13	16.32	6.32	16.53	17.16	19.01	18.91	28.69	23.60	2.34	1.73	26.97	6.30	4.79	27.04	
lc	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	57.15	nd	nd	nd	23.57	nd	
ne	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.38	nd	nd	6.81	3.80	0.60	
di	1.61	1.42	2.81	3.62	2.54	0.50	7.62	8.22	15.78	11.06	5.59	nd	15.96	5.35	11.11	12.93	
hy	2.46	3.17	2.74	1.55	2.89	2.76	7.37	7.25	1.75	9.21	nd	7.88	2.25	nd	nd	nd	
wo	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	15.95	nd	nd	nd	9.64	nd	
ol	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	9.83	nd	nd	nd	8.02	6.08	nd	11.14	
mt	1.73	1.85	1.69	0.57	1.50	1.90	3.66	3.73	4.09	4.09	3.10	4.76	4.61	3.98	3.33	4.54	
il	0.72	0.72	0.69	0.65	0.69	0.72	2.75	2.85	3.26	3.32	1.66	4.13	3.94	3.07	2.13	3.85	
ap	0.34	0.32	0.32	0.23	0.31	0.36	0.74	0.72	0.70	0.92	0.49	1.20	1.15	2.91	0.53	0.92	

**Tabla 1.** Geoquímica de elementos mayores, elementos traza y tierras raras (REE) y minerales normativos del magmatismo Cretácico al Mioceno de la Sierra Los Mochos y Lomas de Arivaipa. Las siguientes abreviaturas corresponden al tipo de roca: **M** Monzogranito; **TR** Toba Riolítica; **VR** Vidrio Riolítico; **R** Riolita; **RP** Riolita Perlítica; **TAB** Traquiandesita-Basáltica; **BAB** Basalto-Andesita Basáltica; **TA-B** Traquiandesita Basáltica; **TD** Traquidacita; **T** Traquita; **D** Dacita; **F** Foidita y **TF** Tefrifonolita. Los ejemplares que cuentan con geocronología contienen una indicación con número que significa: (1) fechamiento U-Pb tomado de Gómez-Valencia et al., 2022; (2) fechamiento U-Pb tomado de Darin, 2011; (3) fechamiento <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar tomado de Bennett et al., 2013; (4) fechamiento U-Pb realizado en este trabajo; (5) Fechamiento K-Ar tomado de Gastil y Krumenacher, 1973; y (5) fechamiento U-Pb tomado de Darin, 2011.

## 3.2 Rasgos geoquímicos generales

### 3.2.1 Diagramas de variación Harker para elementos mayores

Con la finalidad de tener una mejor identificación de los grupos geoquímicos relacionados a las rocas de arco y de rift estudiados, así como el de detectar tendencias y variaciones, se utilizaron los elementos mayores fueron recalculados al 100% en base anhidra y algunos elementos traza para ser graficados en diagramas de variación Harker (Figura 31).

La relación existente en los diagramas de variación de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{P}_2\text{O}_3$  con respecto al  $\text{SiO}_2$  (Figura 31A, B, C, F y H), de manera general, muestran una pendiente negativa tanto para el grupo de rocas de arco como para el grupo de rocas de rift, remarcando una mayor concentración de estos elementos en la mayoría de las muestras de arco.

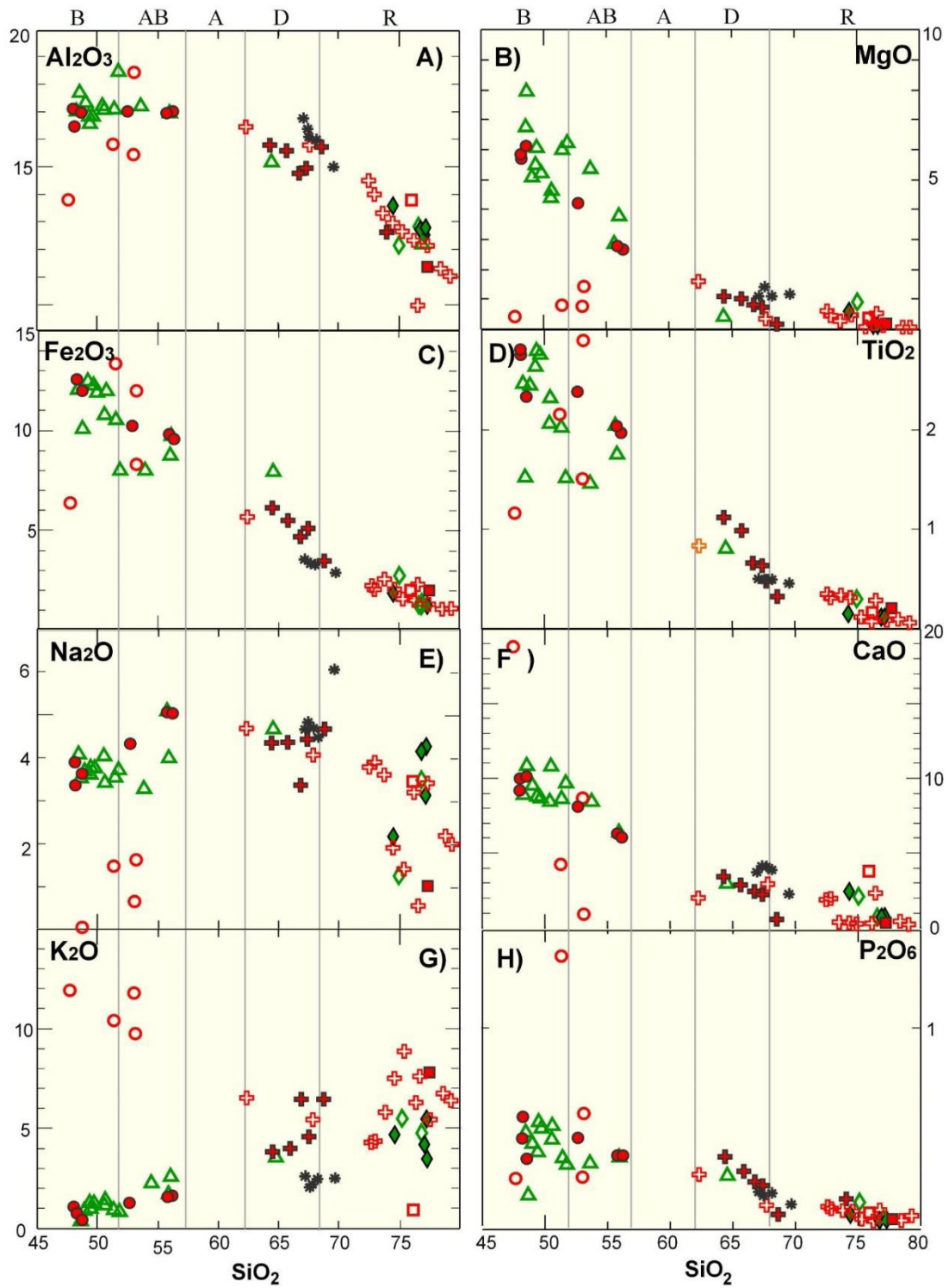
Por el contrario, la química de las rocas de rift no exhibe una clara tendencia a excepción de las rocas toleíticas que siguen un patrón curvilíneo, sugiriendo una diferenciación causada por cristalización fraccionada.

En el caso de los miembros volcánicos de Báucarit es posible apreciar tendencias positivas en concentraciones en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Figura 31A),  $\text{Na}_2\text{O}$  (Figura 31E),  $\text{CaO}$  (Figura 31F),  $\text{TiO}_2$  (Figura 31D),  $\text{MgO}$  (Figura 31B) y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Figura C), indican la presencia inicial de minerales como los del grupo de los feldespatos.

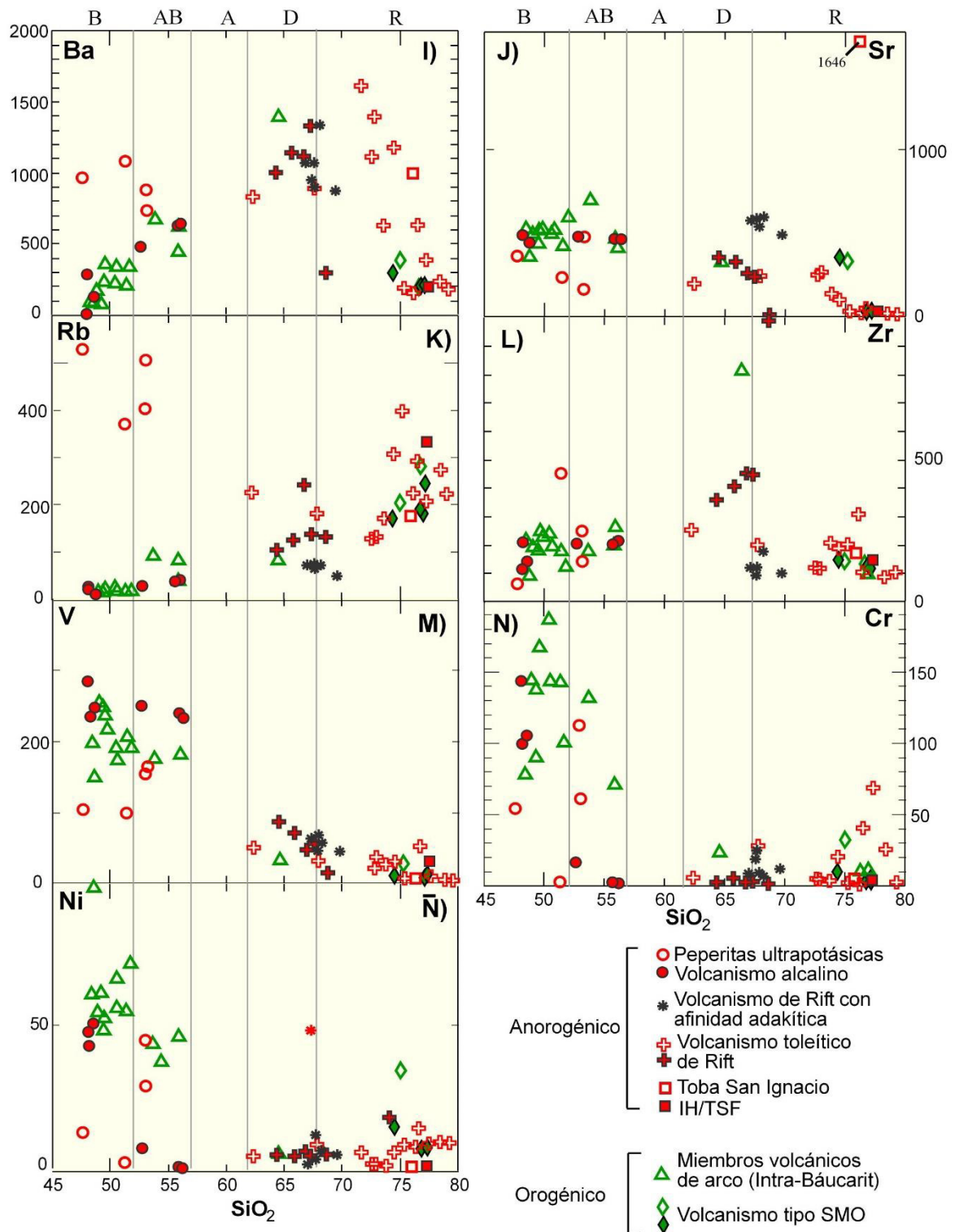
Por su parte, en la observación del comportamiento de los elementos en los depósitos distales de Rift, destacan los bajos valores de  $\text{K}_2\text{O}$  por una posible lixiviación de este elemento o que no existió cristalización fraccionada que conformara cristales como lo son los feldespatos potásicos particularmente en la TSI (Figura 31 G). En general, estas rocas ácidas muestran un marcado empobrecimiento en Al, Na, Ca y Fe (Figura 31A, C, E y F) en respuesta a la no cristalización fraccionada de feldespatos alcalinos y posiblemente de óxidos de Fe-Ti (Ignimbrita de Hermosillo/Toba de San Felipe y Toba San Ignacio).

Las rocas alcalinas muestran valores elevados en  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{Fe}_3\text{O}_2$ , congruentes con la no cristalización fraccionada por ejemplo de feldespatos. Otras rocas de variedad alcalina con importancia son las del grupo de rocas de las lavas y peperitas ultrapotásicas, donde no existe patrón alguno entre muestras, poniendo en realce la elevada concentración en  $\text{K}_2\text{O}$  (valores muy elevados de hasta 10.8%), Ba, Rb y en algunas muestras el

bajo valor de MgO y Ca<sub>2</sub>O, considerando una posible lixiviación o en su caso la no cristalización de Pl v Cdx.



Continua siguiente página...



**Figura 31.** A), B), C), D), E), F), G) y H) Diagramas de variación Harker para elementos mayores; y H), I), J), K), L), M), N), Ñ) Diagramas de variación Harker para elementos traza (ppm).



### 3.2.2 Diagramas de variación Harker para elementos traza

El comportamiento de los elementos traza, con respecto a los valores de SiO<sub>2</sub>, corrobora las tendencias descritas en los diagramas de variación Harker para mayores, como la del comportamiento curvilíneo para las rocas de arco y toleíticas de rift. Primero entre los elementos litófilos de gran radio iónico (LILE), destaca un marcado enriquecimiento en Sr para las muestras orogénicas con tendencia adakítica correspondientes a algunos de los miembros volcánicos incluidos en la sucesión sedimentaria tipo Báucarit (adakitas de arco). El Sr exhibe un parámetro decisivo entre los grupos magmáticos de arco al presentarse de manera general con valores más elevados (hasta 693 ppm) en el magmatismo de carácter adakítico (Figura 31J), identificando también que estos magmas suelen presentar valores más elevados en Cr y Ni, respecto a las rocas anorogénicas. Cabe destacar que en el grupo de rocas con tendencia adakítica es posible apreciar diferencias, pues las asociadas al rift tienen valores no tan destacados en Cr y Ni (Figura 31N y Ñ).

En el caso de las muestras de roca anorogénicas, comparadas de manera general con respecto a las rocas orogénicas, éstas presentan valores elevados de Ba y Rb con concentraciones bajas en Sr (Figura 31I, K, L y J). Dentro de las rocas anorogénicas, las que tienen una afinidad química toleítica presentan un comportamiento curvilíneo. En el caso del Cr y Ni para las lavas toleíticas (Figura 31N y Ñ), es posible apreciar un fuerte descenso asociado posiblemente a la cristalización de minerales félicos (minerales pesados y oscuros) en las etapas iniciales de la diferenciación. Por otra parte, para las rocas más félsicas correspondientes a la Toba San Ignacio se muestran valores elevados de Sr (1646ppm; Figura J), Ba (considerando la cristalización de feldespatos), y bajos valores de Rb con respecto a la Ignimbrita de Hermosillo/Toba de San Felipe (Figura 31I, J y K). Las rocas alcalinas de las lavas y peperitas ultrapotásicas, exhiben elevadas concentraciones en los elementos Rb, Ba y en algunos ejemplares hasta de Zr (es principalmente el caso de las peperitas). También, en elementos como V, Cr y Ni (Figura 31M, N y Ñ), éstas muestras de roca presentan altas concentraciones en comparación con el resto de los magmas de rift.

En síntesis, con excepción de las adakitas, es posible distinguir un comportamiento en la variación química de los elementos mayores y traza de las series de arco y rift, que es derivado de procesos petrogenéticos contrastantes. Además, este ejercicio permitió detectar altas

concentraciones en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$  en las primeras, y de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  y  $\text{K}_2\text{O}$  en las segundas. En cuanto a los elementos traza, los mejores discriminantes son el V, Zr y el Sr, siendo este último elemento, el que marca una total separación entre los grupos magmáticos al encontrarse relativamente con mayor concentración en las rocas orogénicas.

### 3.3 Geoquímica del magmatismo de Arco

#### 3.3.1 Geoquímica del basamento Laramídico Cretácico

Como comparación, 3 muestras del basamento Laramídico Cretácico fueron analizadas con FRX y son trazadas en el diagrama TAS según Cox et al. (1979; Figura 32A), donde es posible observar una variación del  $\text{SiO}_2$  en el rango de 73.90 –75.92% y una distribución moderada de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13.21% – 14.31%). En la Figura 32A también puede apreciarse que los intrusivos de la Sierra Los Mochos están ubicados dentro del dominio subalcalino. Por otro lado, con el diagrama normativo CIPW (Figura 32B; Streckeisen y Le Maitre, 1979), puede observarse que la clasificación de las rocas intrusivas cae en el campo de los monzogranitos y solo una muestra en el límite monzogranito-sienogranito.

La mayoría de las muestras tienen o presentan valores altos de  $\text{K}_2\text{O}$  (4.13 a 5.08% promedio), lo que sugiere un magmatismo de alto contenido de K (Figura 32C, Peccerillo y Taylor, 1976).

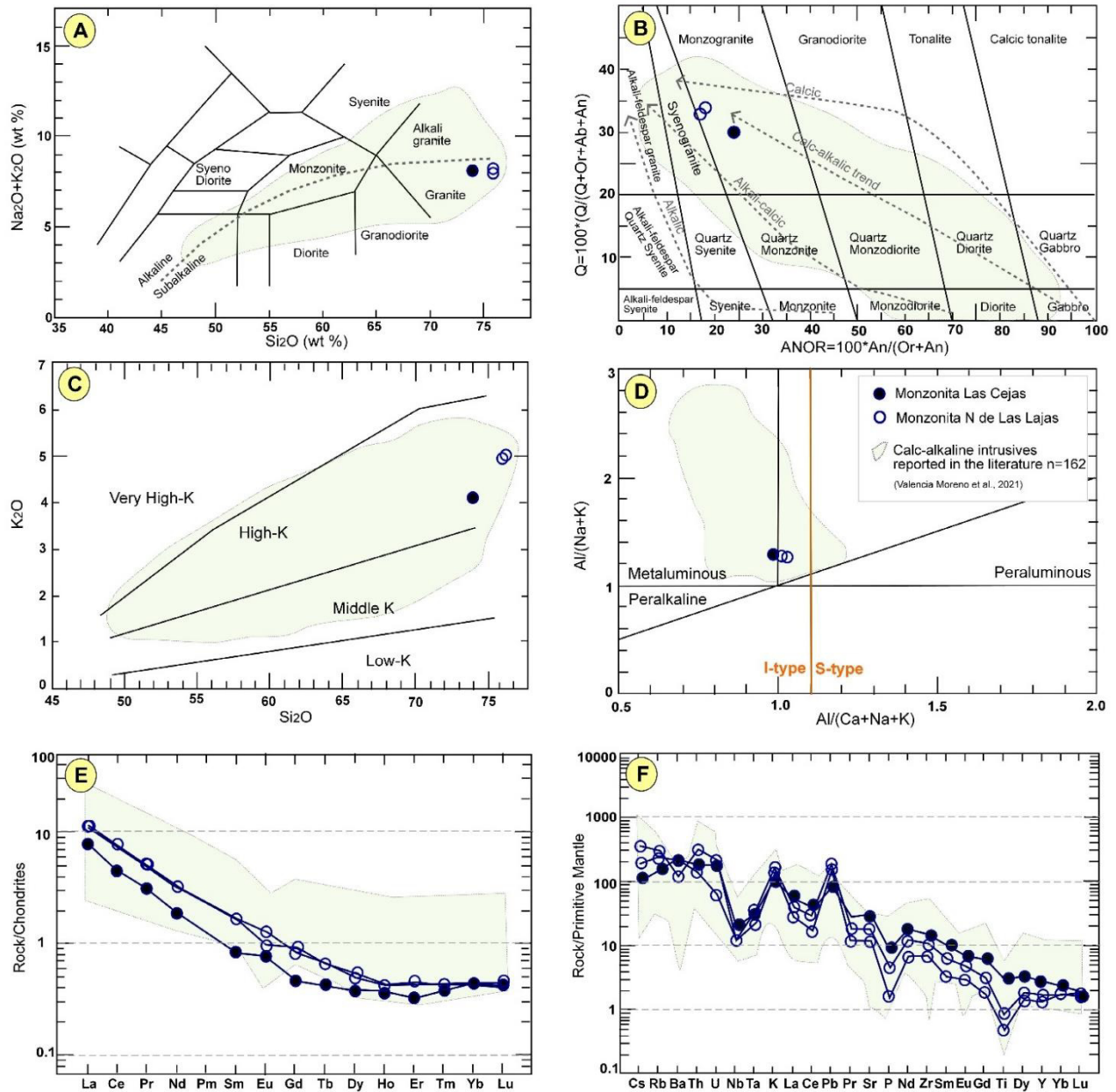
El diagrama de saturación de alúmina (Maniar y Piccoli, 1989) muestra una tendencia metaluminosa ( $\text{Al}/[\text{Ca} + \text{Na} + \text{K}] < 1$ ), lo que permite clasificar a los granitoides como granitos tipo I (Figura 32D). El diagrama REE, normalizado con Condrita de Sun y McDonough (1989), muestra gráficas similares entre los intrusivos y concuerdan con el campo de las rocas intrusivas de Sonora de la misma naturaleza. Las anomalías observadas son ligeramente positivas e incipientemente negativas en Eu ( $\text{Eu}^* = 1.01\text{--}1.18$ ; Figura 32E), y que posiblemente están relacionadas con la acumulación de plagioclasas en este magma.

El diagrama de multielementos normalizado con el manto primitivo de Sun y McDonough (1989), muestran un espectro paralelo para las tres muestras de granitoides, observándose un enriquecimiento en elementos LILE, una anomalía negativa en Nb-Ta (común en este tipo de magmas), así como anomalías negativas en P y Ti y positivas en K y Pb, una

característica común en intrusivos calco-alcalinos relacionados en la región (Figura 32F). Además, HREE con valores muy bajos ( $Y = 5.7\text{--}7.2$  ppm;  $Yb = 0.75\text{--}0.76$  ppm) y concentraciones de Sr (237–365 ppm) y Ba (132–191 ppm) y bajas concentraciones de  $(La/Yb)_N = 17.24\text{--}25.48$  y Sr/Y de 41.58–50.7 siendo para uno de los cuerpos intrusivos, ligeramente consistente con magmatismo de afinidad adakítica (Gómez-Valencia et al., 2022).

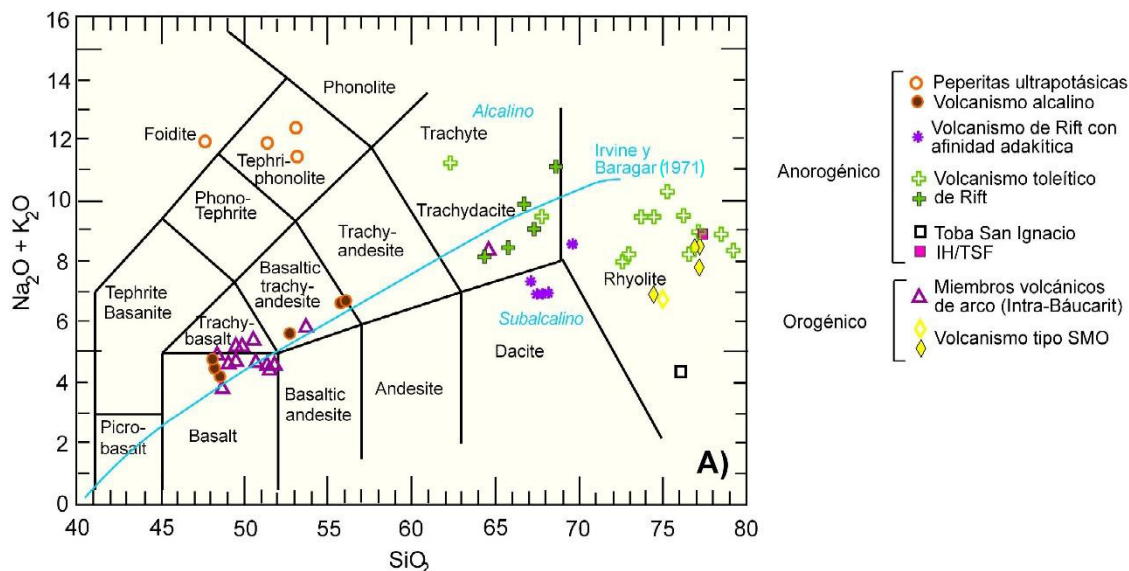
El carácter adakítico ya ha sido estudiado en las inmediaciones del área de estudio, donde en un artículo que forma parte de este trabajo de tesis (Gómez-Valencia et al. 2022; Anexo 1) englobaron para dentro de un transecto norte-sur de 35 km de largo con orientación NW-SE que incluye la Sierra Picú (SP), El Destierro (ED), Sierra Tordilla (ST) y Sierra Los Mochos (SLM), a una serie de cuerpos intrusivos con abundantes enclaves microgranulares máficos (MME) y enjambres de diques aplíticos y pegmatíticos, que fueron emplazados entre 4.9 y 6.2 km. Estos cuerpos graníticos se encuentran entre un rango de edad de Norte a Sur 71,9 y 74,9 Ma. Geoquímicamente, este magmatismo presenta contenido de sílice relativamente alto (56–75% en peso), valores de Sr/Y = 29–50, La/Yb = 26–39, Sr hasta 600 ppm y Ba hasta 1400 ppm. Se evidenció que en el sector, este magmatismo Laramide inició con un magmatismo calco-alcalino clásico en uno de los intrusivos de Sierra Los Mochos y progresivamente cambió a afinidad adakítica en la misma localidad, para finalmente mostrar características adakíticas en Sierra Tordilla, El Destierro y los intrusivos Sierra Picú. Estas afinidades adakíticas aumentan de sur a norte en la región.

Además de la importancia de la formación de magmas de arco con firmas geoquímicas de adakitas, que brindan información muy relevante sobre la fuente de los magmas y el mecanismo de evolución geodinámica (Defant y Drumond, 1990 ; Zhang et al. 2021), se ha documentado la relación predominante entre las adakitas y la mineralización económica que contiene Cu-Mo-Au (Thiéblemont et al. 1997 ; Sajona and Maury, 1998 ; Oyarzun et al. 2001; Ballard et al., 2002 ; Sun et al., 2011 , 2013 , Zhang et al., 2021), relación que ha sido evaluada limitando la fugacidad relativa de oxígeno (Zhang et al., 2021).



**Figura 32.** Diagramas de discriminación geoquímica para las rocas intrusivas del Norte de la Sierra Los Mochos, Sonora, México (modificados de Gómez-Valencia et al., 2022), en comparación con otros intrusivos calco-alcalinios de la literatura: A) Diagrama de álcalis totales vs. sílice (TAS) de Cox et al. (1979); B) Diagrama normativa CIPW Q'-ANOR (Streckeisen y Le Maitre, 1979); C) Diagrama K<sub>2</sub>O vs. SiO<sub>2</sub> de Peccerillo y Taylor (1976); D) Diagrama de saturación de alúmina (Maniar y Piccoli, 1989); E) Diagramas de elementos de tierras raras normalizados a condrita (Sun y McDonough, 1989); F) Diagrama de multielementos normalizado del manto primitivo (Sun y McDonough, 1989).

En el caso de las unidades volcánicas Oligoceno-Mioceno, son manejados los mismos grupos identificados en el análisis petrográfico (**Apéndice A**), considerando un dominio tectónico de Arco y otro de Rift, que será precisado en cada grupo geoquímico (**Figura 33**).



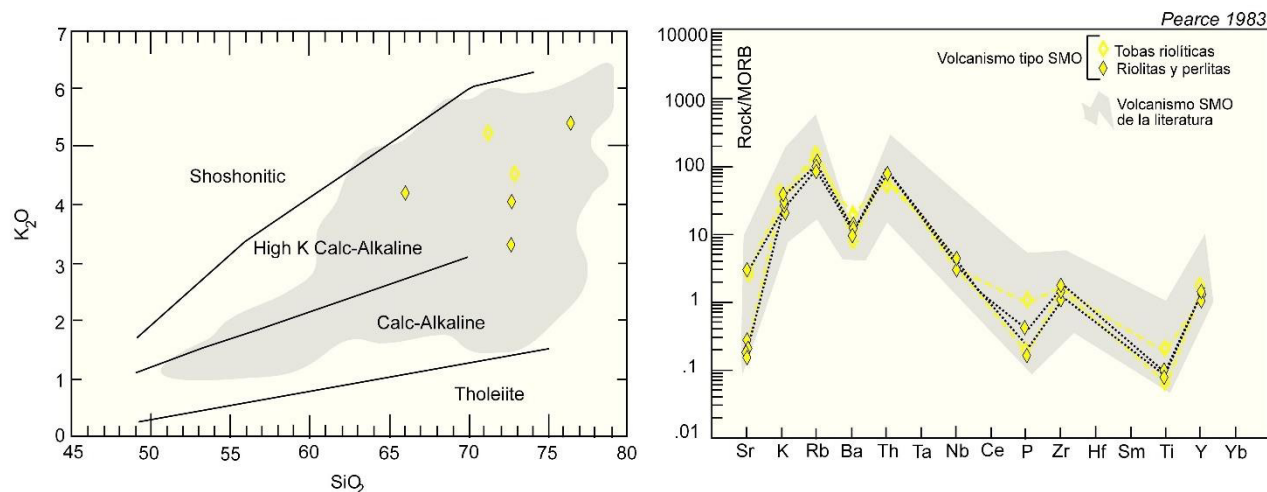
**Figura 33.** Diagrama TAS (álcalis vs sílice) propuesto por Le Bas et al. (1986), exhibiendo la línea discriminante de Irvine y Baragar (1971), mostrando la clasificación química del volcanismo Oligoceno-Mioceno de la Sierra Los Mochos y Lomas de Arivaipa.

### 3.3.2 Geoquímica del volcanismo tipo SMO

El análisis geoquímico correspondiente al volcanismo tipo Sierra Madre Occidental incluyó 6 muestras de las regiones del NE del Cerro La Cruz y del Cerro La Ventana (SLM16-13, 17,51A, 52A, 53, y 58A; **Tabla 1**). Las características geoquímicas que permitieron clasificar a estas lavas pueden ser apreciadas en el diagrama TAS propuesto por Le Bas et al. (1986; **Figura 33**), donde es clara la afinidad en el campo de las riolitas, contenidos elevados en SiO<sub>2</sub> en un rango del 65.94 al 76.34% y valores de álcalis entre 6 y 9%, ubicando a estas muestras en el dominio subcalcalino marcado por la línea de Irvine y Baragar, (1971). El cálculo de la norma CIPW para este volcanismo (**Tabla 1**), evidencia la presencia de cuarzo normativo, confirmando una sobresaturación de sílice para estas rocas. Estas rocas presentan como característica el contener elevadas concentraciones de potasio en comparación de su concentración de sílice (**Figura 34A**), mismas que se asemejan al magmatismo calcoalcalino alto en potasio.

Por otra parte, en el diagrama multielementos de Pearce (1983) normalizado a MORB (**Figura 34B**), pudo observarse que los espectros de las rocas analizadas tienen un paralelismo

entre si con un importante enriquecimiento en los elementos incompatibles (LFS, Low Field Strength) K, Rb y Th. Los elementos HFS (High Field Strength) muestran un decremento en función del grado de incompatibilidad, con excepción del P y Ti que presentan anomalías negativas. Un dato interesante es que tanto Sr, como P y Ti, presentan valores que los sitúan por debajo del normalizador, mostrando con ello el efecto de una cristalización fraccionada de feldespatos y ferromagnesianos.



**Figura 34.** Diagramas que muestran la afinidad geoquímica del volcanismo tipo Sierra Madre Occidental de la Sierra Los Mochos: A) Diagrama K<sub>2</sub>O vs SiO<sub>2</sub> propuesto por [Peccerillo y Taylor \(1976\)](#); B) Diagrama multielemental de [Pearce \(1983\)](#), normalizado a MORB.

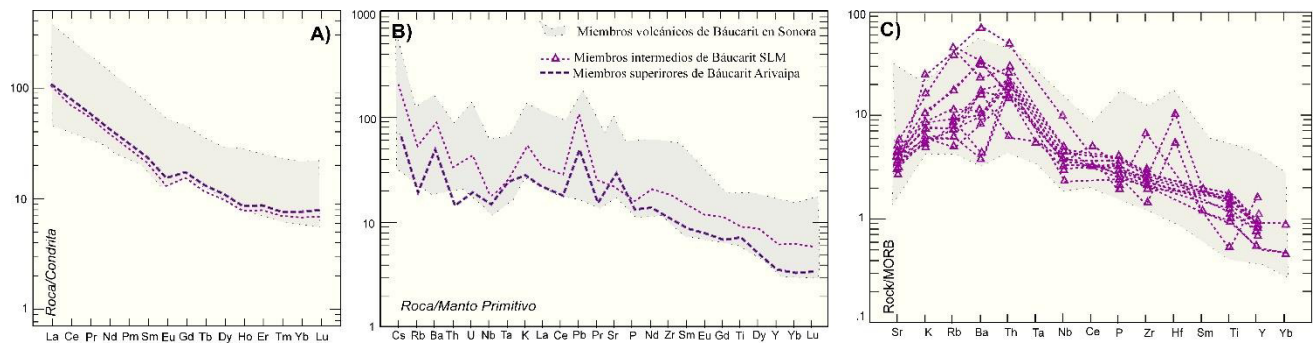
### 3.3.3 Geoquímica de los miembros volcánicos de Báucarit

Para el análisis geoquímico correspondiente al volcanismo encontrado en los miembros volcánicos de Báucarit son consideradas a 14 muestras correspondientes a las regiones de Cerro La Pirinola, Lomas de Arivaipa, Cerro Mochos, NE del Cerro La Cruz, Rancho La Casona y Cerro Cobrizas ([Tabla 1](#)). Las características geoquímicas que permiten clasificar a estas lavas pueden ser apreciadas en el diagrama TAS propuesto por [Le Bas et al. \(1986; Figura 33\)](#), donde es posible observar que la litología oscila en los campos de las traquidacita, traquiandesita, traquiandesita-basáltica, basalto-andesita basáltica y basalto, mostrando contenidos de SiO<sub>2</sub> en un rango del 46.43 al 63.09% y valores de álcalis entre 3.5 a 6% y hasta 8% en el caso de la traquidacita, ubicando a estas muestras en el dominio subcalino marcado por la línea de [Irvine y Baragar \(1971; Figura 33\)](#), donde para este caso con la muestra SLM-16-16 confirmamos la correcta clasificación como traquidacita, porque además cumple con q>20% normativo (q=

q+ab+an+or). Estas rocas presentan como característica el contener elevadas concentraciones de fierro.

Dos ejemplares de este grupo de rocas (CPPL15-03 y MAPL15-03) cuentan con análisis químico de tierras raras (REE, [Tabla 1](#)). La muestra CPPL15-03 ubicada en la porción NW de la Sierra Los Mochos en el Cerro La Pirinola, manifiesta en el diagrama de REE ([Figura 35A](#)), una pendiente pronunciada de La a Dy, con una anomalía negativa en Eu, sugiriendo un bajo fraccionamiento de la plagioclasa, y HREE relativamente horizontales. Esta relación es repetida con la muestra MAPL15-03 de Lomas de Arivaipa (sur de la SLM), exhibiendo un ligero paralelismo y un sutil empobrecimiento en todos los REE. Por su parte, en el diagrama multielemental normalizado al manto primitivo ([Figura 35B](#)), se confirma cierta similitud en las concentraciones de elementos traza de estas dos unidades magmáticas intra-Báucarit, sin embargo, es destacable un enriquecimiento progresivo de los elementos incompatibles de la muestra de la SLM. Los espectros geoquímicos presentan, además, anomalías positivas en Ba y Pb, las cuales también ocurren en muestras de otras localidades de Sonora ([Figura 35B](#)). Singularmente, una diferencia contrastante es la notable anomalía positiva en Sr para la muestra de las Lomas de Arivaipa, a la par de los valores bajos de Y e Yb, rasgos que han sido identificados para otras lavas de Sonora que son miembros volcánicos de Báucarit y muestran una afinidad adakítica ([Gómez-Valencia et al., 2015](#)).

Por otro lado, en el diagrama multielementos de [Pearce \(1983\)](#) normalizado a MORB ([Figura 35C](#)) donde están incluidas todas las muestras intra-Báucarit, puede observarse que los espectros de las rocas analizadas tienen un paralelismo entre si con un importante enriquecimiento en los elementos incompatibles (LFS) K, Rb, Ba y Th, exceptuando algunas muestras que presentan empobrecimiento en Ba. Los elementos HFS muestran un decremento en función del grado de incompatibilidad, con excepción enriquecimientos de Zr y Hf para la minoría de las muestras.



**Figura 35.** Diagramas que muestran la afinidad geoquímica de los miembros volcánicos de Báucarit en la Sierra Los Mochos y Lomas de Arivaipa: A) Diagramas de elementos de tierras raras normalizados a condrita (Sun y McDonough, 1989); B) Diagrama de multielementos normalizado del manto primitivo (Sun y McDonough, 1989); C) Diagrama multielemental de Pearce (1983), normalizado a MORB.

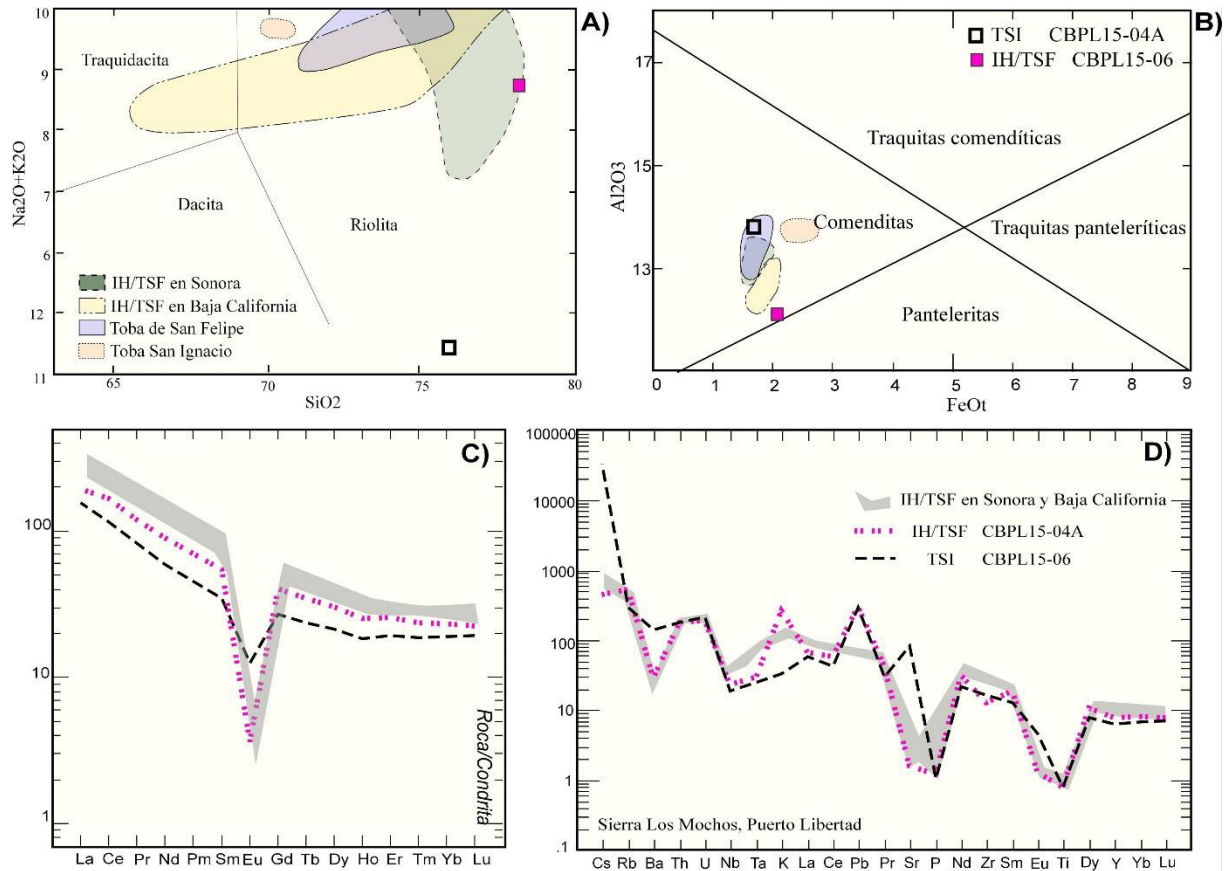
### 3.4 Geoquímica del magmatismo de Rift

#### 3.4.1 Geoquímica de los depósitos ignimbríticos distales, magmatismo transicional

En la Sierra Los Mochos las características geoquímicas que permiten clasificar a los depósitos piroclásticos distales reconocidos en la SLM y LA, son apreciadas en el diagrama TAS (Figura 36A) de Le Bas et al. (1986), en este diagrama además se pueden observar los campos correspondientes a las muestras de roca estudiadas hasta el momento para TSI e IH/TSF en Sonora y Baja California según el caso (los campos fueron compilados de Gómez-Valencia, 2011 y Darin, 2011).

La TSI de la Sierra Los Mochos (muestra CBPL15-04A), es manejada de manera independiente al magmatismo de la IH/TSF e inclusive de las muestras de la TSI de la localidad tipo en la Sierra Bacha (SW de la SLM). Este factor es debido a que la TSI presenta distintas intensidades de alteración entre sus facies de enfriamiento y a diferencia de la TSI de la localidad tipo ( $K_2O$  8.65 a 5.71%;  $SiO_2$  de 69 a 71% y LOI de 1.7 a 2.6%), la TSI en la Sierra Los Mochos tiene una lixiviación del  $K_2O$  con valores de 0.93%, un aumento de  $SiO_2$  hasta el 75% y valores de LOI de 9%. Lo anterior nos hace reconsiderar las observaciones de los rasgos geoquímicos de elementos mayores observados en los diagramas Harker para mayores (Figura 31G), donde se mencionaba que la diferencia entre la IH/TSF y la TSI es que la primera presenta un valor elevado de  $K_2O$  y la TSI no, mostrando está última concentraciones más elevadas de  $CaO$ ,  $Na_2O$  y  $Al_2O_3$  respecto a la IH/TSF (Figura 31A, E y F).





**Figura 36.-** A) Detalle del diagrama TAS (álcalis vs sílice) propuesto por [Le Bas et al., \(1986\)](#), mostrando la clasificación química del magmatismo transicional e hipercalino del Mioceno Medio: TSI.- Toba San Ignacio e IH/TSF.- Ignimbrita de Hermosillo/Toba de San Felipe ([Gómez-Valencia, 2011](#) y [Darin, 2011](#)); B) Diagrama de clasificación FeOt vs  $Al_2O_3$  ([MacDonald, 1974](#)); C) Diagrama de elementos de tierras raras normalizados a condrita ([Sun y McDonough, 1989](#)); D) Diagrama de multielementos normalizado del manto primitivo ([Sun y McDonough, 1989](#)). Nótese que en los diagramas de las Figuras C y D, está incluido el espectro típico de la IH/TSF, sin embargo, para la TSI no fue posible colocarlo, porque las muestras de la literatura carecen de un análisis completo de elementos.

La IH/TSF (muestra CBPL15-06), en la Sierra Los Mochos corresponde bien con las rocas de la IH/TSF estudiadas en Sonora ([Figura 36A](#)). Respecto a los contenidos de álcalis y alúmina, la muestra CBPL15-06 presenta un valor bajo de alúmina respecto a las rocas de la literatura ([Figura 36B](#)). [Le Maitre et al. \(2002\)](#), establecen que una riolita es clasificada como hipercalina, cuando presenta una asociación mineralógica alcalina y/o contiene un índice de hipercalinidad (IH) superior a 1, utilizando las proporciones moleculares de los álcalis y de la alúmina ( $Na_2O+K_2O/Al_2O_3$ ). Dicho lo anterior, la muestra CBPL15-06 tiene valores de IH de 0.45, valor que es muy bajo respecto a los valores de la IH/TSF en otras localidades.

Esto ya se había visto en rocas de Sonora Central de la localidad de Siete Cerros, donde [Gómez-Valencia \(2014\)](#) menciona que este rasgo puede atribuirse a una mezcla entre el magma riolítico de la IH/TSF y a uno traquítico encontrado en enclaves para algunas de las facies de esta ignimbrita. En la Sierra los Mochos, el ejemplar analizado fue obtenido de la facies superior que presenta los rasgos mencionados. Por otro lado, es notable que la IH/TS de la Sierra Los Mochos clasifica como comendita según el diagrama de [MacDonald \(1974; Figura 36B\)](#).

En el diagrama de elementos de tierras raras (REE) normalizado a condrita de [Sun y McDonough, \(1989\)](#), puede ser apreciado que la TSI presenta un espectro más empobrecido y paralelo a la IH/TSF, además de tener una anomalía negativa en Eu ([Figura 36C](#)). Los resultados de los elementos traza, muestran que la Toba San Ignacio está caracterizada por tener valores elevados de Sr (1645 ppm), Ba (993 ppm), y Zr (172 ppm), respecto a la IH/TSF. En el diagrama multielementos de la [Figura 36D](#), es posible identificar un arreglo espectral con anomalías negativas en P y Ti principalmente y anomalías positivas en Cs, Pb y Sr.

Para el caso de la Ignimbrita de Hermosillo/Toba de San Felipe, tanto en el diagrama de REE ([Figura 36C](#)) como en el diagrama multielementos ([Figura 36D](#)), están incluidos los espectros de las muestras representativas de la IH/TSF en Sonora y Baja California ([Gómez-Valencia 2011](#) y [Darin, 2011](#)). La IH/TSF de la región de la Sierra Los Mochos, está caracterizada por tener valores de Rb (333 ppm), moderados valores de Sr (32 ppm) y bajos valores de Zr (139 ppm) con respecto a otras localidades de Sonora donde hay valores de Zr de hasta 327ppm ([Gómez-Valencia, 2011](#)). En el caso del Ba (202 ppm), este es más elevado con respecto a otras regiones que son consideradas como facies distales a la erupción. Los espectros de tierras raras obtenidos de la normalización contra condrita ([Sun y McDonough, 1989](#)), muestran un fuerte enriquecimiento en las tierras raras ligeras, una muy marcada anomalía negativa en Eu y una tendencia plana en las tierras raras pesadas ([Figura 36C](#)). En el diagrama multielementos normalizado a manto primitivo ([Figura36D](#)), es posible distinguir un espectro idéntico a la de la IH/TSF reportada en varias localidades de Sonora y Baja California, a excepción de que en la IH/TSF de la Sierra Los Mochos, hay un fuerte enriquecimiento en K. En general, existe un enriquecimiento de elementos incompatibles, y un patrón irregular característico, marcado por pronunciadas anomalías negativas en Ba, Sr, P y Ti, los primeros con atribución a la cristalización temprana de feldespatos.

### 3.4.2 Geoquímica del volcanismo toleítico

En el diagrama TAS (Le Bas et al., 1986) puede apreciarse que el grupo de rocas toleíticas queda distribuido principalmente sobre la línea y por debajo de la línea de Irvine y Baragar (1971; Figura 33A), a excepción de la roca intermedia del Puerto Los Mochos SLMPL15-05 que se coloca por encima de esta línea en el dominio alcalino y que según las proporciones de  $q > 20$  de 88.16 normativo ( $q = q + ab + an + or$ ; Tabla 1), cumple con ser mayor al 20% para clasificar correctamente como una traquidacita, caso que está repetido en la traquita SLM16-69 del área de las Cejas que muestra un valor de  $q$  de 96.45%, clasificando también como una traquidacita. Por su parte, aunque las traquidacitas de las Lajas, Las Cejas y Las Cobrizas clasifican como tal en el diagrama TAS, al utilizar el discriminante que permite cerciorar la clasificación ( $q > 20\% = 89.47$  y  $94.02\%$ ).

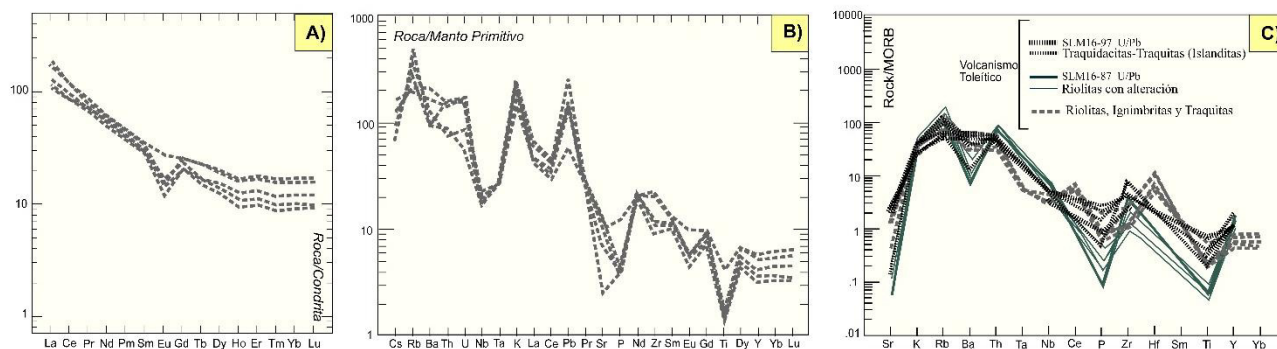
En general estas rocas presentan contenidos de  $SiO_2$ , valores de FeOt y MgO muy variados (AFM, Figura 33B), mostrando que estas rocas están sobre el dominio divisorio de toleítico vs calcoalcalino o bien por su contenido en álcalis en el dominio calcoalcalino, rasgos ya identificados para este tipo de rocas en otras localidades de Sonora (Gómez-Valencia, 2014). Así mismo, estas rocas que en campo pueden agruparse como riolitas e ignimbritas Mochos, ignimbrita El Puerto, riolita La Perlita y traquidacitas Las Lajas, que pueden ser agrupadas en dos grandes grupos: las del dominio félsico que en algunas lavas exhiben un enriquecimiento en  $K_2O$  de hasta 8.83% (Figura 31G), con valores elevados en Zr (hasta 305 ppm, Figura 31L), Ni (hasta 15ppm, Figura 31Ñ) y Cr (hasta 69 ppm, Figura 31N). Valores de K que pueden estar asociados con fenómenos de asimilación cortical y contaminación, ya que estas rocas están de incipiente a intensamente alteradas con silicificación, oxidación y mineralización económica, donde Guzmán y Vega (2022) informan en la Carta Geológico Minera Los Mochos H12-C16, la concentración de 0.04 g/t de Au, 4.33 g/t de Ag y 0.50 % de Fe (la denominaron zona de alteración La Cueva, en el mapa de la Figura 2, puede observarse en la porción NE en el Cerro La Cueva y al NW de la SLM, específicamente en el Cerro Mochos). El otro grupo magmático, corresponde al dominio intermedio con valores elevados en FeOt de hasta 6.22% (Figura 31C); valores que se han incluido en rocas con las mismas características para otras localidades en Sonora y que además han sido reconocidas como Islanditas (Gómez-Valencia, 2014).

En síntesis, algunos rasgos orogénicos pueden estar presentes en estas rocas y permiten confundirla con una serie calcoalcalina, tal y como es el caso de sus minerales normativos, cuarzo, diópsido e hiperstena (Tabla 1) que subrayan también una sobresaturación de sílice para estos magmas.

Respecto al análisis de elementos traza y de tierras raras, fue posible realizarlo de manera completa, solo en los ejemplares representativos del Puerto Los Mochos y del Cerro La Perlita, donde en el diagrama de elementos de tierras raras (REE) normalizado a condrita de Sun y McDonough, (1989), en donde queda evidenciado claramente la diferenciación entre las riolitas SLMPL15-01, SLMPL15-04 , SLMPL15-07 y la traquita SLMPL15-05, donde esta última no contiene una anomalía en Eu (Figura 37A), mientras que las riolitas además de presentar un paralelismo entre sí, y variación en concentraciones de los HREE, tienen una marcada anomalía negativa en Eu (lo que implica un fraccionamiento de la plagioclasa).

El diagrama multielementos (Figura 37B) confirma la distinción entre estos magmas toleíticos, observándose lo siguiente:

- (1) Marcadas anomalías negativas en Th, Nb, Ce, Sr y Ti para el espectro de la traquita SLMPL15-05, considerando un enriquecimiento de algunos los elementos móviles y anomalías positivas en Rb, K, Pb y Zr.
- (2) Las riolitas de este grupo, tienen un patrón espectral también enriquecido en elementos móviles, anomalías negativas en Nb, Sr, P, Eu y Ti (muy pronunciada) y anomalías positivas en Ba, K y Pb (solo algunas muestras también en Rb), mostrando cierta similitud en los patrones de los elementos inmóviles.



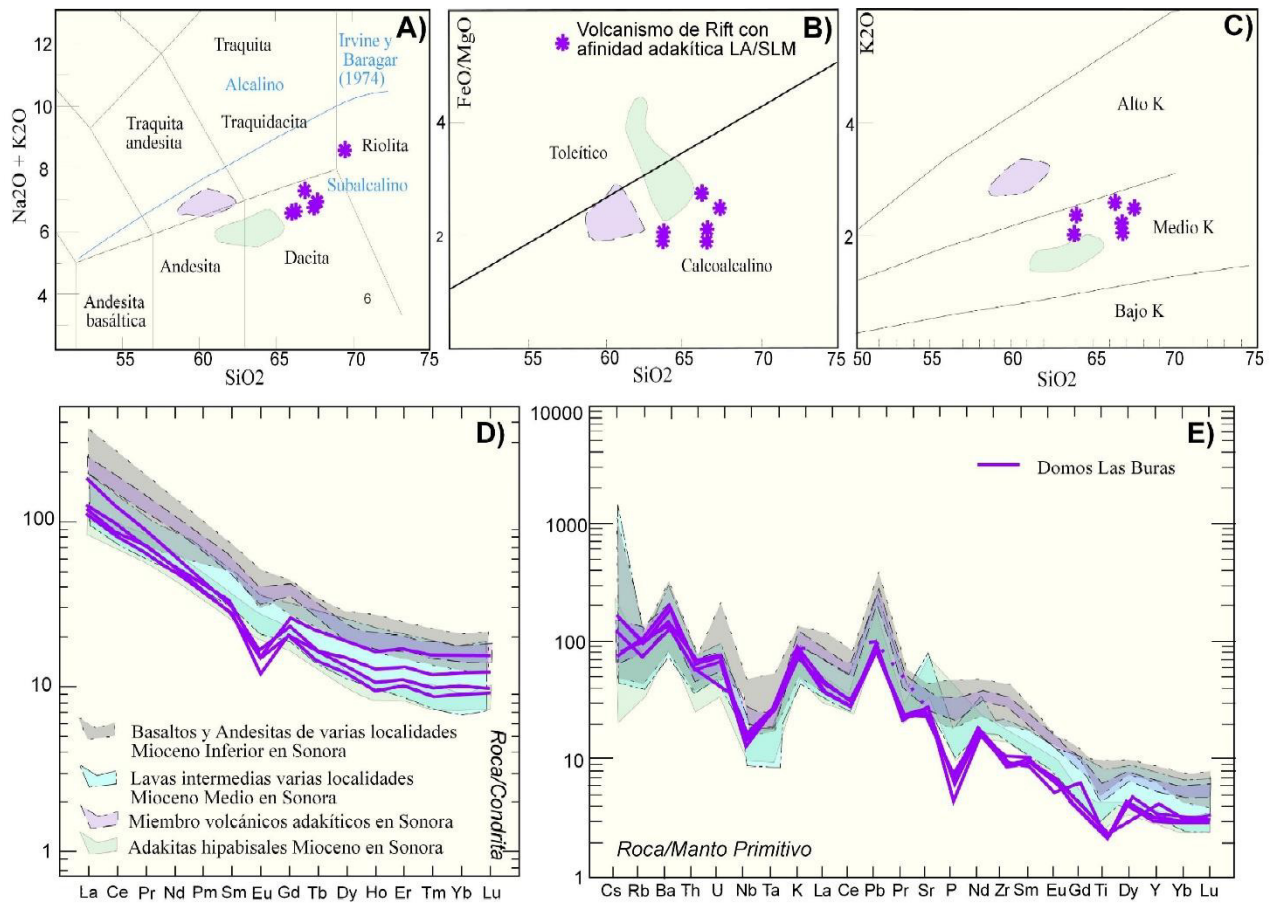
**Figura 37.-** Diagramas que muestran la afinidad geoquímica del magmatismo toleítico de la Sierra Los Mochos y Lomas de Arivaipa: A) Diagramas de elementos de tierras raras normalizados a condrita (Sun y McDonough, 1989); B) Diagrama de multielementos normalizado del manto primitivo (Sun y McDonough, 1989); C) Diagrama multielemental de Pearce (1983), normalizado a MORB.

Por otro lado, en el diagrama multielementos de [Pearce \(1983\)](#) normalizado a MORB ([Figura 37C](#)) donde están incluidas todas las muestras félsicas e intermedias del magmatismo toleítico, es posible observar que los espectros de las rocas analizadas tienen un paralelismo entre si con un importante enriquecimiento en los elementos incompatibles (LFS) K, Rb, Ba y Th, exceptuando a la mayoría de las riolitas con alteración, pues presentan un empobrecimiento en Ba. Los elementos HFS muestran un decremento en función del grado de incompatibilidad, con excepción de enriquecimientos de Ce y Hf para las otras riolitas e ignimbritas, lo cual podría ser un artefacto, dado que estos elementos no fueron detectados para las riolitas alteradas, ni para las islanditas ([Tabla 1](#)).

### 3.4.3 Geoquímica del volcanismo adakítico de rift

Las características geoquímicas que permiten clasificar a las lavas estudiadas en las localidades de Mesa de Arivaipa y Cerro Buras en la Sierra Los Mochos Puerto-Libertad, fechada en este trabajo en  $10.46 \pm 0.19$  Ma (ver apartado 3.5), son graficadas y apreciadas en el diagrama TAS ([Le Bas et al., 1986](#); [Figura 38A](#)). En este diagrama puede observarse que las rocas de estas dos localidades se ubican por debajo del dominio alcalino marcado por la línea de [Irvine y Baragar \(1971\)](#) y composicionalmente existe un dominio de dacitas y solo una muestra clasificó como riolita (MAPL15-01). Además, con motivos de correlación magmática, para los diagramas de este tipo de rocas con naturaleza adakítica, estarán apareciendo dos campos sombreados (uno corresponde al miembro volcánico Cerro Prieto y el otro al Complejo volcánico Las Agujas, dos unidades orogénicas de entre 16 y 14 Ma reportadas por [Gómez-Valencia et al. \(2015\)](#) que representan a las rocas de Rayón, Sonora, otra localidad donde se han estudiado detalladamente los magmas neógenos con tendencia adakítica y que son los más recientes reportados en Sonora, pero con asociación a las etapas finales de la subducción de la placa Farallón por debajo de la Norteamericana.

En cuanto al uso del diagrama FeOt/MgO ([Miyashiro, 1974](#); [Figura 38B](#)) fue pertinente utilizarlo para constatar que a pesar de que las rocas de los Domos Buras, generadas cuando no existía más la subducción, siguen mostrando firmas calcoalcalinas, afinidad precisada en el diagrama de [Pecerrillo y Taylor \(1976\)](#), donde todos los ejemplares de este grupo caen en el campo de las rocas calcoalcalinas con enriquecimiento medio de K ([Figura 38C](#)).



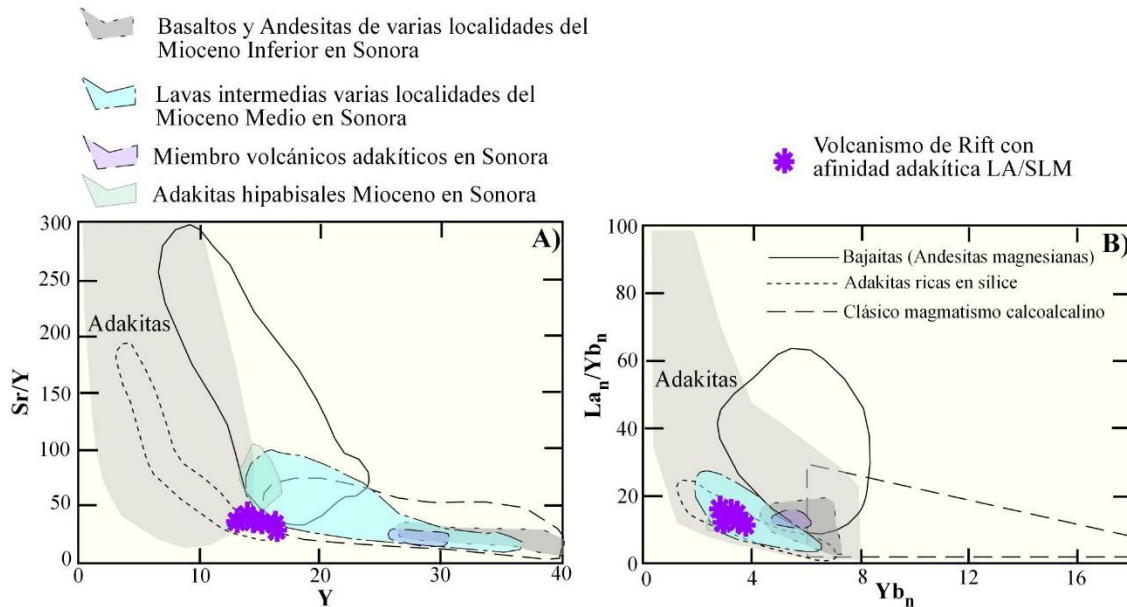
**Figura 38.-** A) Detalle del diagrama TAS (álcalis vs sílice) propuesto por [Le Bas et al. \(1986\)](#), con la línea discriminante de [Irvine y Baragar \(1971\)](#); B) Diagrama de discriminación entre la serie calcoalcólica y toleítica SiO<sub>2</sub> vs FeO/MgO propuesto por [Miyashiro \(1974\)](#); C) Diagrama K<sub>2</sub>O vs SiO<sub>2</sub> propuesto por [Peccerillo y Taylor \(1976\)](#); D) Diagrama de elementos de tierras raras normalizados a condrita ([Sun y McDonough, 1989](#)); E) Diagrama de multielementos normalizado del manto primitivo ([Sun y McDonough, 1989](#)).

El diagrama de elementos traza normalizado a condrita ([Figura 38D](#)), confirma un paralelismo entre las muestras con una pendiente pronunciada de La a Dy, con una anomalía negativa en Eu, sugiriendo un bajo fraccionamiento de la plagioclasa, y HREE relativamente horizontales y con variación entre muestras. Por su parte, en el diagrama multielemental normalizado al manto primitivo ([Figura 38E](#)), queda confirmado un arreglo espectral uniforme en las concentraciones de elementos traza, exhibiendo anomalías positivas en Ba, U, K, Pb, Sr y Nd, las cuales también ocurren en muestras de otras localidades de Sonora ([Figura 38E](#)). Singularmente, la notable anomalía positiva en Sr, aunada a los valores bajos de Y e Yb, son rasgos que han sido identificados para otras lavas de Sonora que son miembros volcánicos de

Báucarit y muestran una afinidad adakítica (Gómez-Valencia et al., 2015), pero también, han sido identificadas en magmas sinrift de edades Mioceno e inclusive Plio-Cuaternario en la región de Baja California (Aguillón-Robles, 2002; Conly et al., 2005; Pallares et al., 2007; Pallares, 2007; Pallares, 2007; Sosa-Ceballos et al., 2019) y en algunas de sus islas (Bonini y Baldin, 1998; Calmus et al., 2008). Por otra parte, como puede observarse en la Figura 38E, los valores de HREE de las muestras de afinidad adakítica de este trabajo, tienen mayor empobrecimiento en elementos inmóviles como el Y e Yb, rasgo que ya había sido observado en otras rocas de afinidad adakítica al norte del área de estudio, en la Sierra Picú (Gómez-Valencia, 2014), donde Gastil y Krummenacher (1977) las fecharon en  $12.7 \pm 0.4$ Ma (edad K-Ar correspondiente al límite del régimen tectónico del fin de la subducción).

Considerando que se ha mencionado que estas dacitas y riolita tienen afinidad adakítica, es pertinente tomar en cuenta la siguiente información para su confirmación, misma que es congruente con otras rocas de naturaleza adakítica (Gómez-Valencia, 2014): 1. Los valores de SiO<sub>2</sub> son superiores al 60% llegando hasta el 67.33%; 2. Los valores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> son superiores al 15% con excepción de la riolita que presenta 13.84%; 3. Los valores de MgO son inferiores al 4.2% hasta 1.08%; 4. Las concentraciones de tierras raras pesadas (HREE) e Y son bajas; 5. Presentan valores de Y de 13.88 a 19 ppm; 6. Contienen altos valores en las concentraciones de Sr, que varían de 542 a 603 ppm; y 7. Presentan altos valores de Ba, que oscilan entre 902 y 1344 ppm;

Finalmente, la firma adakítica mencionada, es corroborada en los diagramas discriminantes que Defant y Drummond (1990 y 1993) propusieron para diferenciar a rocas calcoalcalinas de arco con las de la misma naturaleza pero que además, presentaban anomalías elevadas en Sr y bajas en Y e Yb. En los diagramas de la Figura 39A y B, además de confirmar el rasgo adakítico, se observa que las rocas del área de estudio son afines a las adakitas ricas en sílice reportadas en la literatura (Castillo, 2006) y además afines a otras lavas intermedias adakíticas reportadas en Sonora (Figura 39B).



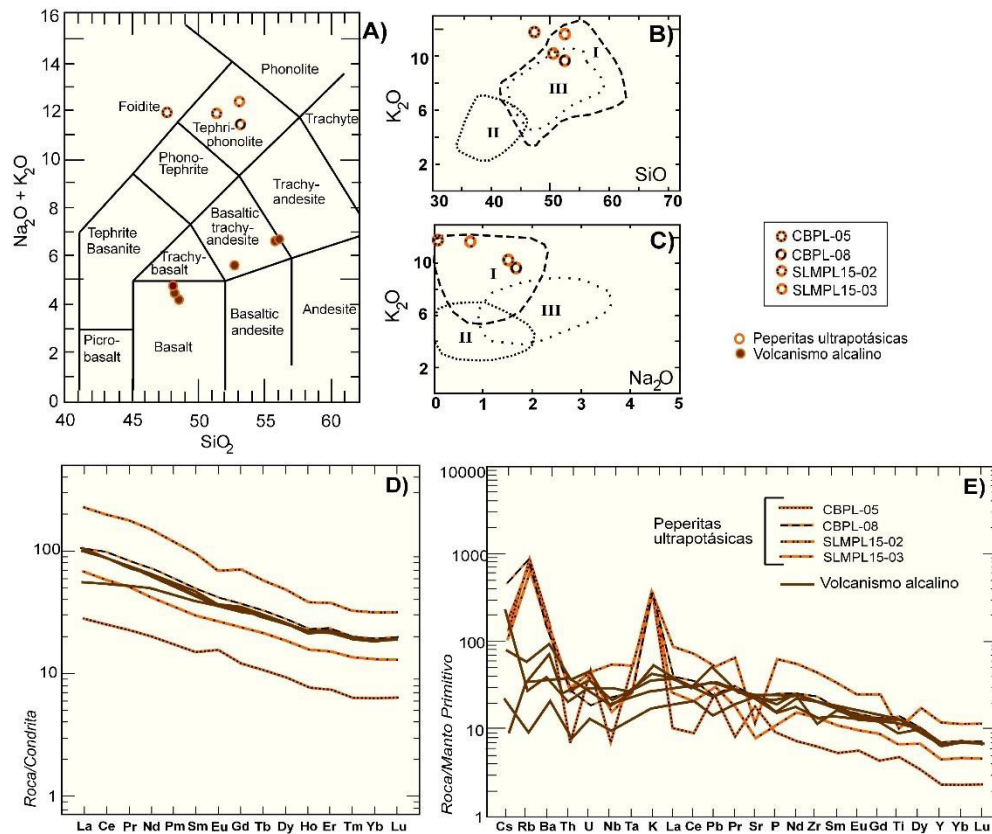
**Figura 39.** Diagramas discriminantes de adakitas vs clásico magmatismo calcoalcalino: A) Diagrama discriminante Y vs Sr/Y (Defant y Drummond, 1990); B) Diagrama discriminante para adakitas Yb<sub>n</sub> vs La<sub>n</sub>/Yb<sub>n</sub> (Defant y Drummond, 1993) mostrando la clasificación química del magmatismo adakítico sinrift de la Sierra Los Mochos-Lomas de Arivaipa.

### 3.4.4 Geoquímica del volcanismo alcalino de rift

En el diagrama TAS (Figura 40A) es posible apreciar que las rocas agrupadas como lavas y peperitas ultrapotásicas, grafican en el dominio alcalino por encima de la línea discriminatoria de Irvine y Baragar (1971) y las clásicas alcalinas clasifican en traquiandesitas basálticas y basaltos. Particularmente, por sus bajas concentraciones de SiO<sub>2</sub> y elevados valores de K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O, las rocas agrupadas como ultrapotásicas caen en el campo de las foiditas (muestra CBPL15-05) y tephro-fonolitas (CBPL15-08, SLMPL15-02 y SLMPL15-03; Figura 40A), mostrando la presencia de feldespatoides para estas rocas. El rasgo geoquímico anterior, es complementado con la presencia de feldespatoides en la norma (Tabla 1): los feldespatoides leucita + nefelina para la muestra CBPL15-05, nefelina para la muestra SLMPL15-02 y leucita + nefelina para la muestra SLMPL15-03 (a excepción del ejemplar CBPL15-08 que no presenta feldespatoides en la norma).

Otro rasgo singular en estos ejemplares de la Sierra Los Mochos, son las altas concentraciones del cociente FeO/MgO (valores en el rango de 12-15% para las rocas CBPL15-05 y SLMPL15-02 y un rango de 7 a 9% en los ejemplares CBPL15-08 y SLMPL15-03) y el elevado valor de K<sub>2</sub>O en el rango de 9.43 y 11.5 % (Figura 31G).





**Figura 40.-** A) Detalle del diagrama TAS (álcalis vs sílice) propuesto por Le Bas et al., (1986), mostrando la clasificación química del magmatismo alcalino y alcalino ultrapotásico de la Sierra Los Mochos y las Lomas de Arivaipa; B) Grupos de rocas ultrapotásicas considerando los valores de SiO<sub>2</sub> vs K<sub>2</sub>O de Foley et al., (1987); C) Grupos de rocas ultrapotásicas respecto a los valores de Na<sub>2</sub>O vs K<sub>2</sub>O de Foley et al. (1987); en los diagramas los siguientes números tiene significan: I.- Grupo de Lamproitas; II Grupo de Kamafugitas y III.- Grupo de Plagiocleucitas). D) Diagrama de elementos de tierras raras normalizados a condrita (Sun y McDonough, 1989); E) Diagrama de multielementos normalizado del manto primitivo (Sun y McDonough, 1989).

Las rocas ultrapotásicas son rocas bastante raras y poco discutidas en la literatura. Por lo general este tipo de rocas son empobrecidas en sílice y son definidas por el cociente  $K_2O/Na_2O > 3$  (Foley et al., 1987; Mitchell y Bergman 1991). Foley et al. (1987) introduce a la literatura una clasificación para las rocas ultrapotásicas basada en tres grupos principales: **A)** Grupo I.- lamproitas; **B)** Grupo II.- kamafigites y **C)** Grupo III.- plagiocleucitas. Cinco años después, Foley (1992) menciona que el potasio no es un elemento discriminante para definir a este tipo de rocas porque las rocas ultrapotásicas difieren mucho en el contenido de K<sub>2</sub>O. Bajo las consideraciones anteriores, la relación molar  $K_2O/Na_2O > 3$  con valores entre 3.81 hasta 108.66 % para las muestras de la Sierra Los Mochos, las clasifica como rocas ultrapotásicas (Tabla 2).

En el caso de algunas rocas de las lavas del NE de La Pirinola que caen en el campo de las traquiandesitas basálticas, es necesario especificar su clasificación considerando las

proporciones presentes de Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O. Por tal motivo, los ejemplares CPPL15-02, CPPL15-03 y CPPL15-08 presentan valores de K<sub>2</sub>O que son inferiores a la relación de Na<sub>2</sub>O, clasificando a estas rocas como mugearitas.

Lamproitas	Rocas de la Sierra Los Mochos			
	CBPL15-05	CBPL15-08	SLMPL15-02	SLMPL15-03
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O >3 rocas ultrapotásicas	108.66	3.81	4.47	11.07
K <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> >0.8	0.93	0.57	0.7	0.81
(K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O)/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> >1 hiperalcalinidad	0.93	0.72	0.85	0.89
FeO < 10%	6.35	11.94	13.19	8.19
CaO < 10%	18.73	1.06	4.27	8.72
TiO <sub>2</sub> 1% - 7%	1.16	2.87	2.11	1.49
Ba > 2000 ppm	976	873	1080	743
Sr > 1000 ppm	367	475	236	162
Zr > 500 ppm	66	248	456	143
La > 200 ppm	7	26	54	17

**Tabla 2.-** Cocientes y discriminantes para rocas ultrapotásicas.

Las rocas ultrapotásicas de la Sierra Los Mochos y Lomas de Arivaipa, según la clasificación de [Foley et al. \(1987\)](#) y [Foley \(1992\)](#), por sus altas concentraciones en K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O>3 clasifican como rocas ultrapotásicas y en base a los diagramas experimentales de [Foley et al. \(1987\)](#), estas rocas caen en el Grupo 1 de las Lamproitas ([Figura 40B y C](#)).

El término lamproíta forma parte de la IUGS y [Le Maitre \(2002\)](#), establece los siguientes criterios geoquímicos para su identificación:

- 1.- molar de K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O > 3, es decir, son ultrapotásicas.
- 2.- molar K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > 0.8 y con frecuencia > 1
- 3.- molar (K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> normalmente > 1, es decir que son hiperalcalina.
- 4.- por lo general FeO y CaO son a la vez < 10 %; TiO<sub>2</sub> 1-7 %; Ba > 2000 ppm; Sr > 1000 ppm; Zr > 500 ppm y La > 200 ppm.

En la [Tabla 2](#) están incluidos los valores esperados para una lamproíta y los valores que corresponden a las 4 muestras ultrapotásicas de la Sierra Los Mochos y Lomas de Arivaipa. En los valores molares, puede apreciarse que todos los ejemplares cumplen con la característica de ser ultrapotásicos, poniéndose en realce los excesivos valores de la muestra CBPL15-05 (K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O>3=108.66).

Otro rasgo importante es que para que estas rocas sean consideradas como ultrapotásicas de la variedad lamproíta, deben de clasificar también como hipercalinas, sin embargo, se muestran valores de índice de hipercalinidad que van de 0.72 a 0.93, considerando que este rasgo puede ser herencia de los bajos valores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en las lavas.

Los valores de FeO, CaO y  $\text{TiO}_2$ , cumplen relativamente con los rangos establecidos para las rocas de tipo lamproíta, a excepción de la roca CBPL15-05 donde el valor del CaO está casi el doble. El caso de los elementos Ba, Sr, Zr y La, hablaremos de ellos en el apartado de elementos traza y tierras raras.

Por su parte, en el diagrama de elementos de tierras raras (REE; **Figura 40D**) normalizado a condrita [Sun y McDonough, \(1989\)](#) se identifica una marcada diferencia entre las lavas alcalinas y las lavas ultrapotásicas, teniendo las primeras un paralelismo y similitud en el espectro con una casi imperceptible anomalía negativa en Eu. Para el caso de las rocas ultrapotásicas, donde el grado de diferenciación va de menos diferenciadas con las muestras CBPL15-05 y SLMPL15-03 a más diferenciadas con las muestras CBPL15-08 y SLMPL15-02, existe una variación importante en las concentraciones de REE, aunque los espectros desde su ubicación guardan un paralelismo. Particularmente, el ejemplar CBPL15-05 exhibe una anomalía positiva en Eu y el ejemplar SLMPL15-02 una anomalía negativa en Eu (**Figura 40D**).

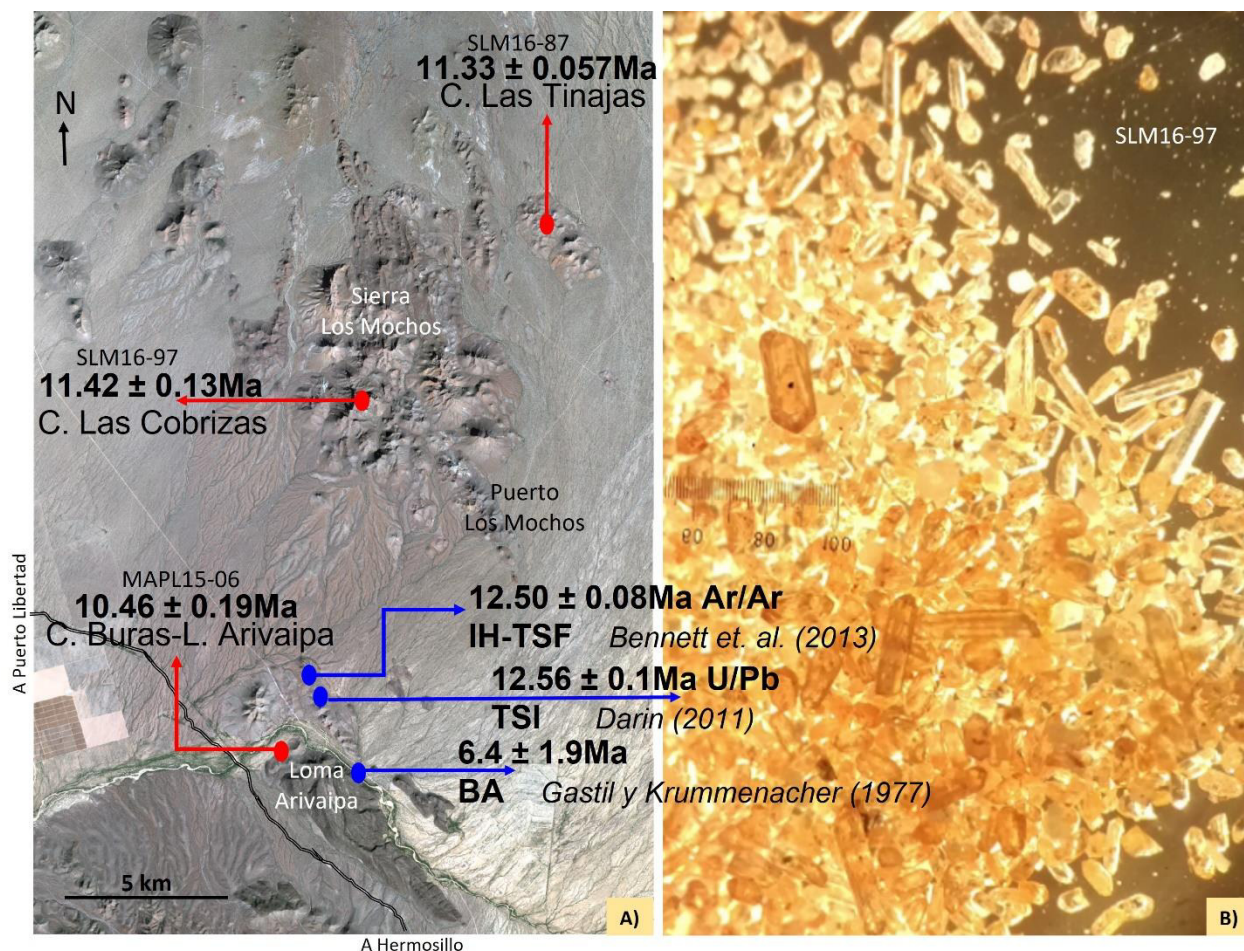
Los espectros en el diagrama multielementos (**Figura 40E**), son consistentes con el grado de diferenciación que quedó evidenciado en el diagrama de REE. En todos los casos, existe una tendencia a la subhorizontalidad en los elementos inmóviles y un incremento en los elementos compatibles móviles a excepción de los basaltos, que muestran un decremento en estos elementos, menos en el Cs, donde la muestra MAPL15-02 presenta una elevada concentración. Por otro lado, las rocas ultrapotásicas tienen una diferenciación con las clásicas alcalinas, al presentar anomalías positivas en Rb, K y Pb para todos los magmas. Exclusivamente para los ejemplares CBPL15-05 y SLMPL15-03, se presentan anomalías positivas en U y solo para la muestra CBPL15-05 anomalías también positivas en Sr y Ti.

Para los ejemplares SLMPL15-03 y SLMPL15-02 tienen anomalías negativas en Sr y solo el ejemplar SLMPL15-02 tiene una anomalía negativa en Ti (**Figura 40E**).

Estas lavas fueron descritas como ultrapotásicas de la variedad lamproíta, sin embargo, en lo que respecta a los elementos REE y tierras raras Ba, Sr, Zr y La, las rocas de la Sierra Los Mochos no alcanzan por completo los valores tipo de estas rocas (**Tabla 2**).

### 3.5 Geocronología U/Pb en zirrones

Los análisis isotópicos de U-Pb en zirrones, fueron realizado utilizando la técnica de fechamiento por Ablación Láser por Espectrómetro de Masas de Plasma Inducido Acoplado (LA-ICP-MS, Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) del Centro de Geociencias (CGEO) de la UNAM, campus Juriquilla, Querétaro, siguiendo la metodología establecida por [Solari et al. \(2010\)](#), cuya sistemática aprendida es explicada brevemente en el [Apéndice C](#). Para este trabajo, se consideró el fechamiento de un domo dacítico adakítico de las Lomas de Arivaipa y dos ejemplares que coronan a la secuencia de la Sierra Los Mochos ([Figura 41](#)).



**Figura 41.** A) Imagen Google Earth que muestra la ubicación de las muestras geocronológicas de la literatura y las muestras fechadas con la técnica U-Pb en este trabajo; B) Microfotografía ejemplar de los zirrones presentes en las dacitas adakíticas de la Sierra Los Mochos (muestra SLM16-97).

Estas muestras representativas fueron seleccionadas con la finalidad de complementar el control estratigráfico temporal de la localidad, dado que ya se contaba con tres importantes fechamientos de las unidades magmáticas que eran consideradas las más jóvenes de la región, se trata de la Toba San Ignacio muestreada en la Sierra Bacha al oeste de la Loma de Arivaipa, fechada en  $12.56 \pm 0.1\text{Ma}$  utilizando la técnica geocronológica U-Pb (Darin, 2011); la Ignimbrita de Hermosillo/Toba de San Felipe muestreada en la porción costera de Puerto Libertad, fechada en  $12.50 \pm 0.08\text{Ma}$  con la técnica geocronológica  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  (Bennett et. al., 2013); y el Basalto Arivaipa muestreado al Norte de la Sierra Bacha, fechado con la técnica geocronológica K-Ar en  $6.4 \pm 1.9\text{Ma}$  (Gastil y Krummenacher, 1977; Figura 41) y verificado en  $10.59 \pm 0.06\text{Ma}$  con la técnica geocronológica  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  (Darin, 2011). Los anteriores datos geocronológicos muestran un rango de edad muy diferente para la misma unidad volcánica, lo cual y como se mencionó con anterioridad, puede ser atribuido a la técnica geocronológica empleada, sin embargo, en comparativo con las observaciones de campo, la sucesión estratigráfica dicta una mayor congruencia con la fecha de Gastil y Krummenacher, (1977).

### 3.5.1 Resultados

Un total de 3 muestras, 2 de la Sierra los Mochos y 1 de las Lomas de Arivaipa, son las que fueron fechadas por el método geocronológico U-Pb en zircones para determinar la edad de cristalización de las rocas utilizando la técnica LA-ICP-MS

#### 3.5.1.1 Dacita-Traquidacita Adakítica MAPL15-06

La muestra MAPL15-06 corresponde a una dacita-traquidacita fluidal y fue recolectada en el sector noroeste de la Loma de Arivaipa (Figura 42). De esta muestra se seleccionaron 24 zircones para su fechamiento U-Pb, con el fin de obtener la edad de cristalización de este magma intermedio. Los zircones analizados tienen morfologías prismáticas tabulares, alargados con terminaciones piramidales, son traslucidos y rosados, subhedrales a euhedrales con dimensiones entre 150-200  $\mu\text{m}$ . También existen zircones con rasgos muy similares, con la diferencia en que presentaban los extremos redondeados y subredondeados, considerando una relación con xenocristales, información que ha sido corroborada con cátodoluminiscencia y fechamiento U-

Pb. Algunos de los cristales observados en la muestra corresponden con xenocristales, los cuales fueron corroborados con fechamiento U-Pb en análisis de zircones individuales (no se incluyen en la tabla, ya que por corresponden con edades Cretácico Superior, se descartaron). Por otro lado, las concentraciones de U para los zircones analizados oscilan de bajas a moderadas en un rango de 283 a 1654 ppm y las concentraciones de Th entre 133 a 1726 ppm. Los análisis graficados en un diagrama de concordia tipo Tera-Wasserburg (**Figura 42A**) en donde se observa dispersión en algunos de los zircones, esto posiblemente ocasionado por herencias en el borde del zoneamiento del cristal, constatando una edad  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  de  $11.23 \pm 0.57$  Ma con un MSWD de 1.09. Sin embargo, se consideró como mejor opción el cálculo de la edad media ponderada  $10.46 \pm 0.19$  Ma (2s, MSDW = 2.7, n = 24; **Figura 42B**), al tener menor rango de error. Por último, cabe destacar que esta muestra tuvo que analizarse dos veces, pues en la primera fracción constituida por escasos zircones de  $100\mu$  representaron un análisis en su mayoría de xenocristales Cretácico Superior, muy probablemente asociados a cristales del basamento intrusivo Laramídico. La segunda fracción analizada, correspondió a un segundo muestreo del domo dacítico, esta vez procurando obtener una mayor cantidad de muestra y la obtención de zircones en la fracción  $150$  a  $200\mu$ , resultando en esta ocasión, fue satisfactorio al obtener una fracción más fina con mayor contenido en zircón.

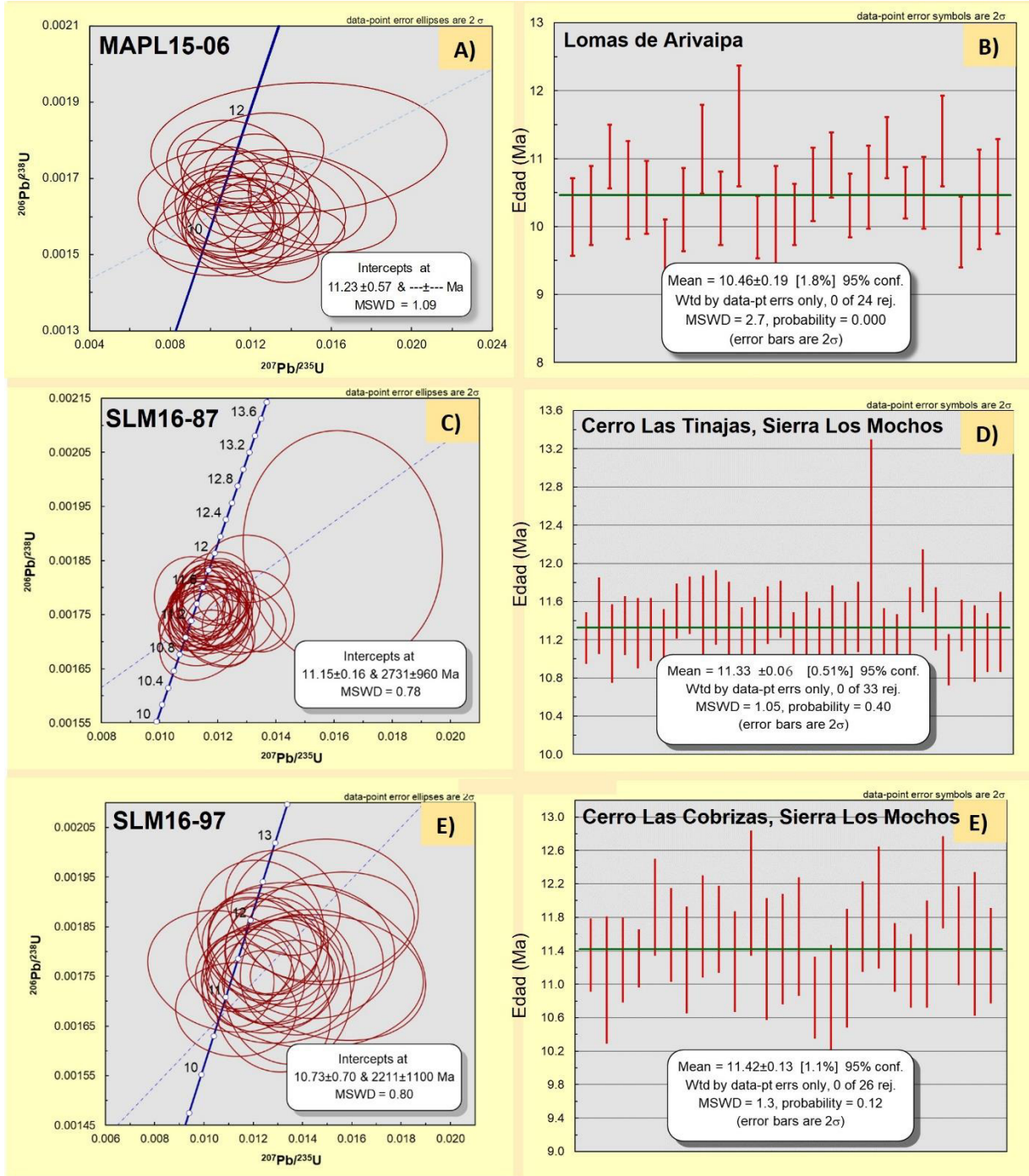
### **3.5.1.2 Riolita Toleítica SLM16-87**

La riolita islandítica SLM16-87, fue recolectada en el sector noreste de la Sierra Los Mochos, en las inmediaciones del cerro Las Tinajas (**Figura 42**). De esta muestra 33 zircones fueron seleccionados para su fechamiento U-Pb, con el fin de obtener la edad de cristalización de este magma félsico. Los zircones analizados tienen dimensiones entre  $40$  y  $120\mu$ , con morfologías prismáticas tabulares, alargados con terminaciones bipiramidales, son cristales traslucidos y beige rosados, subhedrales a euhedrales. En cuanto a las concentraciones de U, los zircones analizados oscilan en rangos moderados entre  $842$  a  $2720$  ppm y las concentraciones de Th entre  $495$  a  $2230$  ppm. Los análisis fueron graficados en un diagrama de concordia tipo Tera-Wasserburg (**Figura 42C**) muestran una dispersión en al menos cinco de los zircones. Con el conjunto de zircones agrupados, fue posible constatar una edad  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  de  $11.15 \pm 0.16$

Ma con un MSWD de 0.78, sin embargo, una mejor opción es el cálculo de la edad media ponderada  $11.33 \pm 0.06$  Ma (2s, MSDW = 1.05, n = 33; **Figura 42D**).

### 3.5.1.3 Riolita Toleítica SLM16-97

La muestra de dacita-traquidacita fluidal MAPL15-06 fue recolectada en el sector oeste de la Sierra Los Mochos (**Figura 42**). De esta manera fue posible seleccionar 26 zircones para su fechamiento U-Pb, con el fin de obtener la edad de cristalización de este magma félsico. Los zircones analizados tienen morfologías prismáticas tabulares, alargados con terminaciones piramidales (subredondeadas), son traslucidos y rosados, subhedrales a euhedrales con dimensiones entre 40-90  $\mu\text{m}$ . En el análisis puntual de los zircones, concentraciones obtenidas de U van de bajas a moderadas en un rango de 266 a 1210 ppm y las concentraciones de Th entre 132 a 880 ppm. Los análisis se graficaron en un diagrama de concordia tipo Tera-Wasserburg (**Figura 42E**) en donde se observa dispersión, esto posiblemente ocasionado por diferencias analíticas ligadas al zoneamiento de los cristales, constatando una edad  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  de  $10.73 \pm 0.70$  Ma con un MSWD de 0.08, sin embargo, se consideró como mejor opción el cálculo de la edad media ponderada  $11.42 \pm 0.13$  Ma (2s, MSDW = 1.3, n = 26; **Figura 42F**).



**Figura 42.** Gráficas de las edades de los zircons obtenidos de las muestras del área de la Sierra Los Mochos y Lomas de Arivaipa utilizando la técnica de ablación láser (LA-ICP-MS): A, C y E) Gráficos de concordia tipo Tera-Wasserburg, mostrando la agrupación de análisis concordantes de los zircons para las muestras MAPL15-06, SLM16-87 y SLM16-97; B, D y E) Diagramas de edad media ponderada mostrando la distribución de las edades registradas y su margen de error MSWD: Mean Squared Weighted Deviates (Desviación Media Cuadrática Ponderada).





Número de análisis	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	Error	Rho	Disc %	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error (Ma)	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error (Ma)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error (Ma)	Best age (Ma)	Error (Ma)
<b>Muestra SLM16-97 Traquidacita hipabisal Pl&gt;Anf&gt;OxFe-Ti&gt;Zn Cerro Las Cobrizas, Sierra Los Mochos</b>																					
SLM1697-02	624	337	0.54	0.0509	± 0.0065	0.0116	± 0.0016	0.0018	± 0.0001	0.0007	± 0.0001	0.1789	2.99	11.35	± 0.44	11.7	± 1.6	180	± 260	11.35	± 0.4
SLM1697-03	331	221	0.67	0.0551	± 0.0087	0.0134	± 0.0021	0.0017	± 0.0001	0.0007	± 0.0001	-0.0376	18.15	11.05	± 0.76	13.5	± 2.1	330	± 340	11.05	± 0.8
SLM1697-04	606	474	0.78	0.0510	± 0.0079	0.0124	± 0.0019	0.0018	± 0.0001	0.0006	± 0.0001	-0.1252	9.68	11.29	± 0.51	12.5	± 1.9	140	± 310	11.29	± 0.5
SLM1697-05	1210	880	0.73	0.0543	± 0.0052	0.0136	± 0.0014	0.0018	± 0.0001	0.0006	± 0.0001	0.0812	18.04	11.31	± 0.35	13.8	± 1.4	390	± 200	11.31	± 0.4
SLM1697-06	682	379	0.56	0.0590	± 0.0110	0.0151	± 0.0028	0.0019	± 0.0001	0.0003	± 0.0002	0.161	21.58	11.92	± 0.58	15.2	± 2.8	600	± 360	11.92	± 0.6
SLM1697-08	358	140	0.39	0.0560	± 0.0100	0.0125	± 0.0021	0.0018	± 0.0001	0.0005	± 0.0001	-0.1713	8.02	11.59	± 0.56	12.6	± 2.1	400	± 340	11.59	± 0.6
SLM1697-10	564	331	0.59	0.0568	± 0.0078	0.0138	± 0.0019	0.0018	± 0.0001	0.0005	± 0.0002	0.0151	18.78	11.29	± 0.64	13.9	± 1.9	440	± 280	11.29	± 0.6
SLM1697-11	455	255	0.56	0.0501	± 0.0080	0.0126	± 0.0020	0.0018	± 0.0001	0.0007	± 0.0001	-0.022	7.95	11.69	± 0.61	12.7	± 2.1	200	± 310	11.69	± 0.6
SLM1697-12	505	300	0.59	0.0530	± 0.0069	0.0128	± 0.0016	0.0018	± 0.0001	0.0006	± 0.0001	0.0932	9.61	11.66	± 0.52	12.9	± 1.6	410	± 270	11.66	± 0.5
SLM1697-13	295	158	0.54	0.0516	± 0.0099	0.0127	± 0.0023	0.0018	± 0.0001	0.0006	± 0.0001	0.0731	11.95	11.27	± 0.6	12.8	± 2.3	320	± 350	11.27	± 0.6
SLM1697-15	266	175	0.66	0.0550	± 0.0120	0.0149	± 0.0031	0.0019	± 0.0001	0.0007	± 0.0001	0.0043	19.40	12.09	± 0.75	15	± 3.1	390	± 410	12.09	± 0.8
SLM1697-16	377	226	0.60	0.0520	± 0.0120	0.0136	± 0.0030	0.0018	± 0.0001	0.0006	± 0.0001	0.2178	17.52	11.3	± 0.73	13.7	± 3	250	± 450	11.30	± 0.7
SLM1697-17	295	200	0.68	0.0523	± 0.0092	0.0127	± 0.0021	0.0018	± 0.0001	0.0006	± 0.0001	-0.1749	10.78	11.42	± 0.66	12.8	± 2.1	320	± 300	11.42	± 0.7
SLM1697-18	358	194	0.54	0.0530	± 0.0110	0.0143	± 0.0028	0.0018	± 0.0001	0.0005	± 0.0002	-0.0301	19.65	11.57	± 0.71	14.4	± 2.8	400	± 410	11.57	± 0.7
SLM1697-20	496	307	0.62	0.0474	± 0.0085	0.0113	± 0.0020	0.0017	± 0.0001	0.0006	± 0.0001	-0.0208	8.14	10.84	± 0.49	11.8	± 1.9	140	± 330	10.84	± 0.5
SLM1697-21	543	376	0.69	0.0547	± 0.0090	0.0128	± 0.0019	0.0017	± 0.0001	0.0006	± 0.0001	-0.1282	16.20	10.81	± 0.66	12.9	± 1.9	370	± 330	10.81	± 0.7
SLM1697-22	438	233	0.53	0.0610	± 0.0160	0.0145	± 0.0036	0.0017	± 0.0001	0.0007	± 0.0001	-0.0003	22.83	11.19	± 0.71	14.5	± 3.6	460	± 550	11.19	± 0.7
SLM1697-23	779	578	0.74	0.0520	± 0.0083	0.0124	± 0.0018	0.0018	± 0.0001	0.0006	± 0.0001	-0.2143	6.48	11.69	± 0.54	12.5	± 1.8	230	± 330	11.69	± 0.5
SLM1697-24	283	132	0.47	0.0540	± 0.0100	0.0123	± 0.0021	0.0019	± 0.0001	0.0005	± 0.0001	-0.0651	3.87	11.92	± 0.73	12.4	± 2.1	320	± 370	11.92	± 0.7
SLM1697-26	674	486	0.72	0.0494	± 0.0066	0.0118	± 0.0015	0.0018	± 0.0001	0.0006	± 0.0000	-0.058	4.87	11.32	± 0.41	11.9	± 1.5	110	± 260	11.32	± 0.4
SLM1697-27	755	649	0.86	0.0480	± 0.0047	0.0115	± 0.0011	0.0017	± 0.0001	0.0006	± 0.0001	0.0836	3.79	11.16	± 0.44	11.6	± 1.1	50	± 190	11.16	± 0.4
SLM1697-28	329	208	0.63	0.0470	± 0.0120	0.0109	± 0.0026	0.0018	± 0.0001	0.0006	± 0.0001	-0.1589	-3.27	11.36	± 0.64	11	± 2.6	-160	± 420	11.36	± 0.6
SLM1697-29	473	237	0.50	0.0531	± 0.0085	0.0132	± 0.0019	0.0019	± 0.0001	0.0007	± 0.0001	-0.1635	8.12	12.22	± 0.55	13.3	± 1.9	250	± 320	12.22	± 0.6
SLM1697-30	492	212	0.43	0.0472	± 0.0080	0.0116	± 0.0019	0.0018	± 0.0001	0.0006	± 0.0001	0.1187	1.03	11.58	± 0.59	11.7	± 1.9	-10	± 320	11.58	± 0.6
SLM1697-32	293	96.2	0.33	0.0600	± 0.0160	0.0146	± 0.0036	0.0018	± 0.0001	0.0007	± 0.0002	-0.2956	21.90	11.48	± 0.86	14.7	± 3.6	550	± 560	11.48	± 0.9
SLM1697-34	479	228	0.48	0.0552	± 0.0083	0.0132	± 0.0020	0.0018	± 0.0001	0.0007	± 0.0001	0.1881	14.74	11.34	± 0.57	13.3	± 2	340	± 320	11.34	± 0.6

Edad  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  Media Ponderada **11.42 ± 0.13**  
(2 Sigma, MSDW=1.3, n=26)

**Tabla 5.** Datos analíticos de U-Th-Pb obtenidos por LA-ICP-MS en zircones de una dacita islandítica del Mioceno Tardío de la Sierra Los Mochos, Sonora, México.

## CAPÍTULO IV DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Como parte del basamento de la localidad de estudio, se describieron a los granitoides que afloran al Norte de la Sierra Los Mochos, destacando que sus características petrográficas y geoquímicas son similares a las de los intrusivos contemporáneos del Cretácico Superior en Sonora (Valencia-Moreno et al., 2021). Otras características incluyen una alineación N-S/NW-SE con otros afloramientos de intrusivos graníticos limitados entre la Sierra Picú y la Sierra Los Mochos (Gómez-Valencia et al., 2022), que tienen composiciones granodioríticas a sienograníticas con abundantes enclaves máficos microgranulares (MME) y tendencias calcoalcalinas. Los diques aplíticos y pegmatíticos son abundantes, incluidos los lamprófiros que son escasos en las localidades estudiadas, en comparación con otras localidades de Sonora donde han descritos en detalle (Orozco-Garza et al., 2013). Las edades también son consistentes con las isócronas propuestas para los contornos de tiempo estimados del plutonismo Laramide como lo describe Valencia-Moreno et al. (2006), aunque la creciente datación de estos intrusivos ha mostrado una amplia dispersión de edades en Sonora, por lo que se debe considerar a la escala del área de estudio, si se quisiese observar una migración lineal hacia el interior del continente.

La geoquímica de los intrusivos Cretácicos estudiados, muestra características de magmatismo con afinidad adakítica en uno de los intrusivos de la SLM y Gómez-Valencia et al. (2022) describieron que en el Norte de esta localidad, esta serie de intrusivos pudo emplazarse a profundidades entre 5 y 6 km. Estas profundidades de emplazamiento consideradas someras, sugieren que el proceso de exhumación del evento orogénico Laramide podría estar restringido a los cuerpos más someros durante el evento de extensión del Mioceno Basin and Range (Stock y Hodges, 1989; Bennett et al., 2013 ; Vidal-Solano et al., 2013 ; Darin et al., 2016 ; Velderrain-Rojas et al., 2022). Todavía se requieren estudios de geotermobarometría adicionales para confirmar esta inferencia y determinar un historial de emplazamiento más detallado para estos intrusivos. Lo que si podemos confirmar, es que en la cima de la sucesión sedimentaria tipo Báucarit, en el Cerro Mochos, se encontró un horizonte detrítico con clastos de los granitoides estudiados, con dimensiones de hasta 2 m de diámetro, por lo que es factible considerarlos como vestigios de erosión de estos intrusivos, evento ocurrido poco antes del emplazamiento de magmas toleíticos fechados en este trabajo entre 11.42 y 11.33 Ma.

Finalmente, la característica geoquímica adakítica es escasamente estudiada en rocas intrusivas del NW de México, donde [Pérez-Segura et al. \(2009\)](#) encontraron una relación entre el magmatismo adakítico y los depósitos de Cu, Zn, Ni y Co. Recientemente, [Gómez-Valencia et al. \(2022\)](#) confirman la reevaluación de la discriminación geoquímica de los intrusivos del Cretácico, tomando en cuenta que bajo el discriminante adakítico se verificó que otros importantes sitios mineros tienen esa afinidad, como lo son Piedras Verdes y el Distrito Minero de La Caridad ([Gómez-Valencia et al. 2022](#)). Sin embargo, más estudios son pertinentes para una interpretación más sólida, como lo es la relación encontrada con la determinación de la fugacidad del oxígeno en este tipo magmatismo y su asociación con depósitos mineralizados tipo porfído cuprífero. Por ejemplo [Zhang et al. 2009](#), han propuesto para este caso, un escenario en el derretimiento parcial del slab oceánicas subducido con una afinidad MORB, el cual produciría fusiones con fugacidades de oxígeno de  $>\Delta FMQ +1,5$  a  $+2$ , ideal para magmas adakíticas con mineralización de Cu ( $>500$  ppm; [Sun et al. 2017](#)).

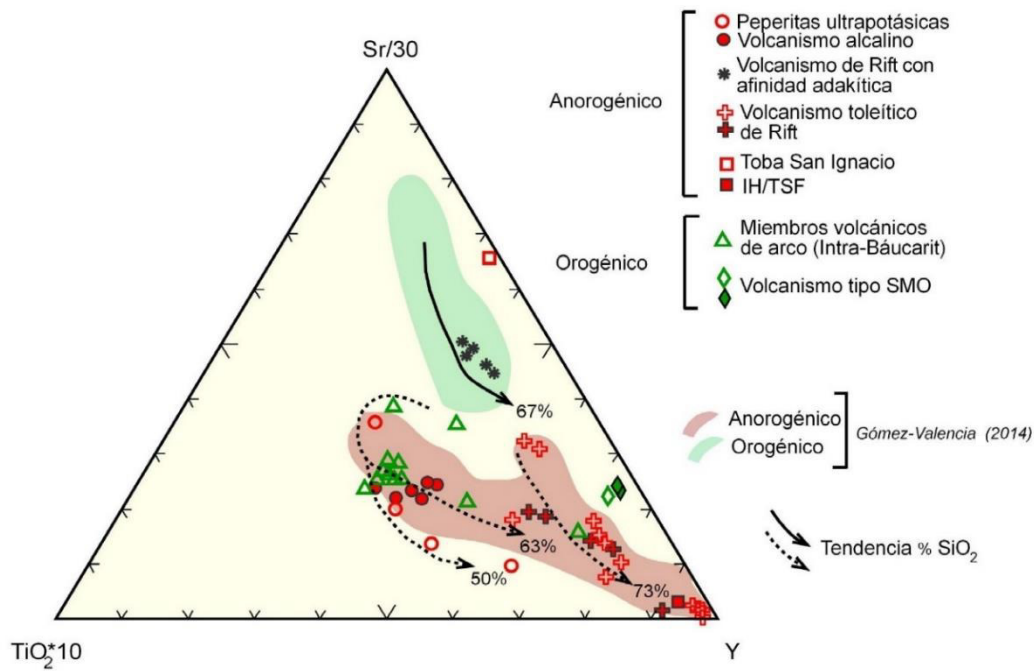
Por otra parte, donde sí se tiene mayor referencia de adakitas y rocas con afinidad adakítica es en el magmatismo del Oligoceno al Mioceno superior que ha sido estudiado en Sonora, Baja California y Baja California Sur, los cuales corresponde predominantemente a flujos volcánicos, depósitos piroclásticos e intrusivos hipabisales asociados a las etapas de subducción tardía ([Pallares et al., 2008](#); [Vidal-Solano, 2005](#); [Gómez-Valencia et al., 2015](#)), evento post-subducción ([Pallares et al., 2008](#); [Calmus et al., 2008](#); [Sosa-Ceballos et al., 2019](#)), y la etapa de syn-rift ([Gómez-Valencia et al., 2021](#); [Gómez-Valencia, 2022](#)).

Por lo anterior, estos estudios previos sugieren que la terminología de adakitas, afinidad adakítica y tendencia adakítica, no está estrictamente asociada a un ambiente de subducción ([Castillo, 2006](#)), aunque sí pueden relacionarse con un ambiente orogénico, como ocurre con algunos de los intrusivos de la Sierra Los Mochos.

#### **4.1 Implicaciones petrotectónicas**

La secuencia volcánica Neógena de edades entre 25 y 8 Ma de la porción costera de Sonora está representada por litologías ocurridas antes y después del Proto-Golfo de California ([Cochemé, 1981](#); [Mora-Klepeis y McDowell, 2004](#); [Roldán-Quintana et al., 2004, 2009](#); [Till et al., 2009](#); [Olguín-Villa, 2010](#); [Barrera-Guerrero, 2011](#); [Gómez-Valencia, 2014](#); [Gómez-Valencia et al., 2015](#); [Velderrain-Rojas, 2016](#); [Vidal-Solano et al., 2013](#); [Vidal-Solano, 2020](#)),

las cuales muestran una marcada disectación estructural, ligada a los procesos transtensivos de la evolución del Golfo de California. Estos eventos volcánicos trascendentales, fueron sucesivos en el tiempo y emitidos en un contexto de cambio tectónico de margen convergente a transformante: (1) magmatismo calcoalcalino; (2) magmatismo adakítico y de afinidad adakítica; (3) transicional; (4) toleítico y (5) alcalino. Sin embargo, es imprescindible mencionar que en la región de la Sierra Los Mochos (SLM) y Lomas de Arivaipa (LA), anómalamente fue posible identificar una mayor concentración de magmatismo toleítico, alcalino y a diferencia de la Costa centro-Sur que domina el magmatismo calcoalcalino, transicional y toleítico (Gómez-Valencia, 2014; Velderrain-Rojas, 2020). En la SLM y LA se encontró la interesante presencia de magmatismo adakítico sin-rift y rocas alcalinas ultrapotásicas. Sin embargo, las características orogénicas y anorogénicas, que regularmente han sido plasmadas en un diagrama ternario propuesto por Gómez-Valencia (2014;  $TiO_2 \cdot 10$ , Sr/30 e Y; Figura 43), para delimitar el campo de rocas de Arco vs rocas de Rift en la región de Sonora Central, no es concordante con lo estudiado en las rocas de la SLM y LA, dado que la mayoría de las unidades magmáticas, muestran en éste un dominio anorogénico, mientras que el magmatismo de Rift de afinidad adakítica, que fue fechado en  $10.46 \pm 0.19$  Ma, cae en el campo de las rocas orogénicas en el mismo diagrama (Figura 43). Por lo anterior, es de destacar, que el magmatismo de la región de la SLM y LA corresponde a un dominio independiente de la sucesión magmática conocida en el centro y Sur de Sonora para el Proto-Golfo de California, considerándose en este trabajo, como un bloque exótico.



**Figura 43.** Diagrama ternario discriminante  $\text{TiO}_2 \cdot 10$ ,  $\text{Sr}/30$  e  $Y$  propuesto por Gómez-Valencia (2014), donde se muestra las dos principales tendencias magmáticas reconocidas para el magmatismo Oligoceno Tardío-Mioceno de Sonora central. Además, se incluyen las unidades magmáticas reconocidas para la Sierra Los Mochos y Lomas de Arivaipa.

#### 4.1.1 Magmatismo pre-Rift

Las unidades volcánicas englobadas como magmatismo pre-Rift corresponden al volcanismo tipo SMO y a los miembros volcánicos de arco (intra-Báucarit), los cuales normalmente tienen presencia en el dominio de la provincia fisiográfica Basin and Range (Gómez-Valencia et al., 2015), no en el sector correspondiente a la provincia extensional del Golfo, donde está ubicada la SLM y LA.

La presencia del registro volcánico de la SMO en la provincia costera de Sonora pone en manifiesto, por un lado, una fuerte extensión durante el Mioceno medio capaz de aislar a la secuencia más de 150 km de los últimos vestigios conocidos al Oeste en continente y, por otro lado, la presencia de nuevos depósitos de perlita y una fuente de obsidiana ligados a la Provincia de Riolitas del Oligoceno en el NW de México, que eran desconocidos en la región, esta información es plasmada en el artículo del Anexo 2, el cual forma parte de esta tesis (Vidal-Solano et al., 2020).

Por otra parte, la presencia de las unidades magmáticas intra-Báucarit e inclusive la Sucesión sedimentaria tipo Báucarit, habla de que la tectónica para esta región en ese tiempo,

tenía la presencia de uno de los Graben's o semi-Graben's más aislados del dominio Basin and Range, o bien, cabe la posibilidad de que este sistema tectónico aún activo, desplazó a este bloque por medio de fallamiento lateral regional. Magmáticamente hablando, el origen de los líquidos está o puede estar relacionado a la subducción de la placa oceánica Farallón debajo de la continental Norteamericana y muestra una afinidad química Calcoalcalina. En algunos de los miembros volcánicos de Báucarit, es posible identificar una afinidad adakítica, rasgos ya reconocidos en otras localidades, como en la región de Rayón, Sonora, donde se identificó que los miembros volcánicos del Mioceno medio como Cerro Prieto y Las Agujas, además de tener afinidad adakítica, pueden ser producto de la subducción de la microplaca Guadalupe (Gómez-Valencia et al., 2015), y que en regiones más hacia el Norte, por ejemplo en la Sierra Picú, el magmatismo reconocido es análogo, también adakítico (Formación volcánica La Golondrina, Formación volcánica Cerro Picú y Formación volcánica Las Lomitas), y con una propuesta de origen derivado de la subducción de la microplaca Soledad (Gómez-Valencia et al., 2019).

Otro rasgo interesante de remarcar es la contrastante información que guarda con la variación de los elementos Sr, Ba, SiO<sub>2</sub>, Y, Yb y La a través del tiempo, dictado en los análisis de las rocas de los productos magmáticos pre-Rift (Cretácico-Mioceno) identificados en otras localidades de Sonora y que además muestran una naturaleza adakítica (Figura 44).

Se trata de las siguientes observaciones en el tiempo:

1. El carácter adakítico permanece variable en el tiempo, sin embargo, rumbo a las etapas finales de la subducción, presenta o exhibe un marcado aumento de la relación Sr/Y (Figura 44A), información que ya había sido mencionada por Gómez-Valencia, (2015). Rasgo contrastante rumbo al Mioceno Superior, donde vemos un decremento de la relación Sr/Y en un contexto tectónico extensivo, situación que Shapman et al. (2015) interpreta como asociación en la variación temporal de los espesores de la corteza. Por otra parte, en términos de cristalización fraccionada
2. La relación La/Yb (Figura 44B), muestra un incremento en las etapas finales del arco Cretácico, en las etapas finales del Oligoceno y en las etapas finales de la subducción en el Mioceno, datos que son equiparables con lo que muestra la relación Sr/Y (Figura 44A). Los elementos Sr, Y, Yb y La son clave en la definición de magmas adakíticos.
3. Ba/Y están relacionados al componente de subducción y en la Figura 44C, vemos como oscila en el tiempo y respecto a las rocas Cretácicas, las del Oligoceno-Mioceno mantienen valores

bajos. Por su parte, Ba también tiene una relación con el basamento continental y este elemento que presenta un coeficiente de partición alto en la cristalización de plagioclasa y feldespato, es de relevancia por su importante presencia en rocas con afinidad adakítica. Además, se ha documentado que estas rocas para el caso de Sonora, se tiene una participación de la corteza engrosada (Gomez-Valencia et al. 2022).



**Figura 44.** Gráficos de espectros geoquímicos de las rocas adakíticas y de afinidad adakítica del Arco Cretácico (N=62; Valencia-Moreno et al., 2021; Gómez-Valencia et al., 2022), Oligoceno, Mioceno (N=40; Gómez-Valencia, 2014; Gómez Valencia et al., 2015) y del Rift Mioceno de Sonora (Gómez Valencia y Vidal-Solano, 2022), mostrando una marcada evolución en el límite tectónico de subducción a extensión. A) Relación Sr/Y; B) Relación La/Yb; C) Relación Ba/Y; D) Enriquecimiento en SiO<sub>2</sub>; y E) Relación Ba-Sr. Las abreviaturas de las localidades significan: B. Bacanora; CC. Costa Central; SLM-SEP. Sierra Los Mochos y Sierra Picú; RS. Río Sonora; H. Hermosillo; T. Tonichi; C. Cananea; SC. Sonora Central; N. Nacozari; SMH. San Miguel de Horcasitas; FCG. Falso Cerro Gorgus; SLLA. Sierra Libre-Las Avispas; SLM; Sierra Los Mochos; EL. Ejido La Labor; R. Rayón; SEP. Sierra El Picú; SLM-LA. Sierra Los Mochos-Lomas de Arivaipa.



4. Tanto para las rocas adakitas y de afinidad adakítica del Cretácico al Mioceno, han mostrado tener una relación entre los elementos Sr y Ba, pues si uno de ellos está elevado, el otro mostrará bajas concentraciones y viceversa (Figura 44E). Esta información ya ha sido mostrada por Gómez-Valencia (2014), para las rocas del Oligoceno-Mioceno y en la Figura 44, donde están incluidas rocas del Cretácico, vemos que existe un paralelismo en el tiempo independientemente de la localidad. Esta situación prevalece durante el Oligoceno y continúa en el Mioceno inferior (entre el Aquitaniense y Burdigaliense). Sin embargo, entre los 17 y 13 Ma (aproximadamente), en el dominio de los miembros volcánicos de Báucarit existió un traslape entre el Sr y Ba. Particularmente, rumbo a las etapas finales de la subducción en el Norte de Sonora (Sierra Picú), de nueva cuenta, se presenta un paralelismo entre el Ba y el Sr, mostrándose en este sitio los valores más elevados de Ba, en cuanto a lavas se refiere, justo en el límite de cambio de régimen tectónico a Rift, donde ambos elementos en la Sierra Los Mochos decrecen abruptamente sin perder el carácter adakítico. Es importante destacar que las altas concentraciones en Ba y Sr tienen que ver con la génesis del magmatismo adakítico con posible herencia de la posible fusión del slab o de la posible participación de la corteza engrosada.

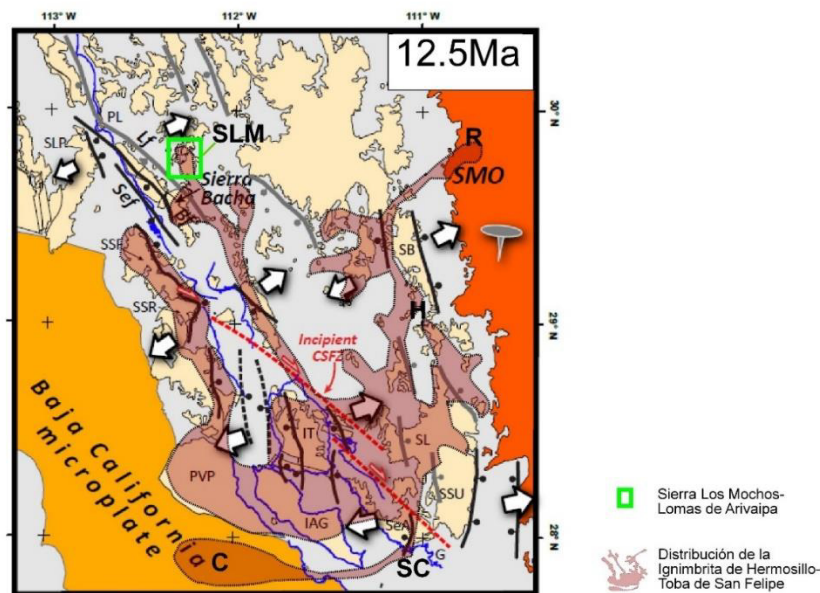
Los elementos Sr, Y, Yb y La son clave en la definición de magmas adakíticos y es notorio que en la evolución de la subducción de la placa Farallón han dejado una huella que puede estar relacionada con las microplacas involucradas (variabilidad en el Mioceno), como por el ángulo de subducción de estas, el espesor de la corteza (variable entre 15 y 22 km, Paulssen, 2017; Campos-Enríquez et al., 2019; Fragoso-Irinea et al. 2021) y la fuente de estos magmas, por ejemplo fusión parcial, manto metasomatizado, o como ha sido definido por Gómez-Valencia et al. (2022) un origen relacionado a la corteza engrosada para las rocas adakíticas del Cretácico.

#### 4.1.2 Magmatismo ProtoGolfo-Rift y Sin-Rift

Aunque es bien conocido que el magmatismo del Proto-Golfo de California en Sonora involucra una evolución del magmatismo transicional, toleítica y alcalina (Mora-Álvarez y McDowell, 2000; Mora-Klepeis y McDowell, 2001; Vidal-Solano et al., 2005; Gómez-Valencia, 2011; Darin, 2011; Barrera-Guerrero, 2012; William-Herman, 2013; Gómez-

Valencia, 2014; Bennett et al., 2016, 2017; Darin et al., 2016; Velderrain-Rojas, 2014, 2014; Velderrain-Rojas et al., 2018; Pérez-Aguilar, 2019; Vidal-Solano, 2020; Velderrain-Rojas, 2021 y Velderrain-Rojas et al., 2021, 2022), y que en Sonora Central se encuentran las máximas expresiones de al menos la secuencia transicional y toleítica, en lo que respecta a la Sierra Los Mochos y Lomas de Arivaipa, existe una presencia importante de una sucesión volcánica toleítica no identificada con anterioridad en alguna otra localidad de Sonora y además, se muestra por primera vez, una secuencia adakítica en contexto de rift, así como la ocurrencia de rocas volcánicas derivadas de magmas alcalinos ultrapotásicos nunca antes reportados en Sonora.

En cuanto al magmatismo transicional se refiere, se tiene evidencia de dos unidades ignimbríticas, la Toba San Ignacio descrita en la Sierra Bacha por [Darin \(2011\)](#) y que hasta el momento no se ha reconocido en otra localidad de Sonora y su contemporánea, la Ignimbrita de Hermosillo-Toba de San Felipe, que expresa en el área de estudio el alcance más al Norte conocido del depósito ([Figura 45](#)), que deriva de una mega erupción ocurrida hace c.a. 12.5 Ma ([Vidal-Solano et al., 2008; Vidal-Solano, 2020](#)).



**Figura 45.** Mapa de reconstrucción de la posición original de Baja California respecto a Sonora, modificado de [Darin \(2011\)](#) y [Vidal-Solano et al. \(2019\)](#). En la propuesta de distribución de la Ignimbrita de Hermosillo-Toba de San Felipe, se observa que en la Sierra Los Mochos (SLM) se tiene la evidencia Norte.

Respecto a la presencia del magmatismo adakítico sinRift, [Aguillón-Robles et al. \(2001\)](#) y [Aguillón-Robles \(2002\)](#) reportan brechas, lavas y domos de afinidad adakítica con edades que

varían entre  $11.3 \pm 1.56$  Ma y  $8.22 \pm 0.44$  Ma. [Aguillón-Robles \(2002\)](#), en su tesis de doctorado reporta magmatismo calcoalcalino de afinidad adakítica fechado entre  $16.4 \pm 0.9$  Ma y  $15.1 \pm 0.3$  Ma, el cual se encuentra intrusionando a la Formación Comondú en el área de Loreto. Este autor señala en el mismo documento, la presencia de un magmatismo adakítico en la Isla del Tiburón, fechado por otros en  $8.55 \pm 0.25$  Ma.

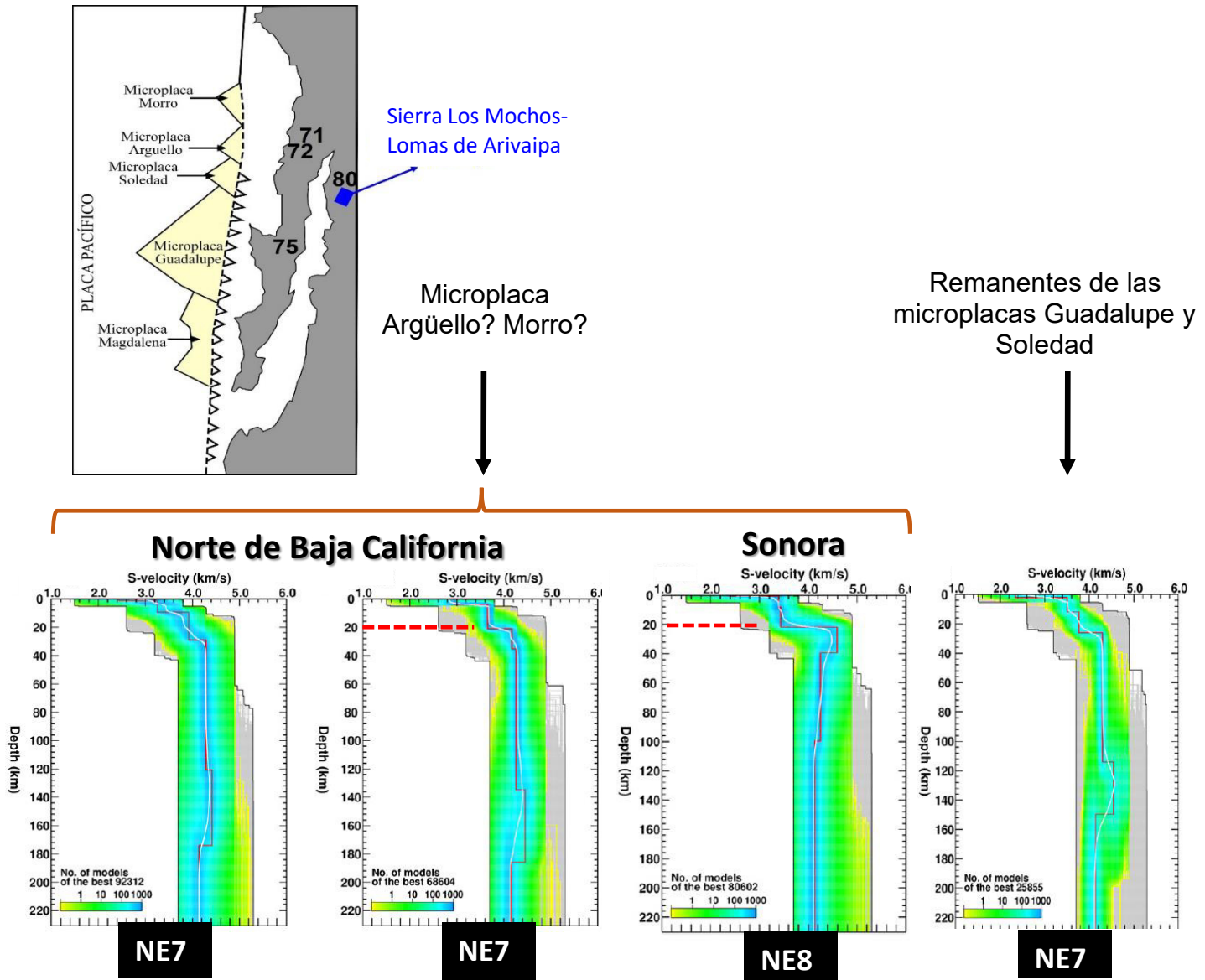
Por su parte, [Pallares et al. \(2007\)](#) identificaron una secuencia volcánica adakítica emplazada entre 12.5 y 8.2 Ma en los campos volcánicos Santa Clara, Santa Rosalía y Jaraguay en Baja California, en este periodo ya se consideraba la extinción de la subducción de las microplacas de Farallón en la localidad y la diversidad magmática incluyendo a las adakititas jóvenes de 4 a 0.4 Ma ([Pallares et al., 2007](#); [Sosa-Ceballos et al., 2019](#)), han sido explicadas por dos caminos, el primero atribuido a la existencia de una ventana astenosférica propuesta por [Aguillón-Robles et al. \(2001\)](#) para el centro y sur de Baja California, por [Rogers et al. \(1985\)](#) para la parte norte y retomada por [Pallares, \(2007\)](#). El segundo camino es ligado a la ruptura del slab en subducción y de fragmentos que quedaron aislados y en proceso de fusión aun cuando el régimen tectónico ya era extensivo [Aguillón-Robles \(2002\)](#).

En el caso de la Sierra Los Mochos y Lomas de Arivaipa, de considerarse la presencia de un remanente de subducción, [Paulssen \(2017\)](#) muestra perfiles sísmicos con evidencia de la posibilidad de remanentes de slab para el área de estudio (zona del sismómetro 80; [Figura 46](#)). Si contrastamos la información con la ubicación del perfil 80 y la localización de las microplacas de Farallón, vemos la posible correspondencia con la microplaca Arguello ([Stock and Lee, 1994](#)).

Con anterioridad en las Lomas de Arivaipa y Cerro Buras, [Darin \(2011\)](#) identificó un magmatismo dacítico rico en líticos, el cual incluyó dentro de la secuencia del volcanismo pre-Rift asociado a la subducción de la placa Farallón debajo de la Norteamericana. Sin embargo, en este trabajo, con las relaciones petro-tectónicas encontradas, fue posible evidenciar que posterior a la etapa final del arco con la subducción de la microplaca Arguello, ocurrió magmatismo de afinidad adakítica en el rift Mioceno Medio-Tardío de la porción norte del Proto-Golfo de California, derivado posiblemente de una fuente mantélica metasomatizada heredada de la subducción anterior y/o de la fusión de la corteza inferior.

En relación con las etapas finales de la diversidad magmática que muestra la SLM y LA, se registró al magmatismo alcalino, el cual ya ha sido reconocido en varias localidades de Sonora

(Donnelly, 1974; Gastil y Krummenacher, 1977; Lynch, 1981; Paz-Moreno 1992; Paz-Moreno et al., 2003; Corella-Santa Cruz, 2017) y ha sido atribuido a un origen fisural con presencia de aparatos volcánicos (ej. Campo volcánico de Moctezuma).

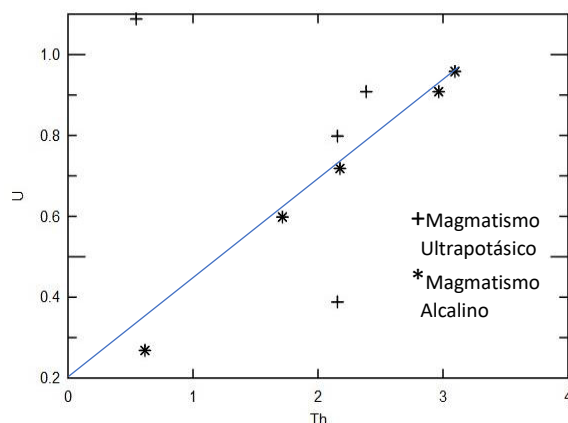


**Figura 46.** A) Mapa de ubicación de las principales microplacas de Farallón (modificado de Stock and Lee, 1994); B) Remanentes de subducción, tomados de Paulssen (2017).

Particularmente en la región de la SLM y Lomas de Arivaipa, Paz-Moreno (1992) había descrito para las inmediaciones de Puerto Libertad, a magmatismo de origen fisural para el sector de Pozo Coyote, donde Darin (2011), lo denominó Basalto Arivaipa en su correspondiente en la Sierra Bacha. Este basalto fue fechado con la técnica geocronológica K-

Ar en  $6.4 \pm 1.9\text{Ma}$  (Gastil y Krummenacher, 1977) y verificado en  $10.59 \pm 0.06\text{Ma}$  con la técnica geocronológica  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  (Darin, 2011). Cabe señalar que este último dato geocronológico es contemporáneo con la aparición de las adakitas sin-Rift, sumando esta información a la rápida emisión y evolución de la diversidad magmática en la Sierra Los Mochos y Lomas de Arivaipa. Por lo anterior, según la congruencia estratigráfica en el trabajo de campo, la edad más afín es la de  $6.4 \pm 1.9\text{Ma}$  (Gastil y Krummenacher, 1977).

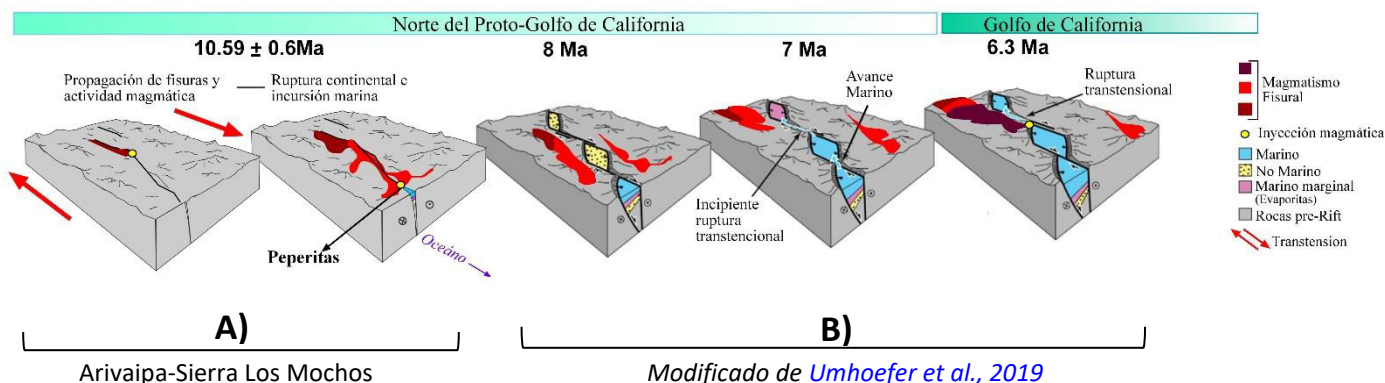
Utilizando los elementos hygromagmaphiles Th y U (Figura 47; Paz-Moreno, 1987), para los sitios con magmatismo Alcalino en la SLM y LA, vemos que se presenta una alineación que puede ser resultante de la relación genética y/o un proceso resultante de cristalización fraccionada. La relación Th/U para estas localidades oscila entre 2.25 y 3.35, siendo similar en valores entre los basaltos de Moctezuma, Sonora (2.89) y el Rift Afar en África (3.27), ambos emitidos en un ambiente extensivo intraplaca. Esta situación se dispersa en cuanto al magmatismo ultrapotásico se refiere (Figura 47) y es que puede existir una falta de lineación debido a que aunque estos magmas tienen una relación genética con el basalto de Arivaipa, tuvieron una interacción con sedimentos carbonatados, actualmente peperitas con sectores con microfósiles de bioclastos de braquiópodos y moluscos.



**Figura 47.** Diagrama de correlación entre elementos hygromagmaphiles Th y U, para determinación de relación entre productos magmáticos alcalinos (Treuil y Joron, 1975; Paz-Moreno, 1987).

Por otra parte, una propuesta sobre la evolución de las cuencas pull apart que involucra la presencia de sedimentos marinos, no marinos, carbonatados, es la que realizaron Umhoefer et al. (2018; Figura 48), para definir un periodo de evolución entre los 8 y 6 Ma para el Golfo de California (Figura 48B), donde también debiera de ejemplificarse el magmatismo asociado. Esta relación debe tener una mayor explicación hacia el interior del continente (Figura 48A), cuando aún no migraba el rift del Proto-Golfo de California al actual Golfo y donde seguramente

los basaltos alcalinos y las peperitas ultrapotásicas se generaron en un escenario fisural dentro o en el límite de la formación de una cuenca pull apart (actualmente fósil), que en la región es coincidente con la falla Amado-Libertad definida por [Gastil y Krummenacher \(1977\)](#).



**Figura 48.** Modelo de bloques modificado de [Umhoefer et al. \(2019\)](#): A) Propuesta de adecuación para la representación del inicio fisural del magmatismo alcalino en la SLM-LA; B) Bloques esquemáticos originales, donde se pretende ilustrar la evolución de cuencas pull apart con intervención marina. En nuestra propuesta se incluye el incorporar la presencia magmática.

Algo muy interesante sería el definir si el tipo de los sedimentos que están involucrados en las peperitas es si son marinos, lo cual permitiría hablar de una posible formación marina a los 10.5 Ma, de lo contrario, si son sedimentos de agua dulce, simplemente demostraría la incursión del magmatismo en un sector lacustre.

Sin lugar a duda, lo evidente en este registro es la existencia de una ruptura continental en la región norte del Proto-Golfo de California, la cual inició de manera simultánea con la inyección de magmas alcalinos poco diferenciados en cuencas con sedimentos carbonatados, lo cual pudo generar a las peperitas, que además presentan una naturaleza ultrapotásicas y son aquí reportadas por primera vez para el NW de México.

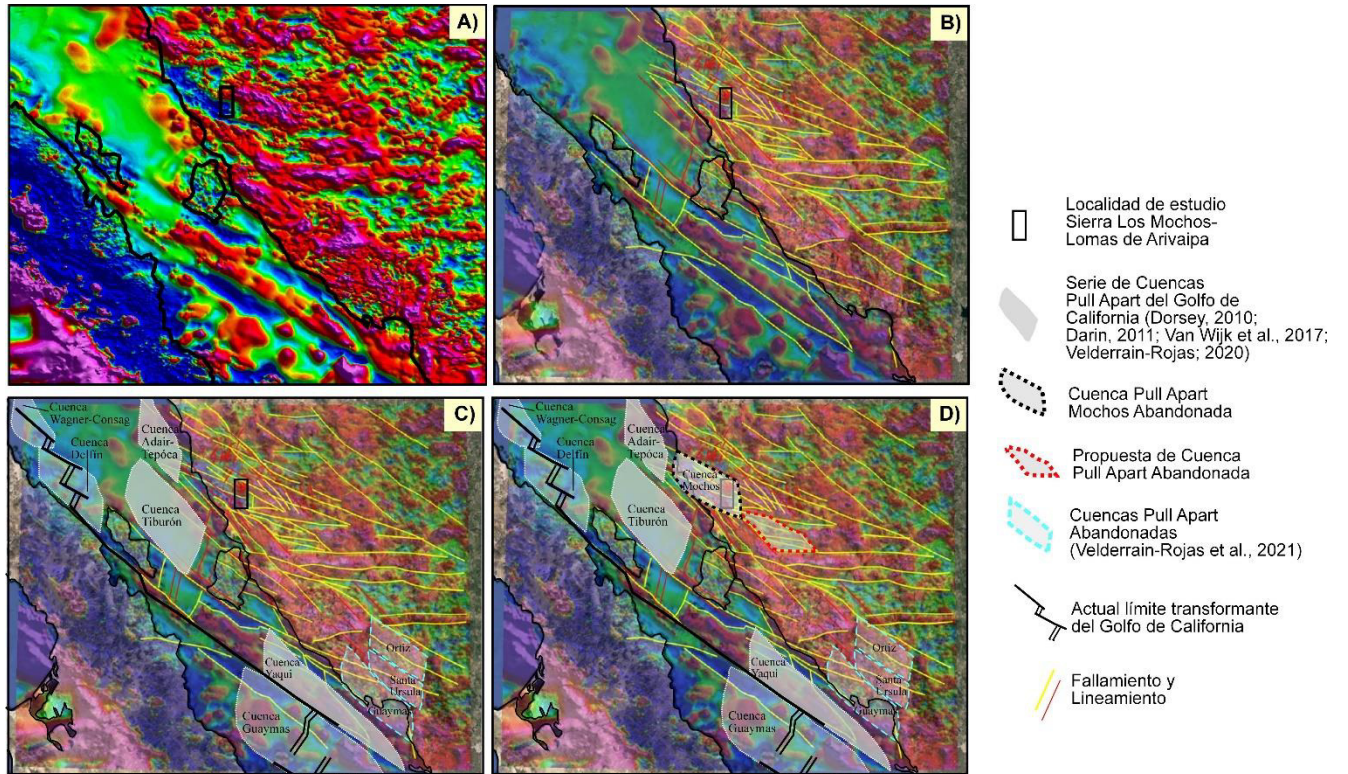
#### 4.2 Significado tectónico para el Norte del proto-Golfo de California

La evolución del límite PACNAM comienza con el desarrollo del Protogolfo de California desde el Mioceno medio e involucra un proceso de deformación transtensiva ([Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007](#); [Bennett et al., 2013, 2017](#); [Darin et al., 2016](#); [Velderrain-Rojas et al., 2021](#)), hasta establecer, en el Plioceno, la actual ubicación del límite PACNAM ([Wilson et al., 2005](#)). Este proceso de deformación llevó consigo el establecimiento

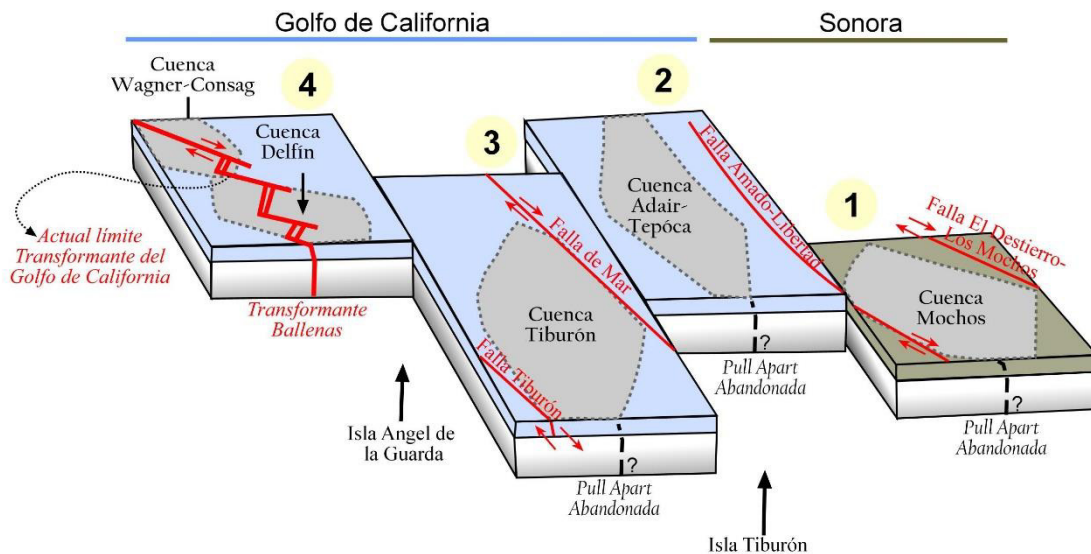
de cuencas pull apart en márgenes que han quedado abandonados en el tiempo, debido al establecimiento por medio de una migración de Este a Oeste, de un nuevo margen activo, que pone en manifiesto a nuevas cuencas activas como la Delfín, Wagner y Guaymas ([Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007](#); [Van Wijk et al., 2017](#)).

Para la porción centro-Sur de Sonora, específicamente en las regiones de San Carlos, Guaymas e Isla San Pedro Nolasco, [Velderrain Rojas \(2020\)](#) y [Velderrain-Rojas et al. \(2022\)](#), mencionan que ocurrió una etapa inicial de la deformación transtensional dextral ligada al rifting del Sur del Proto-Golfo de California en Sonora ([Wilson et al., 2005](#)), lo cual es equiparable con la hipótesis de una tectónica progresiva y localizada del modelo propuesto por [Bennett et al. \(2013\)](#) y [Darin et al. \(2016\)](#). En esa región, existen evidencias de una evolución a través de fallas de deslizamiento dextral, dejando cuencas Pull Apart abandonadas hasta llegar al sistema de fallas Pedro Nolasco ([Velderrain-Rojas et al., 2021](#)), deformación que ocurrió en un corto periodo entre 12 y 11 Ma aproximadamente.

Por su parte, conforme el límite de placas PACNAM evolucionaba, en la porción Norte del Proto-Golfo de California, un escenario equiparable al ocurrido en la región de Guaymas era puesto en evidencia, originándose en el margen continental la Cuenca Mochos y sus fallas transformantes, la cuenca Adair-Tepóca y sus fallas transformantes, para posteriormente desarrollar a la cuenca Tiburón y sus fallas transformantes, hasta la creación de las nuevas cuencas hoy activas Delfín y Wagner-Consag y las fallas transformantes en el límite activo de Ballenas ([Figuras 49 y 50](#)).



**Figura 49.** Modelo tectónico-estructural de las cuencas pull apart en el NW de México: A) Imagen compuesta de las cartas magnéticas de campo total escala regional (Geoinfomex, 2023), donde se reflejan los principales contrastes estructurales en el Golfo de California; B) Sobreposición de las principales fallas y lineaciones presentes en Sonora y en el Golfo de California; C) Sobreposición de la serie de cuencas pull-apart del Golfo de California y las identificadas en la porción continental del centro-sur del proto-Golfo de California, por Velderrain-Rojas et al., 2020); C) Propuesta de evolución de cuencas pull apart en la porción Norte del Proto-Golfo de California.



**Figura 50.** Bloques ilustrativos de la evolución de las cuencas pull apart en la porción Norte del Proto-Golfo de California hasta el actual límite en el Golfo de California. Los números del 1 al 4 significa el orden de evolución de las cuencas.



### 4.3 Conclusiones

El estudio geológico apoyado por el levantamiento en campo evidenció la mínima presencia de un magmatismo orogénico en la región de estudio, el cual solo fue reconocido, por un lado, en las rocas del basamento granítico del Cretácico Tardío tanto con rasgos calcoalcalinos como de afinidad adakítica. Por otro lado, al igual que en otras localidades de Sonora, se reconocieron miembros volcánicos adakíticos dentro de la sucesión sedimentaria tipo Báucarit. Aunado al magmatismo orogénico mencionado y como magmas pre-Rift, es reportado por primera vez para la porción costera de Sonora, dentro de la provincia Extensional del Golfo, a un magmatismo tipo Sierra Madre Occidental con yacimientos de perlita-obsidiana.

Con lo anterior, y más allá de la hipótesis que existía para trabajar en esta zona, pudo comprobarse que el dominio magmático en la Sierra Los Mochos y Lomas de Arivaipa es congruente con una diversidad de unidades magmáticas de rift, rasgos que solamente pueden ser corroborados con el apoyo de la geoquímica y la geocronología U-Pb en zircones. Lo anterior es debido a que las características mineralógicas de arco (Pl +Anf + Bta), también fueron reconocidas en las unidades magmáticas de rift, sin embargo, la geocronología ayudó a definir (edad U-Pb de  $10.46 \pm 0.19\text{Ma}$ ) a las rocas de naturaleza adakítica, como las más jóvenes de Sonora, y que han sido reportadas por primera vez dentro de un contexto de rift. Con lo anterior, fue posible reconocer que el magmatismo generado durante el periodo de rift muestra aun una firma de tipo arco como lo es la presencia de la clásica anomalía negativa de Nb/Ta. Considerando que además, para este efecto, existió posiblemente un remante de la microplaca Arguello que se quedó involucrado en esa herencia magmática.

De manera contemporánea, a los  $10.59 \pm 0.06\text{Ma}$ , ocurrió la influencia de magmatismo fisural alcalino con la presencia de peperitas ultrapotásicas con bioclastos de braquiópodos y moluscos, lo que puede hablar de un afluyente lacustre o posiblemente marino en este contexto extensivo, estos organismos permitirían elucidar en una posible incursión marina temprana.

Posterior al cesé de los eventos magmáticos, con la definición de una cuenca pull apart y de las estructuras maestras correspondientes a fallas laterales regionales dextrales, como la Falla Amado-Libertad y la Falla El Destierro-Los Mochos, la SLM sufrió una importante deformación, dividiéndose en dos bloques, mismos que a su vez fueron divididos por la Falla Mochos en los bloques Norte y Sur.

Finalmente, con esta investigación científica, es posible proponer que el origen del frecuente magmatismo de rift y su fallamiento, son asociados a una etapa inicial de extensión oblicua en el Norte del Protogolfo de California provocada por la evolución del límite de placas PAC-NAM. Este escenario en la región inició poco antes de los ~11.3 Ma y culminó a los ~10.4 Ma, produciendo en tan solo 1 Ma una diversidad de orígenes magmáticos (posiblemente con asociación a una ventana astenosférica), en una zona pull apart, que abortó para dar paso a la construcción de nuevas cuencas extensivas de tipo pull apart, primeramente, la cuenca Mochos en continente, posteriormente en el golfo de California. La cuenta Adair-Tepóca, posteriormente la cuenca Tiburón, y finalmente, la construcción del actual límite transformante en la cuenca Delfín.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Aragón-Arreola, M. and Martín-Barajas, A., 2007.** Westward migration of extension in the northern Gulf of California, México. *Geology*, 35-6, 571-574.
- Aguillón-Robles, A., 2002.** Subduction de dorsale et évolution du magmatisme associé: exemple de la Basse Californie (Mexique) du Miocène au Quaternaire. These de doctorat de L'Universite de Bretagne Occidentale, 214 p.
- Aguillón-Robles, A., Calmus, T., Benoit, M., Bellon, H., Maury, R.C., Cotton, J., 2001.** Late Miocene adakites and Nb-enriched basalts from Vizcaino peninsula, Mexico: indicators of east pacific rise subduction below southern Baja California? *Geology* 29 (6), 531–534.
- Ballard, J. R., Palin, M. J., and Campbell, I. H., 2002.** Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144 (3), 347–364. doi:10.1007/s00410-002-0402-5.
- Barrera-Guerrero, S., 2012.** Contribución al estudio del evento volcánico hiperalcalino del Mioceno Medio en el NW de México: Petrología de la Sierra Libre, Sonora. Tesis de Maestría en Ciencias Geología, Universidad de Sonora, 113 p.
- Barrera-Guerrero, S., Vidal-Solano, J. R., 2010.** Nuevas evidencias del volcanismo anorogénico del Mioceno medio en el NW de México: Diversidad volcánica del evento hiperalcalino en la Sierra Libre. XX Congreso Nacional de Geoquímica, Temixco, Morelos, 16 (1) 15 p.
- Barrón Díaz, A. J., Gómez-Valencia, A. M., Espinoza-Encinas, I. R., Lozano-Santa Cruz, R., e Iriondo, A., 2021.** Geocronología y petrogénesis de los granitoides de la región de Puerto Libertad, Sonora. Convención Geológica Nacional 2021 de la Sociedad Geológica Mexicana.
- Bennett, S.E.K., 2009.** Transtensional Rifting in the Late Proto-Gulf of California Near Bahía Kino, Sonora, México [M.S. thesis] University of North Carolina, Chapel Hill, 122 p.
- Bennett, S.E.K., Oskin, M.E., 2014.** Oblique rifting ruptures continents: Example from the Gulf of California shear zone. *Geology* 42, 215–218. <https://doi.org/10.1130/G34904.1>

- Bennett, S.E.K., Oskin, M.E., Iriondo, A., 2013.** Transtensional rifting in the proto-Gulf of California near Bahía Kino, Sonora, México. *Bulletin Geological Society. America* 125, 1752–1782. <https://doi.org/10.1130/B30676.1>
- Bennett, S.E.K., Oskin, M.E., Iriondo, A., Kunk, M.J., 2016.** Slip history of the La Cruz fault: Development of a late Miocene transform in response to increased rift obliquity in the northern Gulf of California. *Tectonophysics* 693, pp 409–435. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.06.013>
- Bennett, S.E.K., Oskin, M.E., Iriondo, A., 2017.** Latest Miocene transtensional rifting of northeast Isla Tiburón, eastern margin of the Gulf of California. *Tectonophysics* 719 720, 86–106. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.05.030>
- Bonini A. J., Baldwin S. L., 1998.** Mesozoic metamorphic and middle to late Tertiary magmatic events on Magdalena and Santa Margarita Islands, Baja California Sur, Mexico: Implications for the tectonic evolution of the Baja California continental borderland, *Geological Society of America Bulletin*, 110, 1094-1104.
- Bryan, S. E., Orozco-Esquivel, T., Ferrari, L., Lopez-Martinez, M., 2014.** Pulling apart the mid to late Cenozoic magmatic record of the Gulf of California: Is there a Comondú arc?. *Geological Society, London, Special Publications*, 385(1), 389-407.
- Calmus, T., Pallares, C., Maury, R.C., Bellon, H., Pérez-Segura, E., Aguilón-Robles, A., Carreño, 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., Niemeyer, S., Gunn, S., 1989.** Southern Cordilleran basaltic andesite suite, southern Chihuahua, Mexico: A link between tertiary continental arc and Floyd basalt magmatism in *Northern American Journal Geophys. Res.*, 94, 7817-7840.
- Campos-Enríquez, J. O., Espinosa-Cardena, J. M., Oksum, E., 2019.** Subduction control on the curie isotherm around the Pacific-North America plate boundary in northwestern Mexico (Gulf of California). Preliminary results. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 375, 1-17.

- Carr, M. J., Gazel, E., 2017.** Iqpet software for modeling igneous processes: examples of application using the open educational version. *Mineralogy and Petrology*, 111, 283-289.
- Castillo, P.R., 2006.** An overview of adakite petrogenesis. *Chinese Science Bulletin* 51, 257–268. <https://doi.org/10.1007/s11434-006-0257-7>.
- Cochemé, J. J., 1981.** Mise en évidence d'un granite subvolcanique associé aux laves tertiaires du Sonora (Mexique) :Comptes Rendus del'Académie des Sciences (Paris), 293, 989-99.
- Cochemé, J. J., 1985.** Le magmatisme cenozoïque dans le nord-ouest du Mexique: cartographie de la région de Yecora-Maicoba-Mulatos: illustration magmatique de la fin d'un régime en subduction et du passage à un régime distensif (Doctoral dissertation, Université de droit, d'économie et des sciences d'Aix-Marseille, 209 p.
- Cochemé, J-J., Münch, P., Douglas-Robinson, L.A., 1994.** Zeolitization Processes in Basic Lavas of the Baucarit Formation, Northwestern Mexico. *Revista Geológica de Chile*. 21 (2), 218-231.
- Cochemé, J. J., Lassauvagerie, A. C., González-Sandoval, J., Pérez-Segura, E., Münch, P., 1996.** Characterisation and potential economic interest of authigenic zeolites in continental sediments from NW Mexico. *Mineralium Deposita*, 31, 482-49.
- Conly, A. G., Brenan, J. M., Bellon, H., Scott, S. D., 2005.** Arc to rift transitional volcanism in the Santa Rosalía Region, Baja California Sur, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 142, 303-34.
- Corella-Santa Cruz, C. R., 2017.** Petrogénesis del volcanismo alcalino máfico mioceno tardío-plioceno del campo basáltico San Francisco de Batuc, Sonora Central, México. Tesis de Maestría, Universidad de Sonora, 111 p.
- Cox, K.G., Bell, J.D., Pankhurst, R.J., 1979.** *The Interpretation of Igneous Rocks* George Allen & Unwin, London, 445 p.
- Damon, P.E., Shafiqullah, M., Roldán-Quintana, J., Cochemé, J.J., 1983.** El batolito Laramide (90–40 Ma) de Sonora, pap. In: *Memorias de la XV Convención Nacional de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México*, Guadalajara, Jalisco, 63–95.

- Darin, M. H., 2011.** Late Miocene extensional deformation in the Sierra Bacha, Coastal Sonora, Mexico: Implications for the kinematic evolution of the Proto-Gulf of California. Masters Thesis Department of Geological Sciences of the University of Oregon, 95 p.
- Darin, M.H., Dorsey, R.J., Bennett, S.E.K., Oskin, M.E., Iriondo, A., Kunk, M.J., 2016.** Late Miocene extension in coastal Sonora, Mexico: implications for the evolution of dextral shear in the proto-Gulf of California oblique rift. *Tectonophysics* 693, 378–408. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.04.038>.
- Davis, G.H., Reynolds, S.J., 1996.** *Structural Geology of Rocks and Regions* (2<sup>nd</sup> Edition): New York, John Wiley and Sons, Inc., 776 p.
- De la O-Villanueva, M., 1993.** Sedimentología y Petrografía de la Formación Báucarit (Mioceno) en la cuenca de Tonichi-La Dura, Sonora, México. Tesis de Maestría, Departamento de Geología, Universidad de Sonora, 63 p.
- Defant, M.J., Drummond, M.S., 1990.** A model for trondhjemite–tonalite–dacite genesis and crustal growth via slab melting, archaic to modern comparisons. *Journal of Geophysical Research*, 95 (21), 503–52. <https://doi.org/10.1029/JB095iB13p21503>.
- Defant, M.J., Drummond, M.S., 1993.** Mount St. Helens: Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc. *Geology*, 21 (6), 547–55. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021<0547:MSHPEO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021<0547:MSHPEO>2.3.CO;2).
- Demant, A., Cochemé, J. J., Delpretti, P., Piguet, P., 1989.** Geología y petrología de las rocas volcánicas terciarias del noroeste de la Sierra Madre Occidental, México. *Bulletin de la Société géologique de France* , 8 (5), 737-74.
- Demant, A., 2005.** Ignimbrites: stratigraphic marker and record of the magmatic and tectonic evolution: *Comptes Rendus Geoscience*, 337, 1301-130.
- Donnelly, M. F., 1974.** Geology of the Sierra del Pinacate Volcanic field, Northern Sonora, Mexico, and Southern Arizona, USA Stanford University, #75-6838.
- Dumble, 1899.** Notes on the geology of Sonora. Mexico: Transactions of the Society of Mining Engineers of American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 29, 122-152.
- Fragoso-Irino, A., Lazcano, J., Molina Garza, R.S., Iriondo, A., 2021.** Estimación gravimétrica del grosor cortical en el Golfo de California. *Bol. Soc. Geol. Mex.* pp. 73 (1), A270820 <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2021v73n1a270820>.

- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M. Bryan, S. E., 2007.** Magmatism and tectonics of the Sierra Madre Occidental and their relation to the evolution of the western margin of North America. Geological Society of America, Special Papers 442, pp 1-39.
- Foley, S., 1992.** Vein-plus-wall-rock melting mechanisms in the lithosphere and the origin of potassic alkaline magmas. *Lithos*, 28(3-6), 435-453.
- Foley, S., Venturelli, G., Green, D. H., & Toscani, L., 1987.** The ultrapotassic rocks: characteristics, classification, and constraints for petrogenetic models. *Earth-Science Reviews*, 24(2), 81-134.
- García-Martínez, D., Molina-Garza, R.S., Roldán Quintana, J., Mendívil-Quijada, H., 2014.** Ca. 13 Ma strike-slip deformation in coastal Sonora from a large-scale, en-echelon, brittle-ductile, dextral shear indicator: implications for the evolution of the California rift. *Geofísica Internacional* 53 (4), pp 435–456.
- García-Huerta, J.A., 2015.** Geología del cerro Libertad en la región Puerto Libertad: contribución al estudio petrológico del magmatismo orogénico en Sonora, México. Tesis de Licenciatura en Geología, Departamento de Geología, Universidad de Sonora, 88 p.
- Gastil, R. G., Lemone, D. V., & Stewart, W. J. 1973.** Permian fusulinids from near San Felipe, Baja California. *AAPG Bulletin*, 57(4), 746-747.
- Gastil, R.G., Krummenacher, D., 1976.** Reconnaissance geologic map of coastal Sonora between Puerto Lobos and Bahía Kino. Geological Society of America Map and Chart Series MC-16, scale 1:150,000, 1 sheet.
- Gastil, R.G., and Krummenacher, D., 1977.** Reconnaissance geology of coastal Sonora between Puerto Lobos and Bahía Kino. *Geological Society of America Bulletin*, 88 (2), 189–198. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1977\)88<189:RGOCSB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1977)88<189:RGOCSB>2.0.CO;2).
- Geoinfomex, 2023.** Cartas magnéticas, consultadas en marzo de 2023. <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/>.
- Gómez-Valencia, A.M., 2011.** Petrografía y geoquímica del volcanismo Oligoceno-Mioceno medio en Rayón, Sonora: Énfasis en el estudio y significado del volcanismo híperalcalismo en la región. Tesis de Licenciatura. Departamento de Geología, Universidad de Sonora, 143 p.
- 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. Tesis de Maestría, Departamento de Geología, Universidad de Sonora, 274 p.

**Gómez-Valencia, A.M., Vidal-Solano J. R., García y Barragán J. C., Vega-Granillo, R., Lozano-Santacruz R., Gimeno-Torrente D., 2015.** Avances en la cartografía y la petrología del magmatismo neógeno de la Sierra Los Mochos-Mesa de Arivaipa en la región de Puerto Libertad, Sonora, México. Reunión Anual Unión Geofísica Mexicana, A. C. Presentado en la ciudad de Puerto Vallarta, Jalisco, México del 2 al 6 de noviembre del 2015. **Poster y resumen** publicado en <http://www.ugm.org.mx/raugm/>.

**Gómez-Valencia, A.M., Vidal-Solano, J.R., López-Martínez, M., Vega-Granillo, R., Pallares, C., 2015.** Petrografía, geoquímica y geocronología del magmatismo orogénico en Rayón: Características petrológicas de los últimos magmas asociados a la subducción en Sonora, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32 (2), 219–238.

**Gómez-Valencia, A. M., Vidal-Solano, J. R., Stock, J. M., Vega-Granillo, R., Lozano-SantaCruz, R., López-Martínez, M., 2019.** Volcanismo Mioceno medio de afinidad adakítica en la Sierra Picú, Sonora, México: expresión magmática de la subducción de alguna microplaca de farallón? XXIX Congreso Nacional de Geoquímica.

**Gómez-Valencia, A.M., Vidal-Solano, J. R., Gimeno-Torrente, D., Lozano-Santacruz, R., 2021.** Petrogénesis del magmatismo adakítico synrift del Mioceno Tardío de la Sierra Los Mochos y Lomas de Arivaipa, Sonora, México. XXXI Congreso Nacional de Geoquímica.

**Gómez-Valencia, A. M., Barrón-Díaz, A. J., Espinoza-Encinas, I. R., Lozano-Santa Cruz, R., Iriondo, A., Paz-Moreno, F. A., Vidal-Solano, J. R., 2022.** Petrogenesis and geodynamic implications of the Late Cretaceous granitoids in Puerto Libertad, Sonora, México: Insights into geochemical signatures of adakites, adakitic affinity and calc-alkaline rocks in NW Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 119 pp. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103996>.

**González-Sandoval, J. R. 1987.** Geología del Depósito “El Cajón”, municipio de Rayón, Sonora. II Conferencia Nacional sobre Zeolitas, Hermosillo, Son., Secretaría de Fomento Industrial y Comercio, Resumen de ponencias.



- Guzmán-Espinoza, J. B., Vega-Castillo, M. J., 2022.** Carta Geológico-Minera escala 1:50,000 “Los Mochos H12-C16” Edición agosto de 2022, [https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas\\_Online/geologia/213\\_H12-C16\\_GM.pdf](https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/213_H12-C16_GM.pdf).
- Herrera-Acosta, G. I., Gómez-Valencia, A. M., Vidal-Solano, J. R., González-Grijalva, B., 2022.** FRX y petrografía de una nueva pieza del rompecabezas de la Megaerupción de la Ignimbrita de Hermosillo/Toba de San Felipe: Afloramiento de Félix Gómez, Sonora, México. XXV Reunión Universitaria de Investigación en Materiales RUIM 2022.
- Hinojosa-Prieto, H.R., Vidal-Solano, J.R., Kibler, K.W., Hinojosa-García, H. J., 2016.** Geología del depósito de perlita Selene en el norte de la Sierra Madre Occidental, noreste de Sonora, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 68 (1), 129-163.
- Irvine, T.N., Baragar, W.R.A., 1971.** A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Science, 8, 523–548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>.
- King, R.E., 1939.** Geological reconnaissance in Northern Sierra Madre Occidental Geological Society of America Bulletin, 50, 1625-172.
- 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., and Woolley., A., 2002.** Igneous rocks: IUGS classification and glossary: Recommendation of the International Union of Geological Science, subcommission on the systematic of Igneous Rocks-R.W. Le Maitre (editor), 2nd ed., 236 p.
- Lozano-Santa Cruz, R., Bernal, J.P., 2005.** Composición química, clasificación y caracterización de los minerales del grupo de las cloritas. Boletín de Mineralogía, 16 (1), 1–20.
- Lynch, D.J., 1981.** Genesis and petrology alkaline volcanism in the Pinacate volcanic field northwestern Sonora, Mexico: Tucson Arizona, University Arizona, Ph.D. Thesis, 251 p.

- MacDonald D. R., 1974.** Nomenclature and geochemistry of the peralkaline oversaturated extrusive rocks. In Bailey D.K., Barberi F., Macdonald R. (Eds.), Oversaturated peralkaline volcanic rocks. Bulletin Volcanologique, 38, 498-516.
- Maniar, P.D., Piccoli, P.M., 1989.** Tectonic discrimination of granitoids. Geological Society America Bulletin 101, 635–643.
- McDowell F. W. Clabaugh S. E., 1979.** Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western Mexico. In C. E. Chapin & W. E. Elston (Eds), Ash-flow tuffs. Geological Society American Special Paper 180, 113-124.
- McDowell, F. W., Roldán-Quintana J., Amaya-Martínez, R., 1997.** Interrelationship of sedimentary and volcanic deposits associated with Tertiary extension in Sonora, Mexico. The Geological Society of America, Bulletin 109 (10), 1349-136.
- Mitchell, R. H., Bergman, S. C. 1991.** Petrology of lamproites. Springer Science & Business Media.
- Miyashiro, A., 1974.** Volcanic rock series in island arc and active continental margins. American Journal of Science, 274, 321-355.
- Mora-Alvarez, G., McDowell, F.W., 2000.** Miocene volcanism during late subduction and early rifting in the Sierra Santa Ursula of western Sonora, México. In: Delgado Granados, H., Aguirre-Díaz, G., Stock, J.M. (Eds.), Cenozoic Tectonics and Volcanism of México: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper. 334, 123–141.
- Mora-Klepeis, G., McDowell, F., 2004.** Late Miocene calc-alkalic volcanism in northwestern México: an expression of rift or subduction-related magmatism?: Journal of South American Earth Sciences 17, 297-310.
- Morales-Morales, H., Hernández-Rábago, P.Y., 2006.** Informe de la carta geológico-minera Carta El Caracol H12A85 escala 1:50000. Servicio Geológico Mexicano, 75 p.
- 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. Tesis de Doctor en Ciencias, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille, 224 p.
- Olguín-Villa, A. E., 2010.** Estudio Físico y químico del volcanismo hipercalcico en la región de Cataviña, Baja California: Tesis de Licenciatura, Universidad de Sonora, 84 p.

- Olguín-Villa, A. E., 2013.** Establecimiento de la estratigrafía magnética del evento volcánico hiperalcalino del Mioceno Medio en la Sierra Libre, Sonora, México., Tesis de Maestría en Ciencias Geología, Departamento de Geología, Universidad de Sonora, 68 p.
- Olguín-Villa, A. E., Vidal-Solano, J. R., & Stock, J. M., 2013.** Petrografía, geoquímica, petrofábrica y paleomagnetismo de la Toba de San Felipe en la región de Cataviñá, Baja California, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 30(2), 282-298.
- Orozco-Garza, A., Dostal, J., Keppie, J.D., Paz-Moreno, F.A., 2013.** Mid-Tertiary (25-21Ma) lamprophyres in NW Mexico derived from subduction.modified subcontinental lithospheric mantle in an extensional backarc environment following steepening of the Benioff zone. *Tectonophysics*, 590, 59-71.
- Oskin, M. E., Stock, J., Martín-Barajas, A., 2001.** Rapid localization of Pacific-North America plate motion in the Gulf of California. *Geology* 29, 459–462 p. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0459:RLOPNA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0459:RLOPNA>2.0.CO;2)
- Oskin, M. E., 2002.** Tectonic evolution of the Northern Gulf of California, México, deduced from conjugate rifted margins of the upper Delfín Basin. Ph. D. thesis, California Institute of Technology, Pasadena, 487 p.
- Oyarzun, R., Márquez, A., Lillo, J., López, I., and Rivera, S., 2001.** Giant versus small porphyry copper deposits of cenozoic age in northern Chile: Adakitic versus normal calc-alkaline magmatism: *Mineralium Deposita*, 36 (8), 794–798. doi:10.1007/s001260100205.
- Pallares, C., 2007.** Diversité du volcanisme miocène á quaternaire postsubduction de la péninsule de Basse Californie et du Golfe de Californie (Mexique) : role de la déchirure de la plaque Farallon: Universidad de Bretagne Occidentale, tesis doctoral, 211 p.
- Pallares, C., Maury, R.C., Bellon, H., Royer, J-Y., Calmus, T., Aguilón-Robles, A., Cotten, J., Benoit, M., Michaud, F., Bourgois, J. 2007.** Slab-tearing following ridge trench collision: Evidence from Miocene volcanism in Baja California, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 161, 95-117.
- Pallares, C., Bellon, H., Benoit, M., Maury, R. C., Aguilón-Robles, A., Calmus, T., Cotten, J., 2008.** Temporal geochemical evolution of Neogene volcanism in northern Baja California (27°-30°N): insights on the origin of post-subduction magnesian andesites. *Lithos*, 105, 162-180.

- Palomino-Medina, L.A., Vidal-Solano J.R., 2009.** Hallazgo de nuevos afloramientos para el volcanismo explosivo hiperalcalino del Mioceno Medio: Cartografía de la región de San José de Batúc, Sonora, México: Libro de Resúmenes del 1er Seminario de Geología y Astronomía Dr. Guillermo Armando Salas Pizá, Hermosillo, Sonora, México. 1, 97-105 p.
- Paulssen, H., & de Vos, D., 2017.** Slab remnants beneath the Baja California peninsula: Seismic constraints and tectonic implications. *Tectonophysics*, 719, 27-36.
- Paz-Moreno, F., 1987.** Geología de los Campos Basálticos de Moctezuma y Huepari Sonora Central. Tesis de Licenciatura en Geología del Departamento de Geología, Universidad de Sonora, 57 p.
- Paz-Moreno, F.A., 1992.** Le volcanisme mio-plio-quadernaire de l'Etat du Sonora (nord-ouest du Mexique): évolution spatiale et chronologique; implications pétrogénétiques. Tesis de doctorado, Universidad Aix-Marseille III, 220 p.
- Paz-Moreno, F.A., Demant A., Ornelas-Solis, R.E., 2000.** Las ignimbritas hiperalcalinas neógenas de la región de Hermosillo, Sonora, México: mineralogía y geoquímica. IV Reunión sobre la geología del noroeste de México y áreas adyacentes, 90-91 .
- Paz-Moreno, F. A., Demant, A., Cochemé, J. J., Dostal, J., & Montigny, R., 2003.** The Quaternary Moctezuma volcanic field: a tholeiitic to alkali basaltic episode in the central Sonoran Basin and Range Province, México. *Geological Society of America, Special Paper (374)*, 439-455.
- Paz-Moreno, F., Demant, A., Ortega-Rivera, A., 2004.** El volcanismo alcalino sódico del Pleistoceno Inferior en el Campo Volcánico El Pinacate, Sonora, México: una serie de diferenciación continua de basalto a traquita, en IV Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra.
- Pearce, J. A., Harris, N. B., Tindle, A. G., 1984.** Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4), 956-983 p. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>.
- Pearce, J.A., 1983.** Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins, in 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 Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58, pp 63–81. <https://doi.org/10.1007/BF00384745>.
- Pérez-Aguilar, L., 2019.** Evolución tectono-magmática en la región sur de la Sierra Libre, Sonora, México, y su relación con el Proto-Golfo de California durante el Mioceno Medio-Tardío. Tesis Maestría en Ciencias Geológicas de la Universidad de Sonora. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- 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.
- Piña-Páez, L. A. 2020.** Nuevas evidencias petrotectónicas en el área de Los Algodones, San Carlos, Sonora, México: énfasis en los vestigios volcánicos miocénicos relacionados al Protogolfo de California. Tesis de Licenciatura en Geología, Universidad de Sonora, 77 p.
- Radelli, L., 1989.** The Baucarit Problem. *Universidad de Sonora, Boletín del Departamento de Geología*, 6 (1 y 2), 55-57.
- Ramos-Velásquez, E., Calmus, T., Valencia, V., Iriondo, A., Valencia-Moreno, M., Bellon, H., 2008.** U–Pb and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of the coastal Sonora batholith: New insights on Laramide continental arc magmatism. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 25 (2), 314–333.
- 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.
- Roldán-Quintana, J., Mora-Klepeis, G., Calmus, T., Valencia-Moreno, M., Lozano-Santacruz, R., 2004.** El graben de Empalme, Sonora, México: Magmatismo y tectónica extensional asociados a la ruptura inicial del Golfo de California. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 21, 320–334.
- Roldán-Quintana, J., McDowell, F.W., Delgado-Granados, H., Valencia-Moreno, M., 2009.** East-west variations in age, chemical and isotopic composition of the Laramide batholith in southern Sonora, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 26, 543–563.

- Sajona, F. G., and Maury, R. C., 1998.** Association of adakites with gold and copper mineralization in the Philippines: Comptes rendus de l'Académie des sciences - series IIA: Earth and Planetary Science, v. 326, no. 1, p. 27–34.
- Seiler, C., Fletcher, J. M., Kohn, B. P., Gleadow, A. J.W., and Raza, A., 2011.** Low-temperature thermochronology of northern Baja California, Mexico: Decoupled slip-exhumation gradients and delayed onset of oblique rifting across the Gulf of California: Tectonics, v. 30, no. 3, TC3004.
- Chapman, J. B., Ducea, M. N., DeCelles, P. G., Profeta, L. 2015.** Tracking changes in crustal thickness during orogenic evolution with Sr/Y: An example from the North American Cordillera. Geology, 43(10), 919-922.
- Skilling, I. P., White, J. D., McPhie, J., 2002.** Peperite: a review of magma–sediment mingling. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 114(1-2), 1-17 p.
- Solari, L. A., Gómez-Tuena, A., Bernal, J. P., Pérez-Arvizu, O., Tanner, M., 2010.** U-Pb zircon geochronology with an integrated LA-ICP-MS microanalytical workstation: Achievements in precision and accuracy. Geostandards and Geoanalytical Research, 34(1), 5-18.
- Sosa-Ceballos, G., Macías, J. L., Avellán, D. R., Arce, J. L., Saucedo, R., Boijseauneau-López, M., García-Sánchez, L., Reyes-Agustín, G., Osorio-Ocampo, S., 2019.** Genesis of magmas from the Tres Vírgenes Volcanic Complex, Baja California Sur, Mexico. Lithos, 350-351. doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105240.
- Soto, D., Alvarado, G. E., 2012.** Peperitas en Costa Rica. Revista Geológica de América Central, (47), 55-68.
- Stock, J.M., Hodges, V.K., 1989.** Pre-Pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific Plate. Tectonics 8, 99–115 p. <https://doi.org/10.1029/TC008i001p00099>.
- Stock, J. M., Lee, J. 1994.** Do microplates in subduction zones leave a geological record?. Tectonics, 13(6), 1472-1487.
- Stock, J.M., Lewis, C.J., Nagy, E.A., 1999.** The tuff of San Felipe: an extensive middle Miocene pyroclastic flow deposit in Baja California, Mexico. Journal Volcanology Geothermal Researches, 93, 53 -74.

- Streckeisen, A.L., Le Maitre, R.W., 1979.** Chemical approximation to modal QAPF classification of the igneous rocks. *Neus Jahrbuch fur Mineralogie* 136, 169–206.
- Sun, S., McDonough, W.F., 1989.** Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes: in Sauders, A.D., Norry, M.J. (Eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Paper, 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>.
- Sun, W.D., Zhang, H., Ling, M.X., Ding, X., Chung, S.L., Zhou, J., Yang, X.Y., Fan, W., 2011.** The genetic association of adakites and Cu–Au ore deposits: *International Geology Review*, 53 (5–6), 691–703. doi:10.1080/00206814.2010.507362.
- Sun, W. D., Wang, J. T., Zhang, L. P., Zhang, C. C., Li, H., Ling, M. X., Ding, X., Li, C. Y., and Liang, H. Y., 2017.** The formation of porphyry copper deposits: *Acta Geochimica*, 36, (1) 9–15. doi:10.1007/s11631-016-0132-4.
- Till, C.B., Gans, P.B., Spera, F.J., MacMillan, I., Blair, K.D., 2009.** Perils of petrotectonic modeling: A view from southern Sonora, Mexico. *Journal Volcanology Geothermal Researches*. 186 p. 160–168 p. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.06.014>
- Treuil, M., Joron, J. L., 1975.** Utilisation des éléments hygromagmaphiles pour la simplification de la modélisation quantitative des processus magmatiques. Exemples de l’afar et de la Dorsale Médioatlantique. *Societa Italiana Mineralogia e Petrologia – Milano*, vol. XXXI (1), 125-174.
- Umhoefer, P. J., Darin, M. H., Bennett, S. E., Skinner, L. A., Dorsey, R. J., Oskin, M. E., 2018.** Breaching of strike-slip faults and successive flooding of pull-apart basins to form the Gulf of California seaway from ca. 8–6 Ma. *Geology*, 46(8), 695-698. <https://doi.org/10.1130/G40242.1>.
- Umhoefer, P. J., Dorsey, R. J., Willsey, S., Mayer, L., & Renne, P. 2001.** Stratigraphy and geochronology of the Comondu Group near Loreto, Baja California Sur, Mexico. *Sedimentary Geology*, 144(1-2), 125-147.
- Valencia-Moreno, M., Ruiz, J., Barton, D.M., Patchett, P.J., Zurcher, L., Hodkinson, D.G., Roldán-Quintana, J., 2001.** A chemical and isotopic study of the Laramide granitic belt of northwestern Mexico: Identification of the southern edge of the North America

Precambrian basement. Geological Society of America Bulletin, 113 (11), 1409–1422.  
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2001\)113<1409:ACAISO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2001)113<1409:ACAISO>2.0.CO;2).

**Valencia-Moreno, M., Iriondo, A., González-León, C., 2006.** Temporal constraints on the eastward migration of the Late Cretaceous-Early Tertiary magmatic arc of NW Mexico based on new  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  hornblende geochronology of granitic rocks. Journal of South American Earth Sciences, 22 (1–2), pp 22–38.  
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.08.006>.

**Valencia-Moreno, M., López-Martínez, M., Orozco-Esquivel, T., Ferrari, L., Calmus, T., Noury, M., Mendivil-Quijada, H., 2021.** The Cretaceous-Eocene Mexican Magmatic Arc: conceptual framework from geochemical and geochronological data of plutonic rocks. Earth Sciences Review 220, 103721 <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103721>.

**Van Wijk, J., Axen, G., Abera, R., 2017.** Initiation, evolution and extinction of pull-apart basins: Implications for opening of the Gulf of California. Tectonophysics 719–720, 37–50 p. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.04.019>

**Vega-Granillo, R., 1996.** La Sierra de Mazatán, Sonora, México: geología y análisis estructural de un complejo metamórfico en la parte sur de la provincia de “Basin and Range”. Tesis de Maestría, Departamento de Geología, Universidad de Sonora, 116 p.

**Vega-Granillo, R., Vázquez-Armenta, V. H., Orozco-Garza, A., Vidal-Solano, J. R., 2015.** Structural analysis of the La Colorada Mine, Sonora, Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 32(2), 239-253.

**Velderrain-Rojas, L.A., 2014.** Contribución al estudio de los eventos volcánicos del Mioceno en la Sierra El Aguaje, porción Costera de Sonora, México. Tesis de Licenciatura en Geología, Universidad de Sonora.

**Velderrain-Rojas, L.A., 2016.** Evolución tectono-magmática en la región de Guaymas, Sonora, México: Relación geodinámica con el Proto-Golfo de California [M.S. Thesis]. Universidad de Sonora, México, 148 p.

**Velderrain Rojas, L.A., Vidal Solano, J.R., Alva Valdivia, L.M., 2018.** Intrusive Igneous Bodies Related To the Middle-Late Miocene Oblique Rift in Sonora, Mexico. Geological Society America Abstracts with Programs. 50, 25–26.  
<https://doi.org/10.1130/abs/2018rm-314399>.



- Velderrain-Rojas, L. A., 2021.** Los microgranitos del Mioceno tardío en el dominio costero sur de Sonora, México: significado geodinámico e implicaciones petro-tectónicas relacionadas con la apertura del Golfo de California. Tesis de Doctorado, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Hermosillo, México, 190 p.
- Velderrain-Rojas, L.A., Vidal-Solano, J.R., Alva-Valdivia, L.M., Vega-Granillo, R., 2021.** Late Miocene silicic subvolcanic plumbing system related to oblique rifting in the Pacific-North American plate boundary, Sonora, Mexico: Geodynamic implication in a regional context. *International Geology Review* 64(6), 743-769. <https://doi.org/10.1080/00206814.2021.1878396>.
- Velderrain-Rojas, L.A., Vidal-Solano, J.R., Alva-Valdivia, L.M., Vega-Granillo, R., López-Martínez, M., 2022.** Isla San Pedro Nolasco as a Late Miocene intrusive record at the eastern margin of the Gulf of California: Insights from geological, geochemical and geochronological studies. *Geoscience Frontiers*, 13 (3), 101351. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2022.101351>.
- Vidal-Solano, J. R., 2005.** Le volcanisme hyperalcalin d'âge Miocene Moyen du Nord-Ouest du Mexique (Sonora): Minéralogie, Géochimie, cadre géodynamique; Tesis de Doctorado, Universidad Paul Cézanne, 256 p.
- Vidal-Solano, J.R., Paz-Moreno, F.A., Iriando, A., Demant, A., Cochemé, J.J., 2005.** Ignimbrites hyperalcalines d'âge Miocène moyen, dans la région d'Hermosillo (Sonora, Mexique). *Comptes Rendus - Geosciences*. 337, pp 1421–1430. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.08.007>
- Vidal-Solano, J.R., Paz-Moreno, F.A., Demant, A., López-Martínez, M., 2007.** Ignimbritas hiperalcalinas del Mioceno medio en Sonora Central: revaluación de la estratigrafía y significado del volcanismo Terciario. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24(1), 47-67.
- Vidal-Solano, J.R., Lapierre, H., Stock, J.M., Demant, A., Paz-Moreno, F.A., Bosch, D., Brunet, P., Amortegui, A., 2008.** Isotope geochemistry and petrogenesis of peralkaline Middle Miocene ignimbrites from Sonora, Mexico: relationship with continental break-up and the birth of the Gulf of California. *Bulletin of Society Geological of France* 179, 453–464. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.179.5.453>

- Vidal-Solano, J.R., Mendoza-Córdova, A., Lozano-Santa-Cruz, R., 2009.** Análisis de elementos mayores por FRX en secciones delgadas de roca: Resultados preliminares en lavas vítreas ácidas y básicas. XVIII Congreso Nacional de Geoquímica, Hermosillo Son., 18 (1), 6-10.
- Vidal-Solano, J.R., Lozano-Santa Cruz, R., Zamora, M.O., Mendoza-Córdova, A., 2010.** Correlación geoquímica e implicaciones tectónicas de la ignimbrita hiperalcalina ampliamente distribuida en el NW de México: WD-FRX en secciones de roca, en XX Congreso Nacional de Geoquímica, Temixco, Morelos, México: Actas INAGEQ, 16(1), 300-304.
- Vidal-Solano, J.R., Lozano Santa Cruz, R., Zamora O., Mendoza-Córdova, 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.
- Vidal-Solano, J.R., Reyna, M., Gastelum, J., Hinojosa-García, H., Pérez-Tello, M., Hinojosa-Prieto, H., Escareño-Márquez, P., 2014.** Petrographic, Geochemical and thermal gravimetric characterization on some Perlite Oligocene deposits in the state of Sonora, México: Contribution to the study of the metallurgical process of expansion. *Advances in Minerals and Materials Engineering*, 1, 1-14. ISSN: 978-1-312-76432-3
- Vidal-Solano, J. R., 2020.** Informe final del Proyecto Evolución Geodinámica del ProtoGolfo de California: Énfasis en los vestigios volcánicos de Sonora, México. Ciencias Básica CONACYT No. 180784, 132 p.
- Vidal-Solano, J. R., Gómez-Valencia, A. M., Hinojo-Hinojo, A., Lozano-Santa Cruz, R., 2020.** Geochemistry and geological control of Sonora obsidian: New insights into the provenance study of archaeological obsidians in Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 104, 102840.
- Vidal-Solano, J. R., Gómez-Valencia, A. M., Hinojo-Hinojo, A., Lozano-Santa Cruz, R., 2020.** Handheld X-ray fluorescence geochemical data of geological and archaeological obsidian from Sonora, Mexico. *Data in Brief*, 33, 106410.
- White, J. D., McPhie, J., & Skilling, I. 2000.** Peperite: a useful genetic term. *Bulletin of Volcanology*, 62, 65-66.

- William-Herman, S., 2013.** A paleomagnetic investigation of vertical-axis rotations in coastal Sonora, Mexico: Evidence for distributed transtensional deformation during the Proto-Gulf shift from a subduction-dominated to transform-dominated plate boundary in the Gulf of California. University of California-Santa Barbara, Santa Barbara. Master Thesis. 39 p.
- Wilson, D., 2005.** Implications of volcanism in coastal California for the Neogene deformation history of western North America. *Tectonics*, 24, 22 p.
- Woodcock, N.H., Fischer, M., 1986.** Strike-slip duplexes. *Journal Structural Geology*, 8, 725-735 p.
- Zhang, L., Li, S., Zhao, Q. 2021.** A review of research on adakites. *International Geology Review*, 63(1), 47-64.
- Zucchini, W., Berzel, A., Nenadic, O. 2003.** Applied smoothing techniques. Part I: Kernel Density Estimation, 15, 1-20.

## APÉNDICE A. Tablas Petrográficas

### Petrografía del Basamento Granítico Laramídico

Grupo	Muestra	Localidad	N	E	Descripción en muestra de mano	Roca	Facies	Textura	Fenocristales	Glómeros	Matriz	Alteraciones	Observaciones
Basamento granítico Laramídico	CHPL15-01	Cerros Huerfanitos	3302197	361899	Monzogranito mesocrático de grano grueso con megacristales de feldespatos	Monzogranito	Cristalina	Inequigranular de grano grueso	Pl=FA>Qz>Bta>Hbl >Cpx>Ox Fe-Ti>Zn	No	Cristalina	Chl y Ep, sutilmente en Bta y Hbl	Varietades de albitas, oligoclasas
	SLM16-64A	Represo-Las Lajas	3296336	379813	Monzogranito leucocrático de grano medio de biotita con oxidación selectiva de ferromagnesianos	Monzogranito	Cristalina	Inequigranular de grano grueso a medio	FA>Pl=Qzo>Bta>Ox Fe>Zn	No	Cristalina	Sutilmente en Bta. Las plagioclasas presentan golfos corroídos y sectores con seritización. Hay también escasas texturas mirmekíticas	Varietades de albitas, oligoclasas y abundancia en microclinas. En el clivaje de las biotitas se concentra oxidación
	SLM16-71A	Norte de La Casona-Las Lajas	3297271	375860	Sienogranito leucocrático con abundante oxidación	Sienogranito	Cristalina	Inequigranular de grano medio	FA>Czo>Pl>Bta>Ox Fe>Zn>Ap	No	Cristalina	Alteración selectiva en feldespatos, muy debil a sericita, los cuales tienen inclusiones de OxFe. Hay texturas mirmekíticas. Las biotitas presentan alteración	Predominan microclina, sanidina y oligoclasa. Algunos de los feldespatos tienen maclas en reloj de arena e inclusión de Ox-Fe. Se observa oxidación en planos de fractura.
	SLM16-71B		3297313	375846	Sienogranito leucocrático de biotita con abundante oxidación de ferromagnesianos	Sienogranito	Cristalina	Inequigranular de grano grueso a medio	FA>Czo>Pl>Bta>Ox Fe>Zn>Ap	No	Cristalina	Alteración selectiva en feldespatos, muy debil a sericita, los cuales tienen inclusiones de OxFe. Hay texturas mirmekíticas. Las biotitas presentan alteración	Predominan feldespatos de la variedad microclina, sanidina y oligoclasa. Hay Ox-Fe en vetillas

### Petrografía del volcanismo tipo SMO

Grupo	Muestra	Localidad	N	E	Descripción en muestra de mano	Roca	Facies	Textura	Fenocristales	Glómeros	Matriz	Alteraciones	Observaciones	
Volcanismo tipo Sierra Madre Occidental	CPPL15-01	SE Cerro La Pirinola	3294994	372959	Toba de lapilli estratificada color amarillo, con líticos y cristales de Czo y FA	Toba de lapilli (Ignimbrita)	Nivel de base	Porfírica con líticos	Czo>FA>OxFe-Ti>Bta	1. FA>FA; 2. Czo>FA 3. FA>Bta>OxFe-Ti	Ceniza	Silicificación en matriz y zeolitización en lapillis	Abundancia de líticos de rocas volcánicas intermedias y félsicas desvitrificadas	
	CPPL15-03B		3295000	372968	Toba lítica color rosado con fenocristales de Czo>Bta>FA	Toba lítica (Ignimbrita)	Nivel medio a superior	Porfírica muy lítica	Czo>Bta>FA>OxFe-Ti>	1. FA>FA; 2. Czo>FA 3. FA>Bta>OxFe-Ti	Ceniza	Silicificación y zeolitización	Abundancia de xenocristales y líticos de rocas volcánicas intermedias y félsicas desvitrificadas	
	SLM16-51A	Cerro La Ventana	3295163	378706	Riolita fluidal muy contorsionada, desvitrificada color beige rosado amoratado con abundancia en fracturas y fallas	Riolita fluidal	Nivel superior	Porfírica fluidal contorsionada	Czo>FA>OxFe-Ti>Opx	1. Czo>FA; 2. Czo>Czo 3. Opx>OxFe-Ti 4. Czo>OxFe-Ti	Recristalizada y desvitrificada	Silicificación y oxidación	El óxido de hierro presenta una cristalización radial en parches	
	SLM16-52A		3295284	378767	Vidrio riolítico perlítico altamente fracturado color negro	Perlita	Nivel de base	Vitrea perlítica a escasamente criptocristalina	Escasos FA>Czo>OxFe-Ti	1. FA>OxFe-Ti	Vitrea con abundancia de triquitas fibrosas	Fracturas con sílice	Flejo con abundantes fibras y filamentos de criptocristales discontinuos de triquitas. Existe una abundancia de criptocristales orientados de cristobalita y posiblemente feldespato alcalino, estos cristales siguen un flejo aunado a una elevada concentración de globulos	
	SLM16-52B		3295284	378767	Riolita fluidal desvitrificada con vetillas de calcita y cuarzo	Riolita fluidal	Nivel de base	Fluidal perlítica	Escasos Czo>OxFe>FA	No	Vitrea con abundancia de triquitas fibroso radiales	Fracturas con sílice y calcita	Ninguna	
	SLM16-53		3295284	378767	Toba lítica riolítica silicificada color beige amarillento	Toba lítica (Ignimbrita)	Nivel intermedio-superior	Porfírica a glomeroporfírica con líticos	FA>Czo>Bta>OxFe-Ti	1. FA>FA; 2. Czo>FA 3. FA>Bta>OxFe-Ti 4. FA>Czo>Bta>OxFe-Ti	Ceniza	Silicificación	Abundancia de líticos de rocas volcánicas intermedias y félsicas	
	SLM16-56A		3295486	379269	Toba de ceniza lítica con abundancia en pómez zeolitizadas color amarillo	Toba de ceniza lítica (Ignimbrita)	Nivel intermedio-superior	Porfírica con líticos y fiammes	FA>Czo>Bta>OxFe-Ti	1. FA>FA; 2. Czo>FA	Ceniza	Zeolitización en Pómez	Abundancia de líticos de rocas volcánicas intermedias y félsicas perlíticas	
	SLM16-56C		3295486	379269	Toba de ceniza lítica	Toba de ceniza lítica (Ignimbrita)	Nivel intermedio-superior	Porfírica con líticos	Czo>FA>Bta>OxFe-Ti	1. Czo>FA	Ceniza	Silicificación y zeolitización	Abundancia de líticos gruesos de rocas volcánicas intermedias y félsicas desvitrificadas	
	SLM16-58B		3295301	379165	Perlita color gris azulado con esferulitas de desvitrificación y núcleos de obsidiana (lágrimas de apache)	Perlita	Nivel de base	Vitrea perlítica a escasamente criptocristalina	FA>Czo>OxFe-Ti	No	Vitrea	No	Filamentos de criptocristales discontinuos de triquitas en la matriz	
	SLM16-90A		NE del Cerro Las Tinajas	3294422	383378	Toba de lapilli color beige rosado con líticos	Toba de lapilli (Ignimbrita)	Nivel intermedio-superior	Porfírica con líticos y fiammes	FA>Czo>Bta>OxFe-Ti	No	Ceniza	Silicificación y zeolitización en lapillis	Abundancia de líticos de rocas volcánicas intermedias y félsicas perlíticas
	SLM16-90B			3294432	383381	Toba de lapilli color beige amarillento	Toba de lapilli (Ignimbrita)	Nivel intermedio-superior	Porfírica con líticos	FA>Czo>Bta>OxFe-Ti	No	Ceniza	Silicificación y zeolitización en lapillis	Líticos de rocas volcánicas intermedias y félsicas perlíticas

## Petrografía de los miembros volcánicos de la Sucesión sedimentaria tipo Báucarit

Grupo	Muestra	Localidad	3293329	E	Descripción en muestra de mano	Roca	Facies	Textura	Fenocristales	Glómeros	Matriz	Alteraciones	Observaciones
Miembros volcánicos félsicos de Báucarit	CM16-16	NE Cerro Los Mochos	3293315	376957	Toba de cristales con pómez zeolitizadas con estratificación gruesa color beige	Toba de ceniza y cristales (Ignimbrita)	Intermedia	Porfírica	Czo>FA>Bta>OxFe-Ti	No	Ceniza y vidrio	Ligera zeolitización	Los líticos corresponden a rocas volcánicas intermedias
	CM16-17A		3293321	376981	Toba de ceniza con cristales color gris, presenta estratificación	Toba de ceniza y cristales (Ignimbrita)	Intermedia	Porfírica a eutaxítica en parches con fiammes	Czo>FA>OxFe-Ti>Bta	No	Ceniza	No	No
	CM16-17B		3293321	376981	Toba de ceniza con biotita	Toba de ceniza (Ignimbrita)	Intermedia	Porfírica a eutaxítica en parches con fiammes	Czo>FA>OxFe-Ti>Bta	No	Ceniza	No	No
	CM16-17C		3293329	377042	Toba de ceniza lítica de grano grueso color gris rojizo con abundancia en biotita	Toba de ceniza lítica (Ignimbrita)	Intermedia	Porfírica muy lítica	Czo>FA>Bta>OxFe-Ti>Cpx	No	Ceniza y vidrio	Oxidación en la matriz	Abundancia de líticos de rocas volcánicas intermedias y escasos fenocristales de Cpx
	CM16-17D		3293329	377042	Toba de ceniza lítica de grano medio color gris rojizo con abundancia en biotita	Toba de ceniza lítica (Ignimbrita)	Intermedia	Porfírica	Czo>FA>Bta>OxFe-Ti	No	Ceniza y vidrio	Oxidación	Líticos de rocas volcánicas intermedias
	CM16-17E		3293329	377042	Toba de ceniza con horizontes líticos marcados por estratificación cruzada y silicificación	Toba de ceniza (Ignimbrita)	Intermedia	Porfírica muy lítica	Czo>FA>Bta>OxFe-Ti>Cpx	No	Ceniza y vidrio	Ligera zeolitización	Estratos con concentración de líticos de rocas volcánicas intermedias y cristales de Czo>FA. La biotita presenta una seriación congruente con la estratificación
	SLM16-101	Cerro Las Cobrizas	3289667	377586	Toba riolítica con biotita y hornblenda	Toba de ceniza lítica (Ignimbrita)	Intermedia	Porfírica a ligramente glomeroporfírica	Czo>FA>Bta>OxFe-Ti>Hbl	1. Czo>FA 2. FA>OxFe-Ti	Ceniza y vidrio	Oxidación	Vetillas rellenas de óxidos de hierro
	SLM16-104B		3289697	377535	Toba de lapilli silicificada y estratificada con líticos y abundancia en zeolitas.	Toba de lapilli con líticos	Intermedia	Porfírica	Czo>FA>OxFe-Ti	No	Ceniza y vidrio	Zeolitización	Abundancia de líticos de andesitas y perlitas
	SLM16-107A		3289856	376953	Toba de ceniza con cristales color gris, presenta estratificación	Toba de ceniza y cristales (Ignimbrita)	Intermedia	Porfírica a eutaxítica en parches con fiammes	Czo>FA>OxFe-Ti>Bta	No	Ceniza	No	No
	SLM16-110		3289856	376953	Riolita afanítica con vetillas rellenas de cuarzo	Riolita	Fluidal	Escasamente microporfírica	Czo>FA>OxFe-Ti	No	Vítrea	Silicificación	No
	SLM16-111		3289856	376953	Riolita desvitrificada con abundante oxidación	Riolita	Fluidal	Escasamente porfírica	Czo>FA>OxFe-Ti	1. Czo>FA 2. FA>OxFe-Ti	Desvitrificada	Oxidación	No
SLM17-05	Norte Cerro Las Cobrizas	3291395	377929	Perlita negra altamente fracturada	Perlita	Nivel de base	Perlítica ligeramente fluidal	Baja concentración FA>Cpx>Hbl>OxFe>Czo	1. Hbl>OxFe 2. Cpx>OxFe	Criptocristalina de Qzo>OxFe>FA	Oxidación en planos de perlitización	Flejo con escasas fibras y filamentos de criptocristales continuos en el sector de flujo de triquitas.	

Grupo	Muestra	Localidad	3293329	E	Descripción en muestra de mano	Roca	Facies	Textura	Fenocristales	Glómeros	Matriz	Alteraciones	Observaciones
Miembro volcánico superior	SLM16-22	La Casona- Las Lajas	3295315	377679	Basalto ligeramente vesicular a glomeroporfídico de Pl>Prx>Ol iddingsitizado. La roca es de color café oscuro a gris con sectores rojizos	Basalto	Vesicular	Porfírica	Pl>Cpx>Ol iddingsitizado>OxFe-Ti	Escasos 1. Pl>Ol, 2. Ol>OxFe-Ti	Traquítica, vítrea a criptocristalina de Pl>OxFe	Oxidación selectiva en ferromagneesianos	Plagioclasas de las variedades oligoclasa y andesina
	SLM16-24		3295276	377642	Basalto amigdalgar de carbonatos, porfídico de Pl>Prx>OxFe	Basalto	Amigdalgar	Porfírica	Pl>Cpx>OxFe-Ti>Ol iddingsitizado	1. Pl>OxFe	Traquítica, vítrea a criptocristalina de Pl>OxFe	Relleno de carbonatos	Plagioclasas de las variedades oligoclasa y andesina
	SLM16-25A		3295269	377599	Basalto escasamente porfídico de Pl>Prx>OxFe	Basalto	Fluidal	Escasamente porfídico	Pl>Cpx>OxFe-Ti>	No	Microcristalina de Pl a vítrea	No	Plagioclasas de las variedades oligoclasa y andesina
	SLM16-26		3295253	377486	Basalto microcristalino porfídico de Ol iddingsitizado	Basalto	Hipabisal	Traquítica ligeramente porfídica a glomeroporfídica	Pl>Cpx>OxFe-Ti>Ol iddingsitizado	No	Traquítica, vítrea a criptocristalina de Pl>OxFe	Relleno de calcita y zeolitas	Plagioclasas de las variedades oligoclasa y andesina
	SLM16-29		3295590	377424	Basalto vesicular porfídico de Pl>Prx>Ol, altamente fracturado	Basalto	Laminar intermedia	Traquítica ligeramente porfídica a glomeroporfídica	Pl>Ol iddingsitizado>Cpx>OxFe	Muy escasos de Pl<Ol	Traquítica, vítrea a criptocristalina de Pl>OxFe	Iddingsitización en Ol	Parece existir la inmiscibilidad de dos magmas, uno de ellos con mayor concentración de Ol y OxFe
	SLM16-37		3294676	377476	Basalto vesicular porfídico de Pl>Prx>Ol	Basalto	Intermedia	Porfídica a vesicular	Pl>Ol iddingsitizado>Cpx>OxFe	No	Microcristalina de Pl a vítrea	Iddingsitización en Ol	Plagioclasas de las variedades oligoclasa y andesina
	SLM16-47		3294508	378301	Basalto desvitrificado	Basalto	Intermedia	Porfírica	Pl>Ol iddingsitizado>Cpx>OxFe	No	Desvitrificada	Iddingsitización en Ol	Plagioclasas de las variedades oligoclasa y andesina

Grupo	Muestra	Localidad	3293329	E	Descripción en muestra de mano	Roca	Facies	Textura	Fenocristales	Glómeros	Matriz	Alteraciones	Observaciones
Miembros volcánicos intermedios a maficos de Báucarit	CPPL15-03A	SE Cerro La Pirinola	3295000	372968	Basalto dolerítico Pl>Ol>Prx vesicular a amigdalal	Basalto dolerítico	Hipabisal	Dolerítica	Pl>Ol>Cpx>Opx>OxFe-Ti	No	Intergranular	Oxidación en ferromagnesianos	Plagioclasas andesinas y labradoritas, algunas de mayor dimensión presentan texturas en criba y golfos de corrosión. Las amigdalas están rellenas de carbonatos y arcillas
	MAPL15-03	Mesa Arivaipa	3279553	376360	Basalto café oscuro, porfírico de Pl>Prx>Ol iddingsitizado	Basalto	Fluidal	Porfírica	Pl>Ol>Cpx>Opx>OxFe-Ti	1. Pl>OxFe, 2. Ol>Cpx	Vitrea traquítica	Iddingsitización en olivinos	Varietades esqueléticas de olivinos iddingsitizados. Plagioclasas de la variedad andesina, algunas de mayor dimensión presentan texturas en criba y zoneadas
	SLM16-04	Cerro La Cruz	3293171	375846	Andesita porfídica de Pl>Prx con matriz vitrea desvitrificada	Andesita	Fluidal	Porfírica	Pl>Cpx>OxFe-Ti	1. Pl>Pl	Vitrea traquítica	Vetillas con Calcita, Cuarzo y Óxidos de Hierro	Ocasionales amigdalas rellenas de calcita
	SLM16-06		3293194	375728	Basalto dolerítico de Pl>Ol iddingsitizado>Prx, vesicular a amigdalal de calcita y cuarzo	Basalto dolerítico	Hipabisal	Dolerítica	Pl>Ol Iddingsitizado>Opx>OxFe-Ti	1. Pl>Pl, 2. Pl>Ol, 3. Pl>OxFe-Ti	Intergranular	Iddingsitización de olivinos y epidotización en ferromagnesianos	Plagioclasas andesinas y labradoritas, algunas de mayor dimensión presentan bordes corroídos y pseudomorfismo en parches. Facies de grano grueso con abundancia de vetillas rellenas de óxidos. Las amigdalas tienen rellenos de cuarzo, calcita y zeolitas
	SLM16-15		3293716	375994	Basalto amigdalal porfírico de Pl>Prx>Ol	Basalto	Fluidal	Porfírica	Pl>Cpx>Ol>OxFe-Ti	1. Pl>Pl	Vitrea traquítica	Oxidación selectiva en ferromagnesianos y amigdalas rellenas de calcita y zeolitas	Vetillas rellenas de calcita y óxidos de hierro
	SLM16-20		NE del Cerro La Cruz	3294349	376423	Basalto porfídico de Pl>Prx>Ol iddingsitizado con amigdalas de epidota.	Basalto amigdalal	Hipabisal	Dolerítica	Pl>Ol>Opx>OxFe-Ti	1. Ol>OxFe-Ti	Intergranular	Iddingsitización de olivinos
	CM16-01	Cerro Los Mochos	3292565	376335	Basalto amigdalal a vesicular glomeroporfídico de Pl>Prx>Ol>OxFe-Ti con alteración propilitica y malaquita en planos de fractura	Basalto	Vesicular-amigdalal	Porfídica ligeramente glomeroporfídica con abundancia en amigdalas	Pl>Opx>Cpx>Ol>OxFe-Ti	1. Pl>Pl, 2. Pl>Cpx	Microcristalina traquítica a criptocristalina desvitrificada en sectores	Propilitica y oxidación de ferromagnesianos	Parece existir dos líquidos, uno con matriz criptocristalina y el otro con una matriz traquítica. Las plagioclasas de mayor dimensión presentan una textura nublada. Hay abundantes amigdalas rellenas de cuarzo, calcedonia, clorita y epidota
	CM16-03		3292678	376603	Basalto café grisáceo microcristalino porfírico de Prx>Ol>Pl>OxFe-Ti y escasamente vesicular a amigdalal	Basalto	Intermedia	Seriada	Pl>Ol Iddingsitizado>OxFe-Ti	Escasos 1. Pl>Ol, 2. Ol>OxFe-Ti	Microcristalina a ligeramente vitrea	Iddingsitización de olivinos	Plagioclasas oligoclasas y andesinas. Las amigdalas presentan rellenos de calcita y zeolitas
	CM16-04		3292677	376609	Basalto microcristalino a amigdalal de caliche	Basalto	Amigdalal	Traquítica	Pl>Ol Iddingsitizado>OxFe-Ti	Escasos 1. Pl>Ol, 2. Ol>OxFe-Ti	Microcristalina	Iddingsitización de olivinos	Plagioclasas oligoclasas y andesinas. Las amigdalas presentan rellenos de calcita y zeolitas
	CM16-05		3292613	376689	Basalto traquítico altamente oxidado con amigdalas rellenas de calcita	Basalto	Superior	Subofítica en parches	Pl>Opx>Cpx>Ol iddingsitizado>OxFe-Ti	Escasos 1. Ol>OxFe-Ti	Intergranular	Iddingsitización de olivinos	Plagioclasas andesinas a labradoritas. Escasas microvesículas y amigdalas rellenas de calcita
	CM16-07	3292558	376742	Basalto café grisáceo microcristalino con laminaciones o lentes vesiculares, porfídico de Pl>Prx>Ol>OxFe-Ti, el piroxeno está oxidado	Basalto microcristalino	Vesicular-amigdalal	Intergranular	Pl>Opx>Cpx>Ol iddingsitizado>OxFe-Ti	No	Microcristalina	Iddingsitización de olivinos	Microvesículas y amigdalas rellenas de calcita	
	CM16-14	3292730	376147	Andesita afanítica vesicular a amigdalal de calcita con escasos y pequeños glómeros de Prx>Ol>OxFe-Ti con alteración selectiva de epidota en ferromagnesianos	Andesita	Vesicular-amigdalal	Traquítica porfídica a ligeramente glomeroporfídica	Pl>Cpx>OxFe-Ti	Escasos 1. Pl>Pl, 2. Cpx>Pl>OxFe-Ti	Microcristalina a vitrea	Oxidación y ligera epidotización en ferromagnesianos	Plagioclasas andesinas a labradoritas. Escasas microvesículas y amigdalas rellenas de calcita	
	CM16-19	3293399	377339	Basalto microcristalino café oscuro, porfídico escasamente glomeroporfídico de Pl>Prx>Ol. Los ferromagnesianos están oxidados y la matriz tiene una abundancia en OxFe	Basalto	Amigdalal	Porfírica ligeramente traquítica amigdalal	Pl>Opx>Ol Iddingsitizado>OxFe-Ti	No	Microcristalina	Iddingsitización de olivinos y carbonatos en parches	Plagioclasas oligoclasas y andesinas. Las amigdalas presentan rellenos de calcita	
	SLM17-01	3291938	376423	Basalto dolerítico porfírico de Pl>Ol>Prx con alteración propilitica y alto fracturamiento	Basalto dolerítico	Hipabisal	Dolerítica a subofítica	Pl>Ol>Opx>Cpx>OxFe-Ti	No	Intergranular	No	Plagioclasas andesinas y labradoritas	
	SLM16-89	Cerro Las Cobrizas	3294329	383318	Andesita microcristalina de Pl>Prx con amigdalas, color café amoratado con sectores rojizos	Andesita	Fluidal	Porfírica a glomeroporfídica	Pl>Opx>OxFe-Ti	Escasos 1. Pl>Pl, 2. Opx>Pl>OxFe-Ti	Traquítica, vitrea a criptocristalina de Pl>OxFe	No	Plagioclasas oligoclasas y andesinas. Las plagioclasas presentan texturas con golfos de corrosión
	SLM16-100		3289676	377629	Basalto dolerítico con sectores brechoides, tiene una elevada presencia de OxFe	Basalto dolerítico	Hipabisal	Dolerítica a subofítica	Pl>Ol>Opx>OxFe-Ti	No	Intergranular	Iddingsitización de olivinos	Plagioclasas andesinas y labradoritas
	SLM16-102		3289653	377541	Basalto microcristalino con abundancia en óxidos de hierro	Basalto	Hipabisal	Ofítica	Pl>Opx>Ol>OxFe-Ti	No	Intergranular	Iddingsitización de olivinos	Plagioclasas andesinas y labradoritas
	SLM16-103		3289693	377542	Andesita porfídica de Pl>Prx	Andesita	Intermedia	Porfídica	Pl>Opx>OxFe-Ti	No	Vitrea a microcristalina de Pl	Oxidación	Plagioclasas oligoclasas y andesinas
	SLM16-105		3289698	377507	Basalto microcristalino de Pl>Prx>OxFe>Ol, color café rojizo amoratado	Basalto	Hipabisal	Porfírica a glomeroporfídica	Pl>Opx>Ol>OxFe-Ti	Escasos 1. Pl>Ol, 2. Ol>OxFe-Ti	Vitrea a microcristalina de Pl	Iddingsitización de olivinos	Plagioclasas oligoclasas y andesinas
	SLM16-106		3289778	377154	Dacita vitrea porfídica a glomeroporfídica de Pl>Czo>OxFe, color café rojizo a café amoratado	Dacita	Fluidal	Porfírica a glomeroporfídica	Pl>FA>Czo>OxFe>Opx	1. Pl>OxFe	Vitrea a microcristalina de Pl	Oxidación	Plagioclasas oligoclasas
SLM16-109	3289856		376953	Basalto	Basalto	Fluidal	Porfírica a glomeroporfídica	Pl>Opx>OxFe-Ti	1. Pl>OxFe	Microcristalina de Pl a vitrea	Oxidación	Plagioclasas oligoclasas y andesinas	

## APÉNDICE B. Mediciones Estructurales

Tipo Estructura/Falla	N	E	Rumbo	Echado	Pitch	Rake	Plunge
Normal	376210	3281838	305	70			
Normal	376228	3291841	55	60			
Oblicua	376228	3291841	180	80	55 S		
Normal	376228	3291841	305	70			
Normal	376232	3282063	15	70			
Normal	376243	3282029	310	65			
Normal	376263	3282030	194	60			
Normal	376263	3282030	338	50			
Normal	376269	32820181	352	76	45 desde el NW		
Normal	377052	3279933	170	55			
Normal	376862	3279387	160	30			
Normal	376862	3279387	350	70			
Normal	376862	3279387	346	80			
Normal	376862	3279387	20	61			
Normal	376862	3279387	161	51			
Normal	376862	3279387	92	70			
Normal	376862	3279387	90	70			
Normal	376372	3279540	320	90			
Normal	381857	3285490	170	75			
Normal	381857	3285490	174	76			
Normal	381782	3285496	100	68	74		
Normal	381782	3285496	75	50			
Normal	381782	3285496	135	40			
Normal	381782	3285496	155	60			
Normal	381771	3285530	100	40			
Normal	381771	3285530	110	62			
Normal	381763	3285711	310	60			
Normal	301813	3285759	167	58			
Normal	381834	3285758	157	70			
Normal	381695	3285241	120	50			
Normal	372574	3297863	30	50			
Normal	372574	3297863	80	64			
Normal	372571	3297700	98	70			
Normal	376335	3292565	10	67			
Normal	376885	3292582	137	67			
Normal	377470	3295795	160	32			
Normal	377470	3295795	178	58			
Normal	377880	3295807	155	27	60		29
Normal	377880	3295807	155	27	76		23
Normal	378706	3295163	344	34			
Normal	378706	3295163	240	65			
Normal	378706	3295163	90	46			
Normal	379264	3295278	2	35			
Normal	379264	3295278	295	44			
Normal	379256	3295255	205	42			
Normal	379246	3295170	225	42			
Normal	380573	3296804	227	36	20		28
Normal	380573	3296804	282	44			
Normal	383329	3293253	233	51			
Normal	383328	3293250	155	39	Estrias al hechado		
Normal	383357	3294507	140	53			
Normal	383712	3293582	254	50			
Normal	383712	3293582	125	44			
Normal	383712	3293582	165	33			
Normal	383329	3293253	202	51	Falla Normal Al echado		
Normal	383329	3293253	224	40	138		34
Normal	378632	3295341	178	81			
Normal	381748	3285705	169	45			
Normal	376926	3291407	155	35			
Normal	377454	3295828	159	59			
Normal	377454	3295828	114	56			
Normal	377454	3295828	252	65			
Normal	377454	3295828	104	66			
Normal	377454	3295828	156	51			

Tipo Estructura/Falla	N	E	Rumbo	Echado	Pitch	Rake	Plunge
Normal	377507	3295832	148	39			
Normal	377875	3295851	140	25			
Normal	377880	3295807	170	41			
Normal	377880	3295807	186	61			
Normal	377880	3295807	175	63			
Normal	377711	3294713	34	75			
Normal	377711	3294713	188	75			
Normal	377721	3294687	159	69			
Normal	377855	3294475	51	80			
Normal	378786	3295310	125	24	34		19
Normal	378786	3295310	125	24	30		33
Normal	379264	3295278	173	39			
Normal	379302	3295199	130	87	40		80
Normal	380271	3294763	251	63			
Normal	379813	3296336	280	50	24		44
Normal	379818	3296432	189	30			
Normal	379817	3296527	22	26			
Fallas yFracturas	383357	3294507	170	55			
Fallas yFracturas	383357	3294507	175	49			
Normal	376256	3281813	157	62			
Fallas yFracturas	383357	3294507	178	59			
Lateral	376371	3281937	333	64			
Lateral	376466	3281963	295	90			
Lateral	381782	3285496	110	90	60		
Lateral	381771	3285530	108	70		20	
Lateral	381763	3285711	70	64		10	
Lateral	377711	3294713	35	80			
Lateral	378778	3295300	204	65			
Lateral	378779	3295300	190	31			
Lateral	378779	3295300	200	33			
Lateral	379292	3295198	347	48			
Lateral	383328	3293247	358	80			
Lateral	383328	3293247	42	53			
Lateral	383328	3293247	178	81			
Lateral	383328	3293247	86	70			
Lateral	377909	3295260	206	75			
Lateral	377909	3295260	316	66			
Lateral	378734	3295403	15	90			
Lateral	378634	3295367	325	78		149	
Lateral	381741	3285692	135	46	80	110	
Lateral	381664	3285678	120	65			
Lateral	377977	3291664	0	71			
Lateral	377977	3291664	10	72			
Lateral	377930	3291465	5	60			
Lateral			327	80			
Lateral			336	87			
Lateral			155	73			
Lateral			155	68			
Lateral			129	56			
Lateral			56	74			
Lateral			169	59			
Lateral			129	56			
Lateral			155	68			
Lateral			144	60			
Lateral			153	46			
Lateral			110	68			
Lateral			6	35			
Lateral			225	39			
Lateral	377184	3293355	345	52			
Normal	378706	3295163	55	85	40		75
Normal	378797	3295299	136	21	65		22
Normal	378790	3295308	200	45	58		42
Normal	383344	3293262	191	64	45		50
Normal	383344	3293262	175	68	65		64
Normal	383328	3293247	239	27	19		
Lístrica	377793	3294616	341	68			
Lístrica	377793	3294616	185	57			
Lístrica	377793	3294616	215	47			
Lístrica	379292	3295198	348	61			

## **APÉNDICE C. Preparación de muestras y técnica analítica U–Pb en zircones**

La separación de zircones a partir de rocas volcánicas, inició con una primera etapa que se realizó en el Laboratorio de Preparación de Muestras para Geoquímica del Instituto de Geología de la ERNO-UNAM, con la asesoría y apoyo del Quím. Pablo Peñaflor Escárcega, donde se comenzó con una trituración de la roca en una quebradora de quijadas Braun Chipmunk para posteriormente utilizar un pulverizador de molino de bolas de ágata y finalmente para realizar una selección mineral mediante el uso de un separador magnético Frantz.

Una segunda etapa se realizó en el Laboratorio de Alimentos del Departamento de Ciencias Químico-Biológicas de la Universidad de Sonora con el apoyo de: M.C. Mavet Herrera Cadena y M.C. Dalila Canizales Rodríguez. En esta etapa, el objetivo fundamental se enfocó en obtener un concentrado de zircones mediante la separación en el contraste de densidades por medio del uso de líquidos pesados (yoduro de metileno).

La tercera etapa consistió en la selección manual de al menos 60 zircones, utilizando un microscopio binocular de la Estación Regional del Noroeste (ERNO-UNAM). En esta agrupación de zircones se debe considerar la representatividad de los cristales, tamaño, forma, color. Posteriormente, estos son montados en una resina epóxica utilizando anillos de plástico como moldes y, posteriormente, se hace un desbaste para exponer una superficie ecuatorial de los zircones. Antes y después de los análisis in situ por ablación láser, para las superficies pulidas de los granos de zircón se sugiere que sean fotografiadas en el Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido (CEGEO) del Centro de Geociencias UNAM campus Juriquilla, usando un microscopio electrónico de barrido (SEM; Scanning Electron Microscope) marca HITACHI S-3100H con detector de cátodos. Las imágenes de cátodoluminiscencia (no incluidas en este trabajo), luz reflejada y transmitida fueron obtenidas con el apoyo del Dr. Alexander Iriondo, esto con el propósito de caracterizar la estructura interna de los zircones y así, poder elegir los sitios potenciales para ejercer la incidencia analítica de U-Pb. Lo anterior es posible observando el zoneamiento de los cristales de zircón, el cual puede estar relacionado con diversos aspectos, entre ellos puede ser un cambio de composición química, posibles inclusiones o sectores heredados.



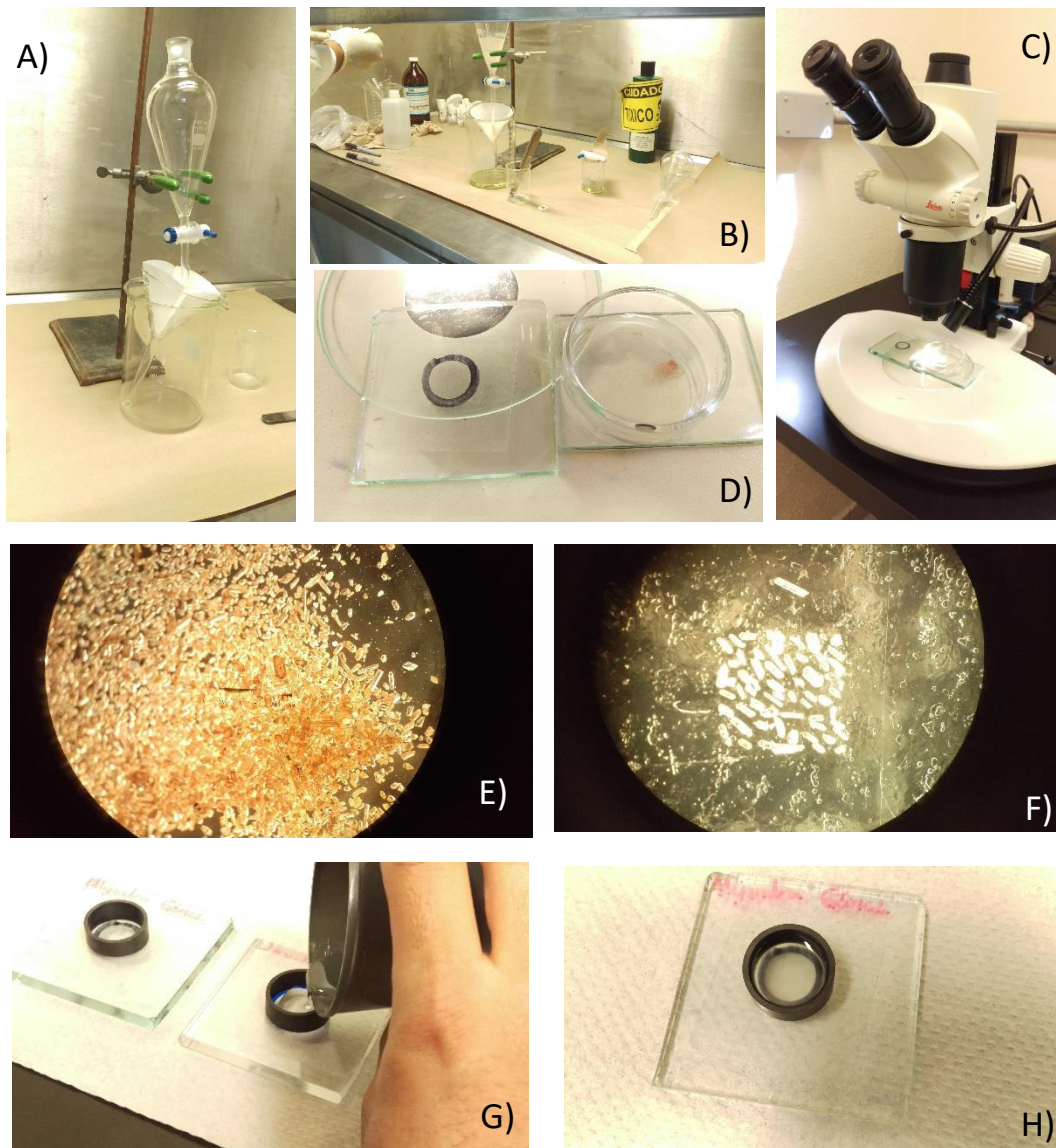


Figura C1.- Etapas de separación de zircones: A) Arreglo bajo campana para la separación de zircones utilizando el líquido pesado de yoduro de metileno; B) Distribución metodológica para la separación de zircones; C) Microscopio binocular utilizado para la selección manual de los zircones candidatos para analizar; D) Detalle de la concentración de zircones a analizar; E) Fotografía que muestra la abundante concentración de zircones en las muestras de rocas toleíticas de la Sierra Los Mochos; F) Colocación de zircones en una cita adhesiva de doble cara que servirá como sostén de los zircones acomodados para el análisis; nótese que en la parte superior se deja un zircón guía; G) y H) Producción de probeta que contendrá los zircones a analizar, nótese que se utiliza una resina para fijar los minerales.

El análisis y la obtención de datos se llevó a cabo en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) del Centro de Geociencias UNAM campus Juriquilla, a cargo del Dr. Luigi A. Solari. El LEI cuenta con un sistema de ablación láser modelo Resolution M50 de la marca

“Resonetics” compuesto por un láser LPX 220 tipo excímero de 193 nm de longitud de onda utilizando una mezcla de fluoruro de argón (ArF) para generar la pulsación. Este se encuentra acoplado a un espectrómetro de masas (ICP-MS) tipo cuadrupolo marca “Thermo X-Series” (Figura C2). Para mayor énfasis en procedimiento y protocolo de análisis Solari et al. (2010) muestran un claro seguimiento sobre los análisis isotópicos U-Pb.



Figura C2.- Espectrómetro de masas ICP-MS tipo cuadrupolo marca “Thermo X-Series”, en la parte derecha. En la parte izquierda se observa el sistema de ablación láser.

Cabe destacar, que el principal interés al utilizar esta técnica analítica es obtener los isótopos de  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{238}\text{U}$ , necesarios para la determinación de la edad del material objeto. La datación U-Pb es un sistema de fechamiento complejo que involucra a los isótopos radioactivos de Uranio ( $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ) y tres isótopos radiogénicos de Plomo ( $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ) y el isótopo  $^{204}\text{Pb}$  que no es radiogénico. Es importante mencionar, que la composición isotópica del Pb se incrementa en función del decaimiento radioactivo.

Una vez realizado el trabajo analítico es necesario realizar un tratamiento de datos para llegar al cálculo de la edad, destacando que para facilitar este proceso, se desarrolló para el LEI de la UNAM el software en R, denominado “UPb.age”. Es interesante que este software realiza la corrección inmediata de las mediciones ICP-MS con sus respectivos blancos (para mayor precisión de la metodología ver Solari et al. 2010; Solari y Tanner, 2011).

## **Referencias**

- Solari, L. A., Gómez-Tuena, A., Bernal, J. P., Pérez-Arvizu, O., Tanner, M., 2010.** U-Pb zircon geochronology with an integrated LA-ICP-MS microanalytical workstation: Achievements in precision and accuracy. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 34(1), 5-18.
- Solari, L. A., & Tanner, M. 2011.** UPb. age, a fast data reduction script for LA-ICP-MS U-Pb geochronology. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 28(1), 83-91.

# ANEXO 1

## Artículo 1

Petrogenesis and Geodynamic implications of the Late Cretaceous  
granitoids in Puerto Libertad, Sonora, México:  
insights into geochemical signatures of adakite, adakitic affinity and  
calc-alkaline rocks in NW Mexico.

**Gómez-Valencia, A. M.**, Barrón-Díaz, A. J., Espinoza-Encinas, I. R., Lozano-Santa Cruz,  
R., Iriondo, A., Paz-Moreno, F. A., Vidal-Solano, J. R



## Petrogenesis and geodynamic implications of the Late Cretaceous granitoids in Puerto Libertad, Sonora, México: Insights into geochemical signatures of adakites, adakitic affinity and calc-alkaline rocks in NW Mexico

Alejandra M. Gómez-Valencia<sup>a,b,c</sup>, Arturo J. Barrón-Díaz<sup>c,\*</sup>, Iván R. Espinoza-Encinas<sup>a,c</sup>, Rufino Lozano-Santa Cruz<sup>d</sup>, Alexander Iriondo<sup>e,f</sup>, Francisco A. Paz-Moreno<sup>c</sup>, Jesús R. Vidal-Solano<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Posgrado en Ciencias de La Tierra, Instituto de Geología, Estación Regional Del Noroeste, Universidad Nacional Autónoma de México (ERNO-UNAM), Hermosillo, Mexico

<sup>b</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora (UNISON), Hermosillo, Mexico

<sup>c</sup> Departamento de Geología, Universidad de Sonora (UNISON), Hermosillo, Mexico

<sup>d</sup> Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, Mexico

<sup>e</sup> Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Querétaro, Mexico

<sup>f</sup> Department of Geosciences, University of Arizona, Tucson, AZ, USA

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Laramide continental arc  
Geochemical adakite signature  
Puerto Libertad  
Sonora  
U–Pb zircon geochronology  
Geothermobarometry

### ABSTRACT

Paleozoic and Mesozoic stratigraphic sequences in the Puerto Libertad area, NW Sonora, Mexico, are intruded by Laramide granitic plutons with dominantly alkaline affinity. We conducted a petrogenetic study of these bodies across a north-south 35 km long transect at oriented NW-SE which includes the Sierra Picú (SP), El Destierro (ED), Sierra Tordilla (ST) and Sierra Los Mochos (SLM). The intrusive bodies display abundant Mafic Microgranular Enclaves (MME) and are intruded by aplitic and pegmatitic dike swarms. U/Pb zircon dates of the intrusive rocks yield crystallization ages between 71.9 and 74.9 Ma. Granodioritic and monzogranitic rocks dominate the SP and ED, while syenogranitic rocks dominate the ST and SLM regions. In addition, these rocks show notable effects, by normal and listric faults which includes cataclastic rocks. Geothermobarometry data from amphiboles and plagioclase of the granodiorites suggest that the temperatures and pressures reached 711–740 °C and 1.67–2.43 kb, respectively, and were emplaced at depths between ~5 and 6 km. Geochemically, this magmatism shows a relatively high silica content (56–75 wt%), values of Sr/Y = 29–50, La/Yb = 26–39, Sr up to 600 ppm and Ba up to 1400 ppm and depleted in highfield strength elements. Collectively these geochemical traits accentuate the adakite signature of these rocks. This work raises the current problems related to the petrogenetic and tectonic aspects for the generation of calc-alkaline and adakitic magmas while proposing ternary discrimination diagrams to aid in the discrimination from classic calc-alkaline, adakites and adakitic affinity magmatism.

### 1. Introduction

Variations in composition and description of magmatic characteristics of intrusive bodies in NW Mexico has recently been improved after many recent petrogenetic studies. Outcrops of plutonic rocks are well exposed along the Basin and Range and Gulf of California Extensional provinces (Fig. 1A). The plutonic assemblages include Paleoproterozoic

subduction related calc-alkaline intrusives and Mesoproterozoic intra-plate calc-alkaline magmatism (Iriondo and Premo, 2011). Permo-Triassic calc-alkaline magmatism took place in a continental arc environment (Arvizu et al., 2009; Arvizu-Gutiérrez, 2015) that continued throughout Jurassic and Cretaceous-Eocene after the Farallon paleo-plate subduction under the North American plate (Coney, 1976; Cochemé, 1985; Dickinson et al., 1988; Atwater, 1989; Stock and

\* Corresponding author. Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Hermosillo, Mexico.

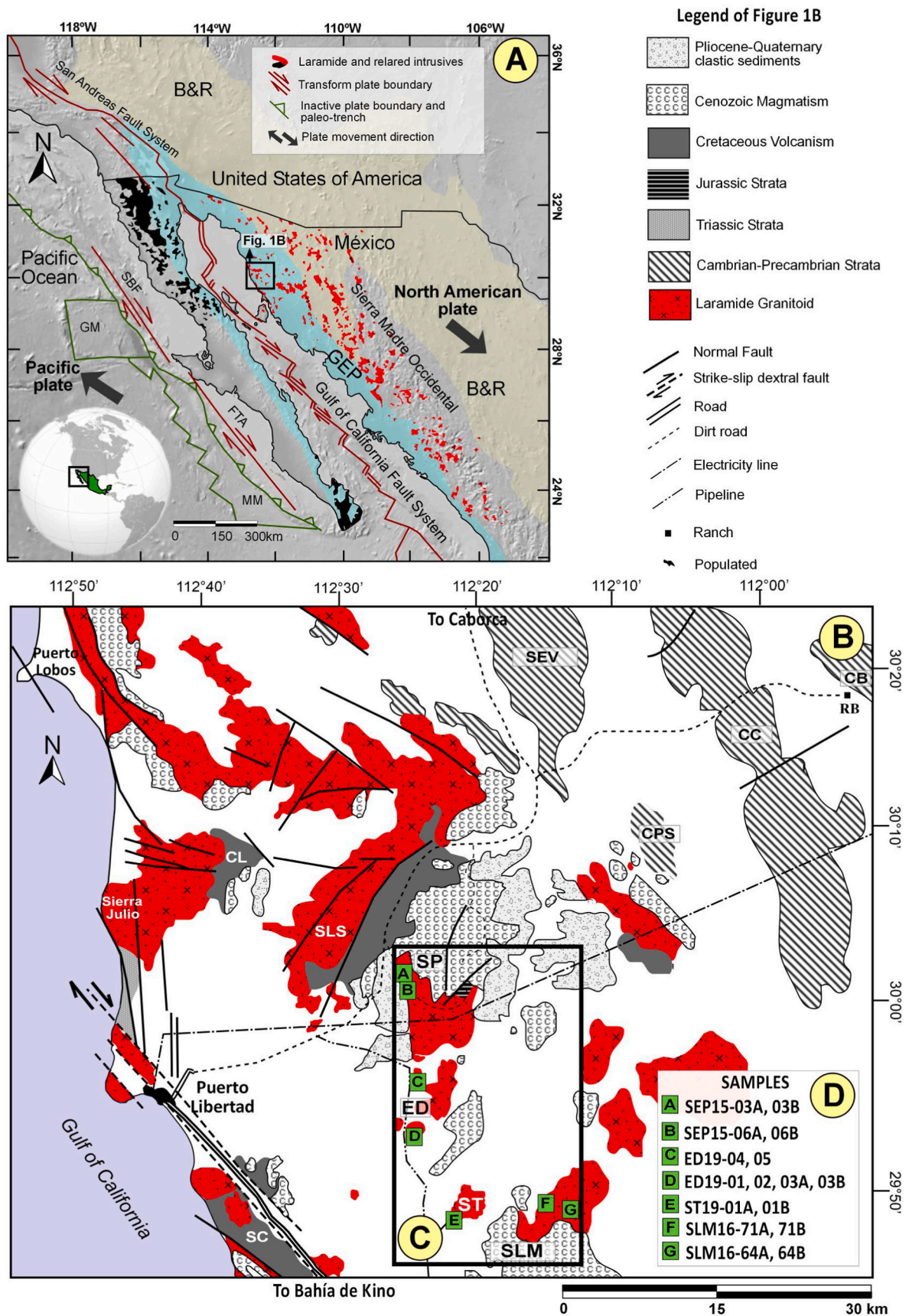
E-mail address: [arturo.barron@unison.mx](mailto:arturo.barron@unison.mx) (A.J. Barrón-Díaz).

<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103996>

Received 10 May 2022; Received in revised form 18 August 2022; Accepted 18 August 2022

Available online 2 September 2022

0895-9811/© 2022 Elsevier Ltd. All rights reserved.



(caption on next page)

**Fig. 1.** Location map of the study area: A) Tectonic map modified after Velderrain-Rojas et al. (2021), showing the San Andreas and Gulf of California transform fault systems (red line), Basin and Range province (B&R) Gulf Extensional Province (GEP), San Benito Fault (SBF), Tosco Abre Ojos Fault (TAF), Guadalupe Microplate (GM), Magdalena Microplate (MM). Laramide magmatism references after Cochemé (1985); Valencia-Moreno et al. (2001, 2021; Ramos-Velázquez et al., 2008; Pérez-Segura et al. (2013); B) Geologic map of Puerto Libertad, costal Sonora, modified from Gastil and Krummenacher (1977); Morales-Morales and Hernández-Rábago (2006); Gómez-Valencia (2014) and García-Huerta (2015). Other localities are: Cerro Libertad (CL), Sierra Cirio (SC), Sierra Los Seris (SLS), Sierra El Viejo (SEV), Cerro Pozo de Serna (CPS), Cerro Calaveras (CC), Cerro Berruga (CB), Rancho Bámori (RB); C) Studied intrusive sites in this work were bounded in green squares: Sierra Picú (SP), El Destierro (ED); Sierra Tordilla (ST), and Sierra Los Mochos (SLM) representative rock samples of the studied localities are indicated with green squares marked with the letters A to G; D) Sample keys for study area in C box.

Hodges, 1989). Miocene hypabyssal intrusives of adakitic composition emplaced after subduction (Gómez-Valencia, 2011; Gómez-Valencia et al., 2015), Miocene granophyric intrusives (Roldán-Quintana et al., 2004; Velderrain-Rojas, 2021) and other Miocene intrusives related to the rift transition stage along the proto-Gulf of California (Velderrain-Rojas, 2021; Velderrain-Rojas et al., 2022).

This work is focused on the Late Cretaceous intrusives widely distributed in the western margin of the North American Cordillera coeval to the initial stages of the Laramide Orogeny (Coney and Reynolds, 1977; Chávez-Cabello et al., 2009), an event with a lifespan initially proposed between 80 and 40 Ma based on extensive geochronology studies (Coney, 1976; Coney and Reynolds, 1977; Iriondo, 2001). Laramide intrusives are calc-alkaline granitoids which formed batholiths dated from 90 to 40 Ma in Sonora (Cochemé, 1985; Damon et al., 1983; Mead et al., 1988; Richard et al., 1989; Wodzicki, 1995; Gans, 1997; Roldán-Quintana, 2002; Calmus et al., 2011; Valencia-Moreno et al., 2006, 2007; Ramos-Vázquez et al., 2008). These intrusives are often referred as Laramide Batholiths (Damon et al., 1983; Ortega-Gutiérrez et al., 2014) and have metallogenic associations (Pérez-Segura et al., 2009; Santillana-Villa et al., 2020). Valencia-Moreno et al. (2021) recently defined, the Laramidic contemporaneous magmatism within the Mexican Fold and Thrust Belt (MTFB) and east from this as the Cretaceous-Eocene Mexican Magmatic Arc (CEMMA). This definition was based on the genetic differences observed while comparing the magmatism from the MFTB and the originally defined as Laramidic magmatism.

Along with the calc-alkaline composition, adakitic signatures have been observed in Cretaceous intrusives from Sonora, Mexico (Aguillón-Robles et al., 2001; Pérez-Segura et al., 2009; Schaaf et al., 2020; Valencia-Moreno et al., 2021), and compared to Cretaceous volcanic arcs from Japan and China, where metallogenic associations with copper-mineralized intrusive occur (e.g., Kamei, 2004; Zhang et al., 2006; Tsuchiya et al., 2007), and that have also been identified in northern Sonora (Pérez-Segura et al., 2009).

Adakites were first defined by Defant and Drummond (1990, 1993) as volcanic and intrusive rocks related to Cenozoic arcs with low Y and high Sr values, however, very similar characteristics have been detected through the study of Archean crustal rocks or TTG (Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite; Martin, 1987, 1999; Smithies, 2000; Martin and Moyen, 2002; Martin et al., 2005). Furthermore, geochemical and experimental petrology have proven that its origin may also be related to melting of continental or oceanic mafic crust (Petford and Atherton, 1996; Zhang et al., 2021).

These adakitic compositions are related to Laramide intrusives which are consistent with the CEMMA distribution, but they are scarcely studied. Therefore, we present the first effort to discriminate between adakites, adakitic affinity and strictly calc-alkaline intrusives in NW Mexico, as well as discussing their geodynamic implications.

## 2. Geological background

Granitoids in the study area are located  $\approx 20$  km east of Puerto Libertad town within the Gulf Extensional Province in the Caborca region (Fig. 1B), which consist of Paleozoic and Mesoproterozoic basement rocks of the Bámori Metamorphic Complex (Longoria et al., 1978), which are discordantly overlaid by Neoproterozoic and Early Paleozoic platform deposits belonging to the passive margin sequence of SW Laurentia

(Eells, 1972; Longoria and González, 1979; Anderson and Silver, 1981; Stewart et al., 1984). The passive margin succession, along with a rift-related volcanic event near the Cambrian-Precambrian boundary (Barrón-Díaz et al., 2019a), is best-exposed northwest of the study area, where they exhibit contact metamorphism caused by Laramide intrusives rock (Barrón-Díaz et al., 2019b, 2019c). Triassic outcrops in the region, observed as large roof pendants inside Cretaceous batholiths, are represented by metasediments, schist and gneisses, probably correlated to the Triassic-Jurassic Antimonio Formation (Jurassic Strata, Fig. 1B, González-León, 1980), which is discordantly overlaid by Jurassic turbiditic facies (Fig. 1B, Morales-Morales and Hernández-Rábago, 2006). Similar relations involving Laramide Cretaceous granitoids were observed at Sierra Picú, where the granitoids intrude volcanoclastic and carbonate successions (Gastil and Krummenacher, 1977) and the late Cretaceous Tarahumara Formation (McDowell et al., 2001; Roldán-Quintana, 2002; García-Huerta, 2015). Finally, a representative Neogene adakitic arc is present in Sierra Picú and Sierra Los Mochos (Gómez-Valencia, 2014, 2022). In addition, abundant outcrops of tholeiitic and alkaline volcanic rocks interpreted to be related to the Proto-Gulf of California, are widely distributed at the Sierra Los Mochos locality (Gómez Valencia et al., 2021A; Gómez-Valencia, 2022).

## 3. Analytical methods

### 3.1. Whole-rock geochemistry and EMPA

A total of 15 granitoid samples were selected for major element geochemistry by XRF using standards from Instituto de Geología IGLseries, produced at the Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM) at Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Mexico, following the methodology of Lozano-Santa Cruz and Bernal (2005). Additionally, eight of these samples were selected for trace element and REE determinations. Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) analyses were conducted at ALS CHEMEX Laboratories. Mineral chemistry analyses, using carbon coated polished thin sections, were made in a CAMECA SX100 microprobe hosted at the Michael J. Drake Electron Microprobe Analyses (EMPA) Laboratory at the University of Arizona. EMPA results and detailed analyses may be found in the Supplementary File 2.

### 3.2. U–Pb zircon geochronology

Zircon mineral separation of four granitoids were conducted at the Laboratorio de Caracterización Mineral (CarMINLab) at the Centro de Geociencias, UNAM, using conventional methods (crushing, sieving, magnetic separation, and heavy liquids). Transmitted and reflected-light photos (not shown), and scanning electron microscope-cathodoluminescence images (SEM-CL) were taken of all mounted zircon grains to aid in the spot selection for laser ablation ICP-MS studies. The CL images were used to reveal internal zoning related to chemical composition variations to avoid possible problematic areas within grains (Fig. 6C, F, 6I, 6L).

U–Th–Pb zircon geochronology of the granodioritic samples from Sierra Picú (SEP15-03A), El Destierro (ED19-05), Sierra Tordilla (ST19-01) and Sierra Los Mochos (SLM16-71B) were conducted in the Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) at Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, using a Resonetics Workstation

model M050 equipped with a LPX220 excimer laser coupled with a Thermo ICap Qc quadrupole ICP-MS (inductively coupled plasma–mass spectrometer), following analytical techniques similar to those reported in previous publications by Solari et al. (2010) and González-León et al. (2017).

## 4. Results

### 4.1. Field relations and petrography

Petrographic descriptions of intrusive rocks and dikes, and Mafic Microgranular Enclaves (MME) are presented in Supplementary File 1.

#### 4.1.1. Sierra Picú

The granitoids outcrops in the western portion of Sierra Picú (Fig. 1B), and cover an area of ~4 km<sup>2</sup> forming an alignment oriented towards 340°. These intrusives are cut by intermediate-mafic Miocene dikes orientated towards 330°–315° (Gómez-Valencia, 2014). Mesocratic monzodiorites and granodiorites exhibit equigranular textures with large crystals (1–8 mm) and a mineral association of Pl > Fk > Qz > Bt > Hbl > Opx > Cpx > Ox > Zn > Ap (Fig. 2E, F, 2G and Supplementary File 1) and occasionally clusters of Bt > Opx > Ox. Abundant Mafic Microgranular Enclaves (MME) of dioritic composition such as Cpx > Hbl > Bt > Pl > Ox > Zn were distinctive among the granitic rocks. Monzogranites and granodiorites exhibit occasional alteration of plagioclase and feldspar to sericite (Fig. 1E); selective alteration showing epidote in biotite, actinolite from mafic minerals (Hbl, Cpx, Opx), and significant oxidation along fractures, a visible feature at both the petrographic and outcrop scales.

#### 4.1.2. El Destierro

In the El Destierro region crops out ~10 km<sup>2</sup> (Fig. 1B) of granitic rocks in low ranges aligned in an irregular N–S orientation. Typical weathering as large blocks (Fig. 2C) are commonly seen, along with aplite-pegmatite dikes (Fig. 2C), brittle meso- and micro-fracturing (Fig. 2D, L). Intrusives in this locality are classified as monzogranite and granodiorite with a dominant mineralogic association of Qz > Pl > Fk > Anf > Bt > Ox > Sp > Zn (Fig. 2H, I, J, K, L, M and N) and propylitic alteration (Chl + Act + Ca + Ep + Ser + Qz) observed in meso and microscopic scales. Both equigranular and inequigranular textures were observed, as well as perthitic and myrmekitic textures (Fig. 2H). Matching melanocratic MME (Fig. 2C) with monzodioritic composition were found. Syenogranitic dikes (Fig. 2C) with Qz > Pl > Fk > Bt > Ser > Ox and argillic alteration were also common in this location. N–S faulting locally affects the outcrops, causing cataclastic zones in the granite and partial orientation, a feature that is best observed under a petrographic microscope (Fig. 2L).

#### 4.1.3. Sierra Tordilla

Intrusives in Sierra Tordilla (ST) are distributed in an area of ~3.5 km<sup>2</sup>, where, unlike previous localities, hills are orientated N–NE and the granitoids show a distinctive spheroidal weathering. Actinolite and sericite alteration is common in Fe–Mg minerals and feldspar, respectively (see Supplementary File 1). Intrusives in this locality were classified as granodiorites with coarse inequigranular crystals and a mineral association of Pl > Fk > Qz > Bt > Hbl > Ox > Zn > Sp > Ap (Fig. 2P). Occasional perthitic and myrmekitic textures were observed as well as abundant melanocratic spheroidal MME with monzodioritic compositions (Bt > Hbl > Ox > Pl > Fk > Zn > Sph > Ser; Figure 2P).

#### 4.1.4. Sierra Los Mochos

The Sierra Los Mochos (SLM) locality consists of two main granitic outcrops distributed in ~4.3 km<sup>2</sup>. The western intrusive (Fig. 1C) is a leucocratic inequigranular monzogranite with medium size crystals and Fk > Pl > Qz > Bt > Hbl > Ox > Zn > Ap mineralogy (Figure 2R, S). The monzogranite shows selective oxidation along fractures, adding a

particular pink color to the rock. The eastern intrusive (Fig. 1C) is a leucocratic inequigranular monzogranite with medium to coarse-grained crystals and a mineral association of Fk > Pl = Qz > Bt > Ox > Zn > Ap (Figure 2Q), where selective oxidation in biotite was observed. Both intrusives show abundant faults and fractures following a preferred NE–SW orientation.

### 4.2. Mineral chemistry and geothermobarometry

Microanalyses for mineral chemistry from amphiboles and plagioclase (Supplementary File 2) were performed in granodiorites from El Destierro (ED19-05) and Sierra Tordilla (ST19-01A) localities, which show well-preserved amphiboles. Granitoids from Sierra Picú and Sierra Los Mochos were absent of fresh amphibole, now altered to actinolite, making them unsuitable for geothermobarometry calculations. Magnesio-hornblende was the main amphibole observed (Fig. 3A). Pairs of these amphiboles with adjacent plagioclase crystals, where no reaction was observed between the two crystals, were chosen. Using this pair of minerals, geothermobarometric calculations were made, providing temperatures of 711 °C ( $\sigma = 20.30$ ) and 740 °C ( $\sigma = 12.39$ ) for Sierra Tordilla and El Destierro, respectively, and pressures of 1.67 ( $\sigma = 0.51$ ) and 2.43 kbar ( $\sigma = 0.27$ ). Calculations for temperature and pressure were made using the Holland and Blundy (1994) geothermometer considering an edenite–tremolite calibration reaction for temperature and edenite–richterite calibration reaction for pressure. Obtained pressures suggest a depth of emplacement from ~5 to 6 km considering a conversion of 1 kb = 2.7 km, although lower pressures may be obtained if different calibration reaction are considered (see Supplementary File 3). Several calculations from other geothermometers and geobarometers obtained in the WinAmptb software from Yavuz and Doner, 2017 for this study intrusives show similar results. Geothermobarometry calculations can be found in Supplementary File 3. Additionally, temperatures of zircon crystallization were calculated using Ti (ppm) values and the equations proposed by Watson et al. (2006), which yield an average temperature of 721 °C, 673 °C, 713 °C and 664 °C, for the intrusives of El Destierro, Sierra Los Mochos, Sierra Picú and Sierra Tordilla, respectively (Fig. 4).

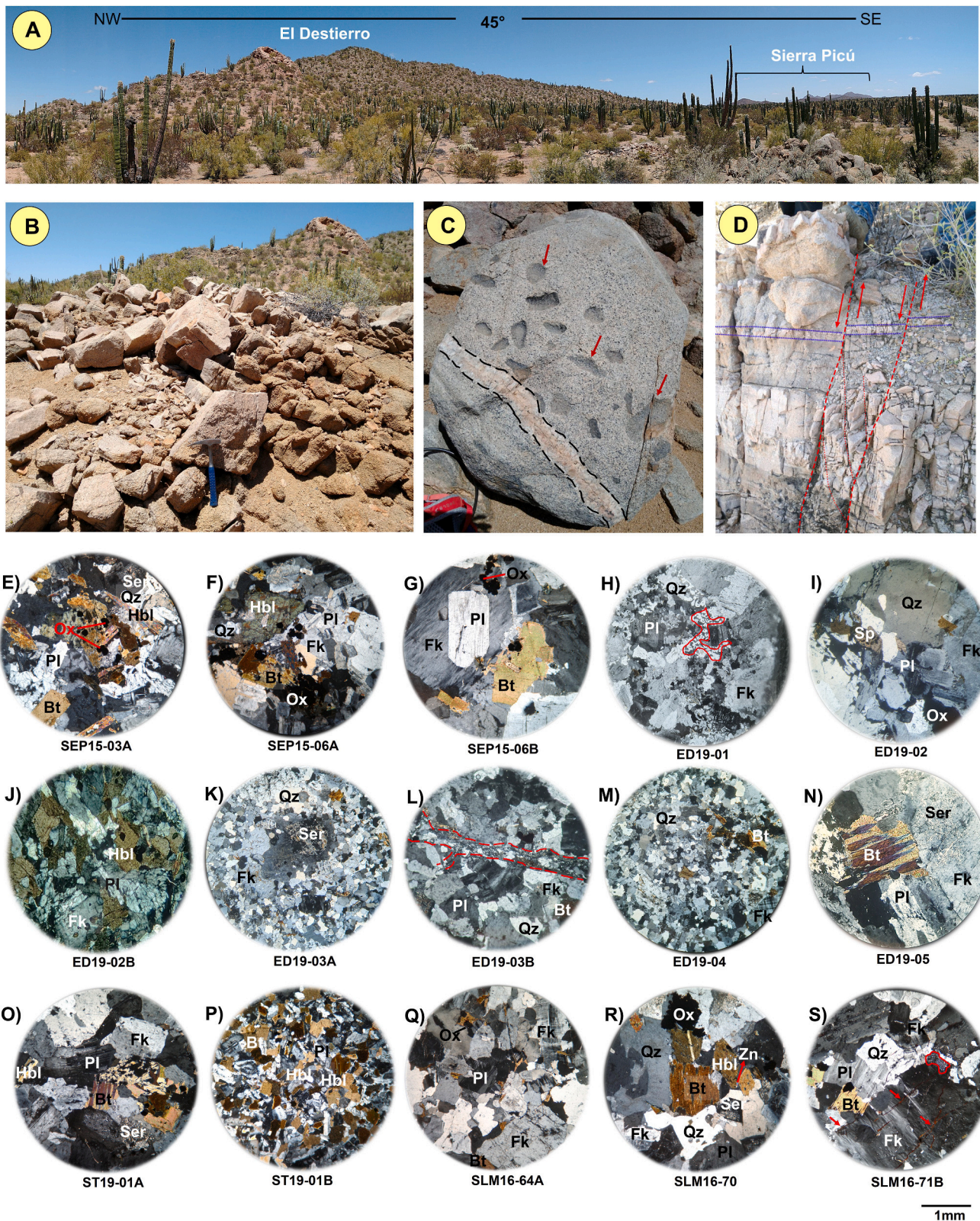
### 4.3. Major and trace element geochemistry

Geochemical results from intrusives, dikes and Mafic Microgranular Enclaves are shown in Table 1. Major elements analyses were recalculated for anhydrous values. The software IGPET 2007 (Carr and Gazel, 2017) was used for elaboration of geochemical diagrams.

As a comparison, the 15 samples analyzed with FRX were plotted in the TAS diagram after (Cox et al., 1979; Fig. 5A), where variations of SiO<sub>2</sub> ranges from 56 to 75.92% in the intrusive rocks, from 72.60 to 75.90% in the dikes and from 52.46 to 57.09% for the MME. Intrusive bodies show moderate Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (13.21–17.21%), while dikes exhibit low values (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 13.41–14.09%) and low concentrations of Na<sub>2</sub>O (2.93–8.27%). Fig. 5A also exhibits the predominantly sub-alkaline characteristics of the granitoids studied in this work, except for the intermediate dikes, which show a transition from sub-alkaline to alkaline domains. Additionally, 162 samples of similar Laramidic intrusives from Sonora, obtained from previous works, are plotted as a comparison field in Figs. 5 and 9.

Fig. 5B shows the CIPW norm rock classification diagram (Streckeisen and Le Maitre, 1979), where the intrusives plot as syenogranite, monzogranite and granodiorite fields (Fig. 5A; Supplementary File 1). The intrusive rocks from Sierra Picú, El Destierro and Sierra Tordilla plot in the granodiorite and monzogranite fields, while samples from Sierra Los Mochos plot in monzogranite. Samples of MME from the intrusives plotted in the monzonite and syenodiorite field in Fig. 5A and in the monzodiorite boundary in Fig. 5B. Most samples show high K<sub>2</sub>O values (3.55% avg., Fig. 5C, Peccerillo and Taylor, 1976) except for one MME, from Sierra Picú locality, that plots in the very high-K field.





**Fig. 2.** Outcrop features and petrographic characteristics of granitoids from the Puerto Libertad, Sonora: A) Panoramic view of the El Destierro locality showing the typical geomorphology; B) Photograph from intrusives with common block weathering, El Destierro locality; C) Intrusive rock with spheroidal weathering where Mafic Microgranular Enclaves (MME red arrows) and a pegmatite dike (black dashed line) are observed; D) Brittle structures affecting both intrusives and dikes; E) Granodiorite, Sierra Picú; F) Monzodiorite, Sierra Picú; G) Granodiorite, Sierra Picú; H) Monzogranite, El Destierro; I) Granodiorite, El Destierro; J) Monzodiorite, El Destierro; K) Syenogranite aplitic dike, El Destierro; L) Protocataclasite, El Destierro; M) Syenogranite, El Destierro; N) Granodiorite, El Destierro; O) Granodiorite, Sierra Tordilla; P) Monzodiorite MME, Sierra Tordilla; Q,R,S) Monzogranites, Sierra Los Mochos. Mineral abbreviations: Fk = feldspar, Bt = biotite, Pl = plagioclase, Qz = quartz, Ser = sericite, Hbl = hornblende, Ox = oxides, Sp = sphene, Zn = zircon.

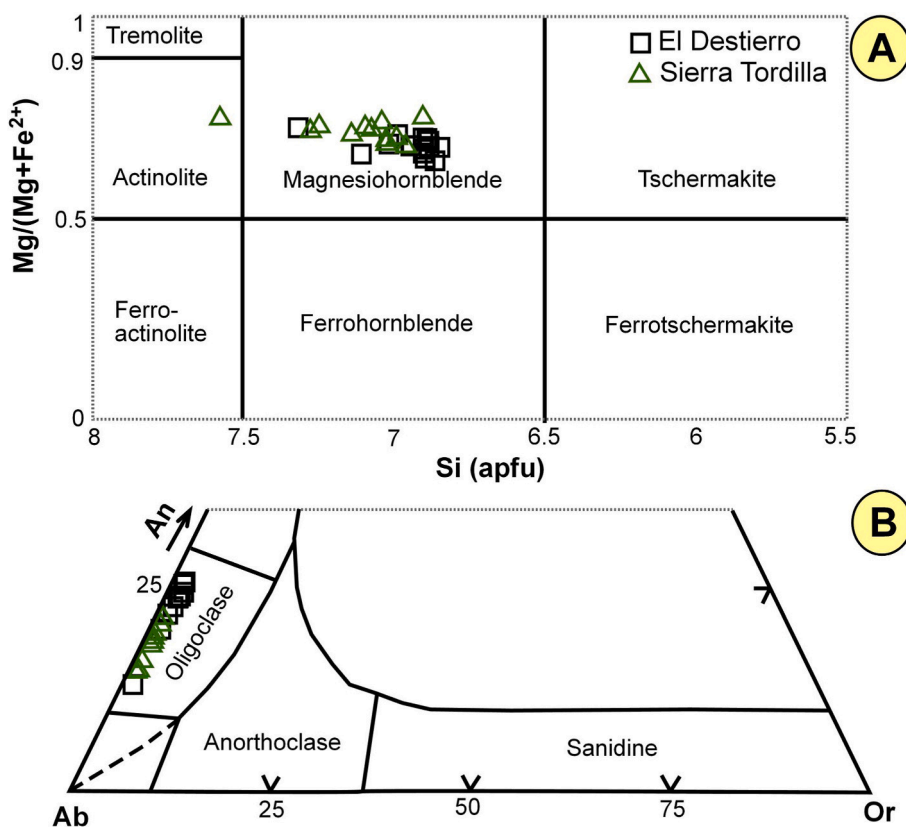


Fig. 3. Electron Microprobe Analyses (EMPA) results: A) Amphibole classification diagram from Leake et al. (1997); B) Ab-An-Or diagram detail for feldspars nomenclature.

The alumina saturation diagram (Maniar and Piccoli, 1989) suggest a metaluminous tendency ( $Al/[Ca + Na + K] > 1$ ), which allows the classification of the granitoids as type I granites (Fig. 5D). For trace elements discussion, eight samples analyzed through ICP-MS were taken. The REE diagram, normalized to Chondrite CI from Sun and McDonough (1989), shows similar plots between the intrusives, dikes and mineral concentration. An enrichment in LREE and depletion of HREE was observed. All samples plot inside the field of Sonora intrusives. Negative Eu anomalies were observed in granitoids from Sierra Picú, El Destierro and Sierra Tordilla ( $Eu^* = 0.70\text{--}0.88$ ) and slightly positive Eu anomalies in Sierra Los Mochos ( $Eu^* = 1.01\text{--}1.18$ ; Fig. 5E).

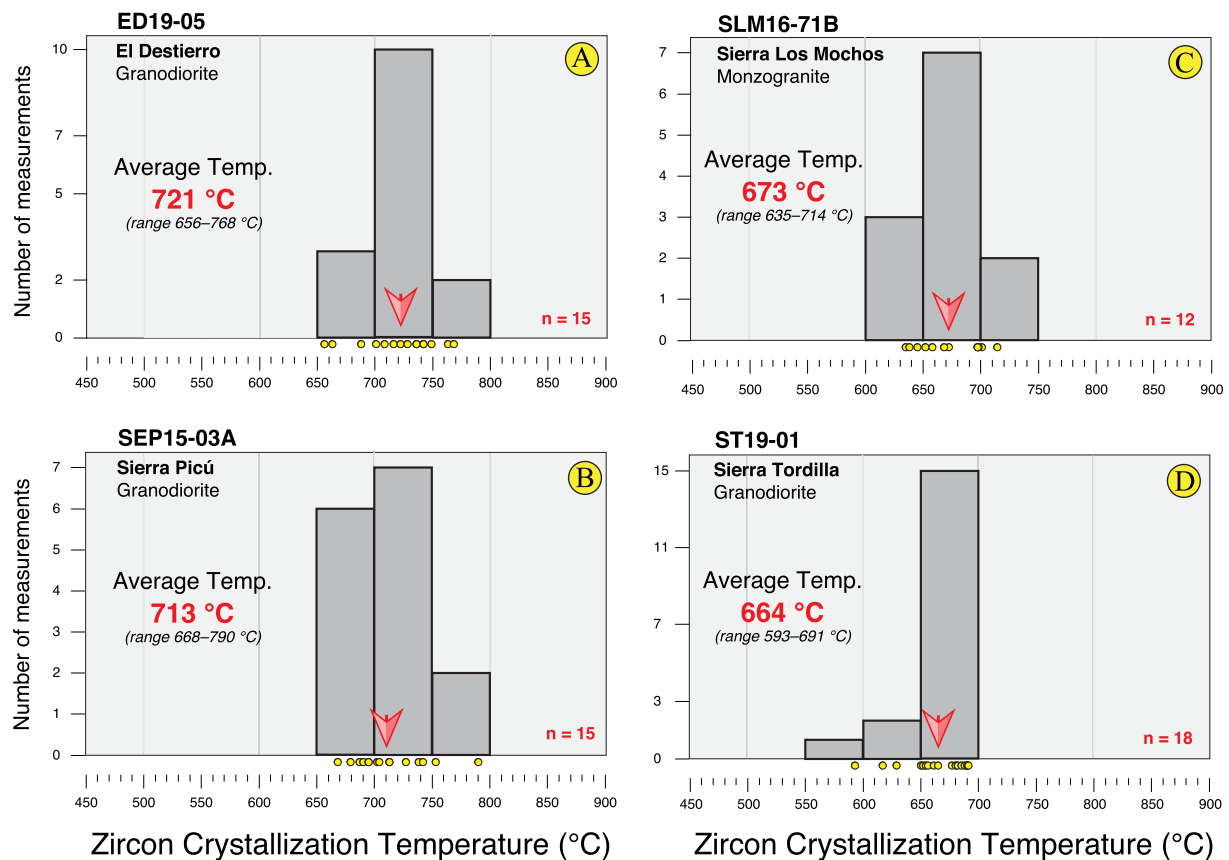
Spider diagram plots, normalized with primitive mantle from Sun and McDonough (1989), show a parallel spectrum for all granitoid samples. An enrichment in LILE elements is observed in most of the samples, the common negative anomaly in Nb-Ta is well represented, as well as the negative anomalies in P and Ti and positive in K and Pb, a common feature in calc-alkaline related intrusives in the region. (Fig. 5F). Moreover, HREE show very low values of Y (8.5–17.8 ppm) and Yb (0.86–1.73 ppm), and samples from Sierra Los Mochos exhibit the lowest values (Y = 5.7–7.2 ppm; Yb = 0.75–0.76 ppm). High concentrations of Sr (507–596 ppm) and Ba (680–1498 ppm) and low concentrations of  $(La/Yb)_N = 17.24\text{--}23.66$  and  $Sr/Yb = 29.49\text{--}63.18$  are consistent with proposed geochemical discrimination values for defining adakites (Defant and Drumond, 1990). The Y vs  $Sr/Y$  and  $Yb_N$  vs  $La_N/Yb_N$  diagrams (Fig. 6A y B), show a consistent behavior and the  $MgO/SiO_2$  diagram show that they are high silica adakitic rocks (Fig. 6C).

#### 4.4. U–Pb zircon geochronology

Representative intrusives rocks from Sierra Picú, El Destierro, Sierra Tordilla and Sierra Los Mochos were dated using U–Pb zircon geochronology to establish their crystallization ages. In cathodoluminescence analyses, zoned and translucent zircons were used (Fig. 7C, F, I, L). The U–Pb zircon geochronology data from four granitoids were plotted in Tera-Wasserburg concordia diagrams (Fig. 7A, D, G and J), where discordant and disperse measurements were not included in the age calculations. Results show Late Cretaceous crystallization ages of  $71.9 \pm 0.7$  Ma (2s, MSWD = 1.2, n = 15, Fig. 7A) for Sierra Picú and  $72.7 \pm 1.0$  Ma (2s, MSWD = 2.2, n = 15, Fig. 7D) for El Destierro. Slightly older ages were obtained for intrusives from Sierra Tordilla, with an age of  $74.5 \pm 0.9$  Ma (2s, MSWD = 3.2, n = 18, Fig. 7G) and Sierra Los Mochos, with an age of  $74.9 \pm 1.0$  Ma (2s, MSWD = 2.0, n = 12, Fig. 7J). Although they are almost coeval, these intrusives exhibit a N–S variation being slightly younger northward. U–Th–Pb analytical data for LA-ICPMS spot analyses on zircon grains are presented in Supplementary File 4.

## 5. Discussion

The granitoids from Sierra Picú, El Destierro, Sierra Tordilla and Sierra Los Mochos localities show similar petrography and geochemical characteristics with contemporaneous Late Cretaceous intrusives in Sonora (Valencia-Moreno et al., 2021). Other features include a N–S/NW–SE alignment of outcrops, granodioritic to syenogranitic



**Fig. 4.** Temperatures of zircon crystallization using Ti (ppm) values and the equations proposed by [Watson et al. \(2006\)](#); A) El Destierro granodiorite; B) Sierra Picú granodiorite; C) Sierra Los Mochos monzogranite; D) Sierra Tordilla granodiorite.

compositions with abundant MME and calc-alkaline trends. Aplitic and pegmatitic dikes are abundant, including lamprophyres which are scarce in the studied localities, in comparison to other localities in Sonora where they have been described in detail ([Orozco-Garza et al., 2013](#)). Ages are also consistent with proposed isochrons for the estimated time contours of the Laramide plutonism as described by [Valencia-Moreno et al. \(2006\)](#), although the increasing dating of these intrusives has proved a wide dispersion of ages in Sonora, where the scale of the studied area must be considered in order to observe a linear migration toward the continent.

Geochemistry of the studied Cretaceous intrusives show characteristics of adakitic magmatism. This feature is scarcely studied in NW Mexico intrusives rocks. Nevertheless, adakitic magmatism from Oligocene to Late Miocene has been studied in Sonora, Baja California and Baja California Sur, which dominantly corresponds to volcanic flows, pyroclastic deposits and hypabyssal intrusives associated to the late subduction stages ([Pallares et al., 2008](#); [Vidal-Solano, 2005](#); [Gómez Valencia et al., 2015](#)), post-subduction event ([Pallares et al., 2008](#); [Calmus et al., 2008](#); [Sosa-Ceballos et al., 2019](#)), and the syn-rift stage ([Gómez-Valencia et al., 2021B](#) and [Gómez-Valencia, 2022](#)).

Combined, these previous studies suggest that the terminology of adakites, adakitic affinity and adakitic tendency, is not strictly associated to a subduction setting ([Castillo, 2006](#)), although, they can be related to an orogenic setting, as it happens with the intrusives in the present study.

### 5.1. Geothermobarometry

Geothermobarometry studies from Late Cretaceous to early Cenozoic intrusives in Sonora are scarce. [Barrón-Díaz et al. \(2019C\)](#) presented some initial geothermobarometric estimates for Laramidic granitic rocks

in the nearby Bámori region, where a granodiorite yielded 664 °C and 1.34 kb of temperature/pressure, which correspond to a depth of approximately 4 km for granitoid emplacement. [Zúñiga-Hernandez \(2010\)](#) reported similar results (1.72 kb and 700 °C) for an intrusive 120 km NE from Hermosillo city in central Sonora. El Destierro and Sierra Tordilla geothermobarometry results show similar temperature ranges (711–740 °C) and slightly higher pressure (1.67–2.43 kb), compared to these previous studies, suggesting that the intrusives were emplaced at depths between 5 and 6 km. These shallow depths of emplacement suggest that the exhumation process of the Laramide orogenic event could be restricted to the shallowest bodies during to the of the Basin and Range Miocene extension event ([Stock and Hodges, 1989](#); [Bennett et al., 2013](#); [Vidal-Solano et al., 2013](#); [Darin et al., 2016](#); [Velderrain-Rojas et al., 2022](#)). Although, additional geothermobarometry studies are required to confirm this inference and determine a more detailed emplacement history for these intrusives.

### 5.2. Adakite, adakitic affinity and calc-alkaline intrusives: A geochemical assessment

Arc-magmatism exhibits geochemical features that depend on the thermal characteristics of the subducting oceanic plate and the metamorphic reactions under different conditions of pressure and temperature affecting the subducting slab ([Poli and Schimdt, 2002](#)). The adakitic magmatism is the result of a modification in these conditions (e.g. temperature) during the melting process ([Defant and Drummond, 1990](#)).

It is proposed that adakites develop in subduction settings where the slab melting occurs before his dehydration, instead of a common setting where the slab dehydrates just before reaching the melting point ([Defant and Drummond, 1990](#)). This is only a generalized scenario regarding the hypothesis about the genesis and origin of the igneous suites called

**Table 1**

Major and trace elements analyses and CIPW norm results for the Puerto Libertad granitoids, dikes and Mafic Microgranular Enclaves (MME, nm = not measured).

LOCALITY	SIERRA PICÚ				EL DESTIERRO						SIERRA TORDILLA		SIERRA LOS MOCHOS			
	Sample	SEP15-03A	SEP15-03B	SEP15-06A	SEP15-06B	ED19-01	ED19-02	ED19-02B	ED19-03A	ED19-04	ED19-05	ST19-01A	ST19-01B	SLM16-64	SML16-70	SML16-71B
	Rock type	Intrusive	MME	Intrusive	Intrusive	Dike	Intrusive	MME	Dike	Dike	Intrusive	Intrusive	MME	Intrusive	Intrusive	Intrusive
		Granodiorite	Diorite	Monzodiorite	Granodiorite	Monzogranite	Granodiorite	Monzodiorite	Syenogranite		Granodiorite	Granodiorite	Monzodiorite	Monzogranite		
Latitude	362221	362222	361793	361834	362824	362891	362891	362892	361852	361895	367017	367017	379813	375829	375846	
Longitude	3323427	3323413	3322620	3322596	3307310	3307511	3307511	3307460	3313539	3313545	3298876	3298876	3296336	3296899	3297313	
<b>Major (%)</b>																
SiO <sub>2</sub>	65.36	56.71	60.60	67.44	72.60	68.10	57.09	74.61	75.90	65.94	67.81	52.46	73.90	75.92	75.80	
TiO <sub>2</sub>	0.62	0.93	0.53	0.52	0.30	0.50	0.91	0.21	0.13	0.60	0.49	1.25	0.17	0.12	0.09	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.40	17.09	17.21	15.61	14.09	15.59	17.27	13.68	13.41	16.23	15.83	18.63	14.31	13.21	13.56	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.97	7.66	4.08	3.58	2.07	3.29	7.80	1.30	0.70	3.98	3.37	9.68	1.01	0.98	0.72	
MnO	0.06	0.14	0.05	0.05	0.03	0.06	0.13	0.02	0.01	0.06	0.05	0.15	0.02	0.01	0.02	
MgO	1.61	3.96	0.16	1.38	0.63	1.16	3.76	0.26	0.16	1.52	1.31	4.46	0.39	0.18	0.13	
CaO	3.80	6.08	4.31	3.53	1.72	3.35	4.19	1.08	0.94	3.59	3.33	4.33	1.68	1.26	1.15	
Na <sub>2</sub> O	4.01	4.66	8.27	3.79	3.35	4.10	4.69	3.20	3.16	3.99	3.93	4.55	3.96	2.93	3.16	
K <sub>2</sub> O	3.29	1.60	1.02	3.52	4.76	3.18	2.62	5.13	5.14	3.55	3.60	3.47	4.13	5.08	5.05	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.18	0.23	0.16	0.17	0.08	0.16	0.28	0.05	0.04	0.18	0.16	0.41	0.09	0.02	0.03	
LOI	0.71	0.95	3.62	0.42	0.36	0.53	1.27	0.47	0.40	0.36	0.12	0.61	0.35	0.29	0.30	
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
<b>Trace (ppm)</b>																
Ba	912	523	333	908	749	773	624	760	843	1130	1020	654	1485	1056	813	
Cr	10	40	154	98	10	10	226	154	14	10	10	183	<10	55	<10	
Cs	2	2	nm	nm	2	2	nm	nm	nm	2	2	nm	4	nm	8	
Ga	20	23	nm	nm	17	21	nm	nm	nm	22	20	nm	21	nm	16	
Hf	5	6	nm	nm	3	4	nm	nm	nm	6	4	nm	4	nm	2	
Nb	15	15	11	9	9	13	12	10	18	14	10	13	8	0	8	
Rb	103	96	47	112	150	95	172	187	124	108	116	226	148	132	191	
Sn	2	2	nm	nm	1	2	nm	nm	nm	2	1	nm	<1	nm	1	
Sr	575	525	297	525	303	508	346	216	232	625	537	352	365	274	237	
Ta	1	1	nm	nm	1	1	nm	nm	nm	1	1	nm	1	nm	1	
Th	15	10	20	13	13	15	8	31	9	12	6	13	11	12	27	
U	3	5	nm	nm	4	4	nm	nm	nm	3	2	nm	1	nm	5	
V	75	164	97	97	31	56	155	60	46	73	60	187	14	47	9	
W	<1	1	nm	nm	1	1	nm	nm	nm	1	1	nm	1	nm	1	
Y	12.6	17.8	nm	nm	7.1	11.3	nm	nm	nm	12.3	8.5	nm	7.2	nm	5.7	
Zr	197	194	129	136	103	162	146	100	81	216	143	186	112	97	72	
Co	9	20	9	8	4	7	21	3	2	10	8	26	2	3	2	
Ni	13	23	13	12	12	13	31	11	9	15	16	29	10	10	12	
Cu	10	45	2	12	18	6	19	6	4	6	10	69	4	4	11	
Zn	50	106	20	50	35	50	132	23	12	57	53	167	22	16	17	
Pb	11	10	8	11	20	13	15	18	17	13	16	15	23	19	29	
<b>REE (ppm)</b>																
La	37.8	41.6	nm	nm	28.2	35.2	nm	nm	nm	35.3	22.9	nm	27	nm	19	
Ce	72.50	67.70	nm	nm	46.70	66.10	nm	nm	nm	65.00	43.50	nm	48.70	nm	28.30	
Pr	7.82	7.12	nm	nm	4.76	7.13	nm	nm	nm	7.55	5.13	nm	4.84	nm	2.97	
Nd	26.8	26.6	nm	nm	15.6	23.3	nm	nm	nm	25.3	17.9	nm	15.3	nm	8.8	
Sm	4.67	5.48	nm	nm	2.55	4.26	nm	nm	nm	4.05	3.15	nm	2.58	nm	1.28	
Eu	1.13	1.20	nm	nm	0.58	0.90	nm	nm	nm	1.08	0.81	nm	0.74	nm	0.45	
Gd	3.46	4.71	nm	nm	1.94	3.03	nm	nm	nm	3.25	2.32	nm	1.71	nm	0.97	
Tb	0.46	0.64	nm	nm	0.25	0.35	nm	nm	nm	0.43	0.31	nm	0.25	nm	0.16	
Dy	2.45	3.70	nm	nm	1.40	2.28	nm	nm	nm	2.29	1.61	nm	1.27	nm	0.98	
Ho	0.44	0.67	nm	nm	0.25	0.39	nm	nm	nm	0.43	0.29	nm	0.24	nm	0.21	
Er	1.36	1.70	nm	nm	0.73	1.08	nm	nm	nm	1.20	0.88	nm	0.77	nm	0.55	

(continued on next page)

Table 1 (continued)

LOCALITY	SIERRA PICÚ			EL DESTIERRO			SIERRA TORDILLA			SIERRA LOS MOCHOS					
	SEP15-03A	SEP15-03B	SEP15-06A	SEP15-06B	ED19-01	ED19-02	ED19-02B	ED19-03A	ED19-04	ED19-05	ST19-01A	ST19-01B	SML16-64	SML16-70	SML16-71B
Sample	Intrusive	MME	Intrusive	Intrusive	Dike	Intrusive	MME	Dike	Dike	Intrusive	Intrusive	MME	Intrusive	Intrusive	Intrusive
Rock type	Granodiorite	Diorite	Monzodiorite	Granodiorite	Monzogranite	Granodiorite	Monzodiorite	Syenogranite	Dike	Granodiorite	Granodiorite	Monzodiorite	Monzogranite	Monzogranite	Intrusive
Tm	0.2	0.3	nm	nm	0.11	0.15	nm	nm	nm	0.19	0.13	nm	0.11	nm	0.1
Yb	1.28	1.73	nm	nm	0.72	1.23	nm	nm	nm	1.07	0.86	nm	0.76	nm	0.75
Lu	0.19	0.27	nm	nm	0.1	0.16	nm	nm	nm	0.18	0.12	nm	0.11	nm	0.12
<i>CIPW norm</i>															
Q	18.14	4.12	1.94	21.52	28.66	22.28	3.32	31.82	33.59	18.33	21.12	0.00	29.08	29.08	33.37
or	19.65	9.53	6.10	21.03	28.53	18.99	15.64	30.80	30.84	21.14	21.40	20.56	24.60	24.60	30.27
ab	36.40	42.17	75.12	34.41	30.51	37.20	42.54	29.20	28.82	36.12	35.51	40.01	35.85	35.85	28.78
an	17.22	21.16	6.91	15.36	8.13	14.90	18.52	5.11	4.47	16.02	15.02	18.86	7.81	7.81	5.59
di	0.52	6.19	2.48	0.98	0.00	0.67	0.51	0.00	0.00	0.60	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00
hy	4.57	12.48	0.00	3.48	1.76	2.90	15.05	0.73	0.45	4.35	3.42	0.00	1.09	1.09	0.36
il	0.87	1.31	0.75	0.73	0.42	0.70	1.28	0.03	0.02	0.84	0.69	1.75	0.03	0.03	0.03
ap	0.38	0.48	0.34	0.36	0.17	0.34	0.59	0.11	0.08	0.38	0.34	0.86	0.19	0.19	0.06

“adakites” or showing a “adakitic affinity”, which has provoked numerous discussions due to the differences with the Adak Island magmatism and because of the variation in the geochemical composition for these rocks (Crawford et al., 1989). Therefore, a wide arrange of volcanic and plutonic rocks may be used as the source for adakites (Castillo, 2006), as noted by Zhang et al. (2021), by suggesting that adakites are recognized in a wide range of ages, and numerous genetic processes can explain their origin.

Adakites are rocks that strictly meet the petrological definition initially established by Defant and Drummond (1990) for rocks of intermediate to felsic composition such as andesite, dacites, rhyolites and their plutonic equivalents, which have SiO<sub>2</sub> contents higher than 56%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> higher than 17% (rarely lower percentage), MgO lower than 3% (rarely above 6%), low concentrations of heavy rare earth elements (HREE) with Y and Yb values lower than 18 and 19 ppm respectively, high values of Sr (rarely lower than 400 ppm), <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratios lower than 0.7040, in addition to a Sr/Y discrimination diagram as a function of Y, where adakites stand out of their low Y and high Sr contents, a characteristic related to mineralogy, specially the presence of amphibole in these rocks). However, at present, several authors (Smithies, 2000; Moyen, 2009; Zhang et al., 2021) in the search for a better understanding of adakitic magmatism, have found the importance of considering Na<sub>2</sub>O values relative to 3.5–7.5%, low values of K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O approximate to 0.42%, as moderate contents of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MgO + MnO + TiO<sub>2</sub> approximate to 7%, high Mg# approximate to 51, Ni contents higher than 24 ppm and Cr higher than 36 ppm. Otherwise, rocks with an adakitic affinity lack of any of the established geochemical indicators, where Castillo (2006) and Zhang et al. (2021) mention that any inference must consider uncertainties in the data and regional geological background. The effectiveness of ICP-MS analyses over FRX in trace elements such as Y and Yb (key elements for adakites discrimination) should also be considered.

Considering the uncertainty of the nomenclature proposed by Zhang et al. (2021) for the case of the intrusive rocks of Sonora, Mexico, in this work we propose a reevaluation of the geochemical classification of granitoids published in the literature, which have been classified as classic calc-alkaline magmatism related to the Laramide arc, in comparison with the adakites and adakitic affinity intrusive rocks from Puerto Libertad Sonora, which are the subject of this work.

Therefore, we used the extensive database of laramidic rocks compiled by Valencia-Moreno et al. (2021) to select reference samples (Supplementary File 5) using as a selection criterion that the samples had geochronological ages. To discriminate between classic arc magmatism from adakitic magmatism, the geochemical criteria, established by Defant and Drummond (1990), was used. Samples showing adakitic affinity were selected from samples missing only one of the discriminating criteria for adakites, which generally coincided in exceeding the proposed values for Y and Yb of differing either in the concentration of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O. Not all the elements were available due to the lack of analytical data in the literature.

The geochemical diagrams developed in this work propose to emphasize the discrimination between classic calc-alkaline arc magmatism, adakites and adakitic affinity magmatism (Fig. 8). In the spatial distribution of these intrusives (Fig. 8A), the coexistence of both calc-alkaline and adakitic magmatism is evident in the eastern, central and coastal sectors of Sonora, whose temporal distribution (Fig. 8B) confirms a contemporaneity regardless of the geographic location (Fig. 8A). Moreover, considering Sr a key element in the determination of adakites (Defant and Drummond, 1990; Castillo, 2006), with values rarely lower than 400 ppm, for some samples from the literature proposed in this work as adakitic intrusives or with adakitic affinity, it was observed that all the elementary criteria to be taken as purely adakitic magmatism are fulfilled. However, there is a variation in the range of 350–400 ppm of Sr present, considering that this could correspond to a geochemical transitional zone (Fig. 8B) or to a region where the samples exhibit petrological variations, for example, the low concentration of key minerals in

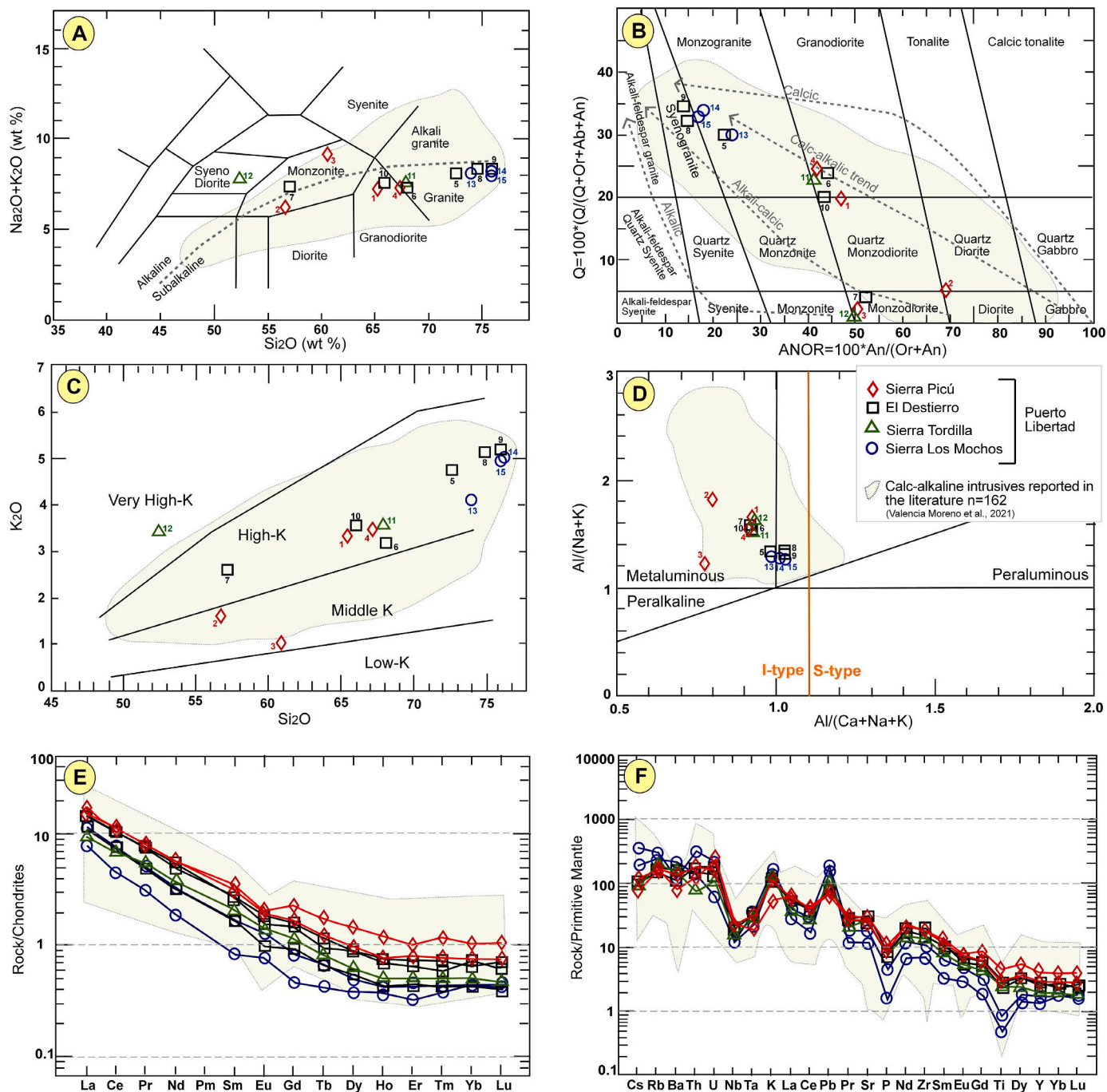


Fig. 5. Geochemical discrimination diagrams for intrusive rocks from Puerto Libertad, Sonora, México, in comparison with other calc-alkaline intrusives in the literature: A) Total alkalis vs. Silica (TAS) diagram from Cox et al. (1979), alkaline and subalkaline discrimination line after Irvine and Baragar (1971); B) CIPW normative  $Q'$ -ANOR diagram (Streckeisen and Le Maitre, 1979); C)  $\text{K}_2\text{O}$  vs.  $\text{SiO}_2$  diagram after Peccerillo and Taylor (1976); D) Alumina saturation diagram (Maniar and Piccoli, 1989); E) Rare Earth Elements diagrams normalized to chondrite (McDonough and Sun, 1995); F) Primitive mantle-normalized spider diagram (Sun and McDonough, 1989). Calc-alkaline intrusives marked as reference after Valencia-Moreno et al., 2021. Numbers in figures A–D indicate samples keys as follow: 1. SEP15-03A; 2. SEP15-03B; 3. SEP15-06A; 4. SEP15-06B; 5. ED19-01; 6. ED19-02; 7. ED19-02B; 8. ED19-03A; 9. ED19-04; 10. ED19-05; 11. ST19-01A; 12. SLM16-64; 12. SLM16-70; 12. SLM16-71.

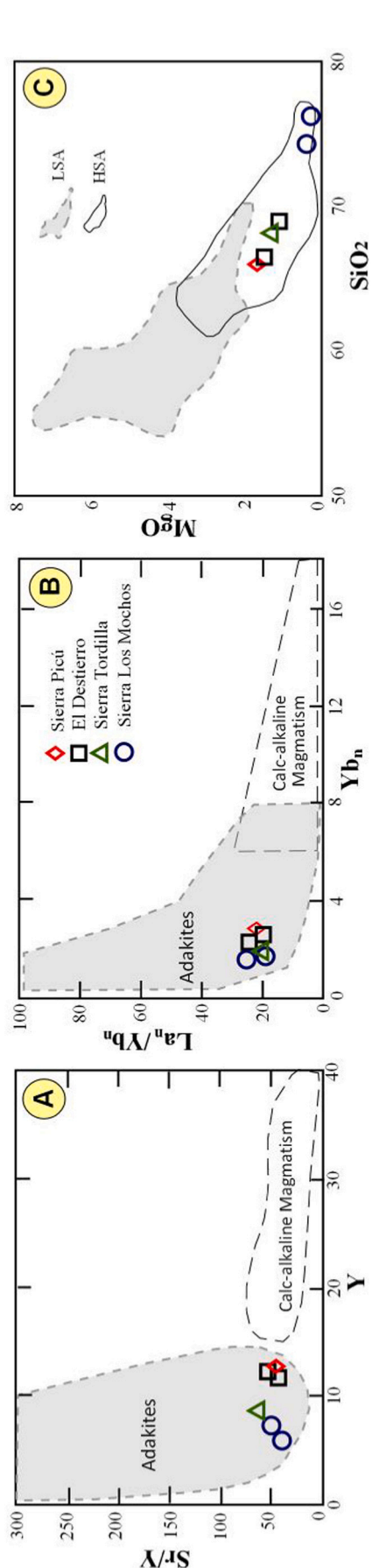


Fig. 6. Classical adakite discrimination diagrams including the Puerto Libertad intrusives: A) Y vs Sr/Y diagram for adakites discrimination (Defant and Drummond, 1990); B)  $Yb_n$  vs  $La/Yb_n$  discriminant diagram normalized to Chondrite (Defant and Drummond, 1993); C) High Silica Adakites (HAS) and Low Silica Adakites (LSA) discriminant diagram (Castillo, 2006).

the adakites, such as amphiboles (Kay, 1978; Defant and Drummond, 1990; Martin et al., 2005; Castillo, 2006).

We propose the ternary  $Y^*10-Al_2O_3^*2-Sr$  diagram in Fig. 8C, which allows us to emphasize the discrimination between adakitic and calc-alkaline intrusives, reflecting the repetitiveness of a transitional zone consistent with  $Al_2O_3$  enrichment for calc-alkaline intrusives as opposed to those that would show adakitic characteristics. The previous diagram is complemented with the proposed ternary diagram  $Y^*10-SiO_2^*2-Sr$  (Fig. 8D) by evidencing the clear discrimination between adakitic and classic calc-alkaline rocks, a situation shared using elements of higher reliability such as Th in the  $Y^*10-Th^*5-Sr$  diagram (modified from Velderrain-Rojas et al., 2021, Fig. 8E). Both Y and Th are immobile elements reliable for petrogenetic calculations from magmas (Wilson, 1989).

Regarding the intrusives of the Puerto Libertad region, the plots suggest that both the Sierra Picú, El Destierro, and Sierra Tordilla rocks are adakitic intrusives, while the Sierra Los Mochos syenogranite shows an adakitic affinity, plotting in the proposed transition zone by having a Sr concentration of 355 ppm and the monzogranite of Sierra Los Mochos which plots in the field of calc-alkaline rocks, by showing lower Sr values of 236 ppm (Fig. 8C, D and E).

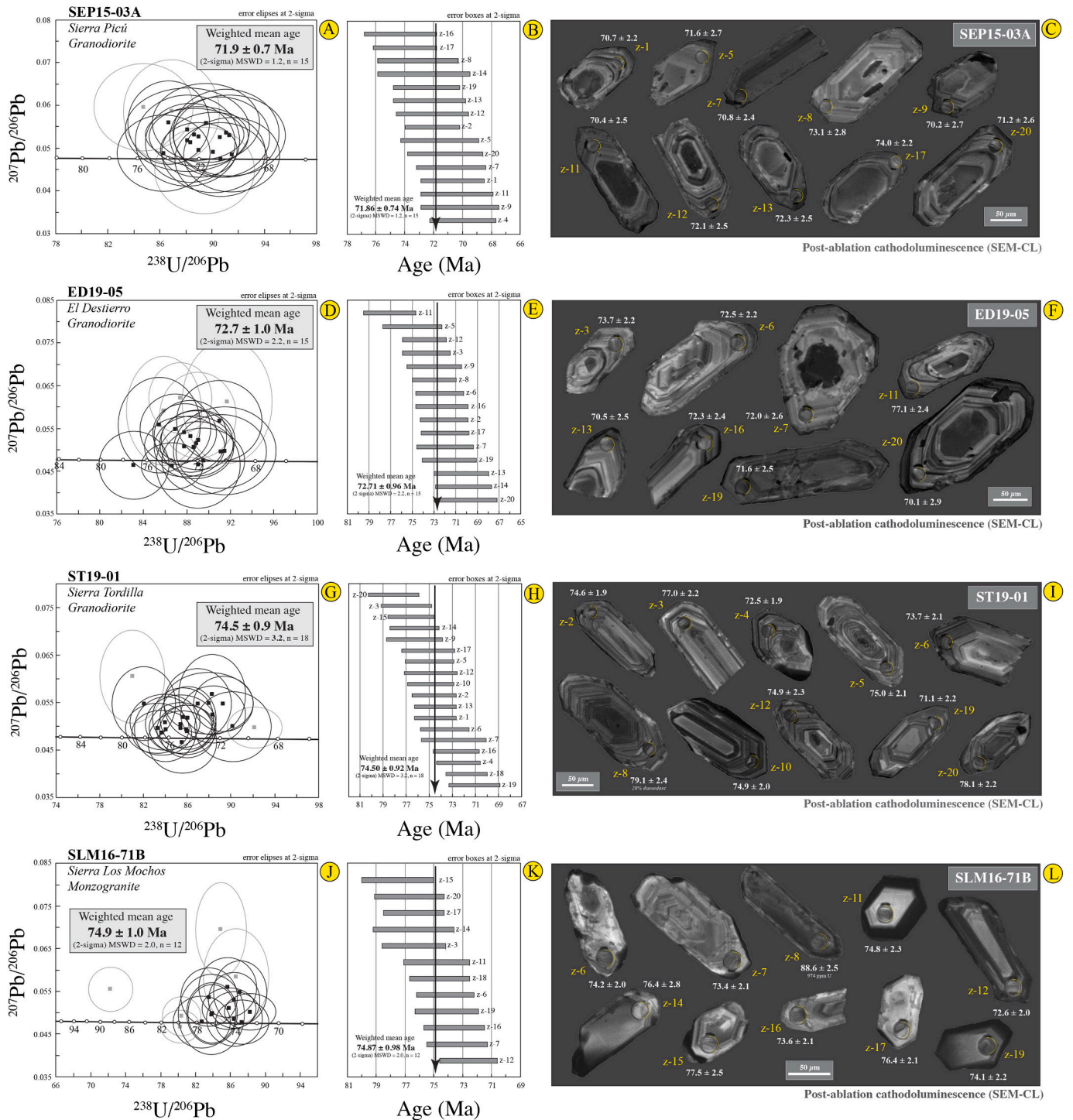
### 5.3. Tectonic setting and geodynamic implications

Immobile trace element analyses were found suitable for tectonic settings discrimination despite the alteration and oxidation observed in some samples. Considering alkalis-FeO<sub>t</sub>-MgO ratios (AFM; Fig. 9A), granitoids from Puerto Libertad plot in the calc-alkaline field and in the volcanic arc granites area of the  $Rb/Y^*+Nd$  diagram (Pearce et al., 1984, Fig. 9B), where Laramide intrusives usually plot (Valencia-Moreno et al., 2021).

Regarding the tectonic setting, several models have been proposed for this magmatism with calc-alkaline tendency, most of them coinciding in a context of a metasomatized magmatic arc in a subduction zone (Cochemé, 1985; Valencia-Moreno et al., 2021), involving a relatively shallow emplacement, with the possibility of exhibiting economic mineralization at depths no deeper than 12 km with temperatures below 450 °C (Campubí, 2013; Valencia-Moreno et al., 2021). These mentioned conditions are consistent with the calculated depths of emplacement in the Puerto Libertad intrusives (4.9–6.2 km), while the temperatures remain. Furthermore, for adakites formation conditions, we must specify that a thermal anomaly is necessary to make the system warmer under various tectonic scenarios such as slab melting (Defant and Drummond, 1990) or melting of the subducted oceanic crust (Defant and Drummond, 1993; Stern and Kilian, 1996), the beginning or end of subduction (Sajona et al., 1993, 1994), a low inclination in the subducted oceanic plate (Gutsher et al., 2000), melting of the delaminated lower crust (Wang et al., 2006), melting of metabasalts and eclogites (Wang et al., 2006), magmatic injection into a thickened crust (Petford and Atherton, 1996) or simply that the adakitic melt originated in the thickened lower continental crust (Petford and Atherton, 1996; Wang et al., 2004, 2006; Chung et al., 2003; Yang et al., 2015). In the case of Puerto Libertad intrusives, they show a similar trend to the field of experimental melts formed from partial melting of a thickened lower crust (Fig. 9C and D). Interpretations of the discrimination fields shown in Fig. 9C and D should be treated carefully, as suggested by Yang et al. (2015), due to the overlapping fields. The consideration of the tectonic setting should always be taken, for example, the thickened continental crust calculated over 30 km for the intrusives in this study (Fragoso-Irriño et al., 2021).

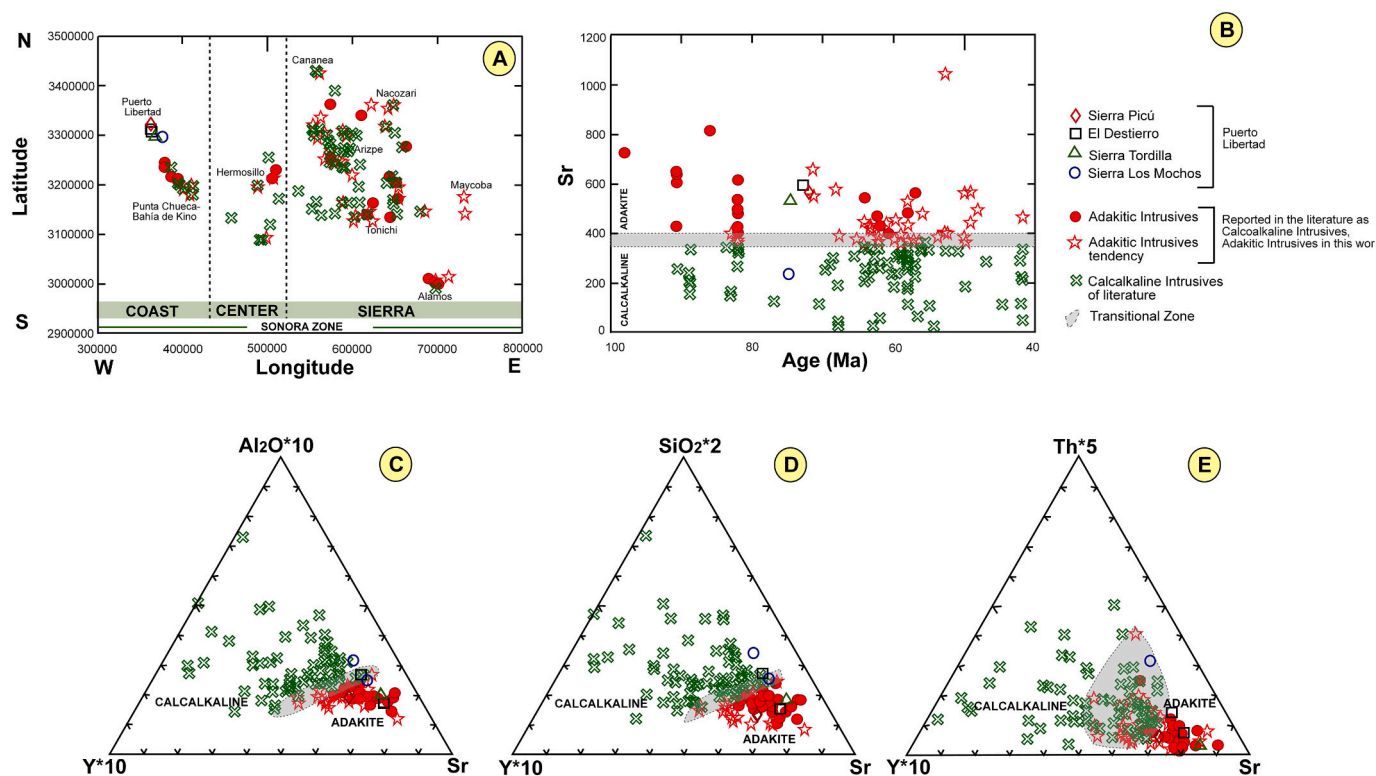
### 5.4. Implications of adakitic granitoids in NW Mexico

In addition to the important significance of the formation of arc magmas with adakite geochemical signatures, which provide highly relevant information about the source of the magmas and the



**Fig. 7.** Analytical U–Pb zircon geochronology data for Puerto Libertad granitoids using laser ablation techniques (LA–ICP–MS): A, D, G, J) Tera-Wasserburg concordia diagrams showing the obtained  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages for the intrusives. Dates were obtained using only measured zircons represented by black squares and ellipses, while gray squares and ellipses represent analyses not included in the age calculations; B, E, H, K) Weighted mean age diagrams showing the amounts of analyses used to calculate the age; C, F, I, L) Post-ablation cathodoluminescence photographs showing the  $\sim 24\ \mu\text{m}$  ablated zones of some representative zircon crystals.





**Fig. 8.** Geochemical variation diagrams of Laramide intrusives from Sonora, Mexico: A) Longitude vs Latitude with the distribution of calc-alkaline, adakitic and adakitic affinity intrusives; B) Age vs Sr showing a Sr enrichment of adakitic and adakitic affinity intrusives; C) Discriminant ternary diagram  $Y^*10-Al_2O_3^*2-Sr$ ; D) Discriminant ternary diagram  $Y^*10-SiO_2^*2-Sr$ ; E) Discriminant ternary diagram  $Y^*10-Th^*5-Sr$  (modified from Velderrain-Rojas et al., 2021). Calc-alkaline samples proposed as adakitic in this work were taken from the calc-alkaline classic magmatism database compiled by Valencia-Moreno et al. (2021).

mechanism of geodynamic evolution (Defant and Drumond, 1990; Zhang et al., 2021), the prevailing relationship between adakites and economic Cu–Mo–Au-bearing mineralization has been documented (Thiéblemont et al., 1997; Sajona and Maury, 1998; Oyarzun et al., 2001; Ballard et al., 2002; Sun et al., 2011, 2013; Zhang et al., 2021), a relationship that has been evaluated by limiting the relative oxygen fugacity (Zhang et al., 2021).

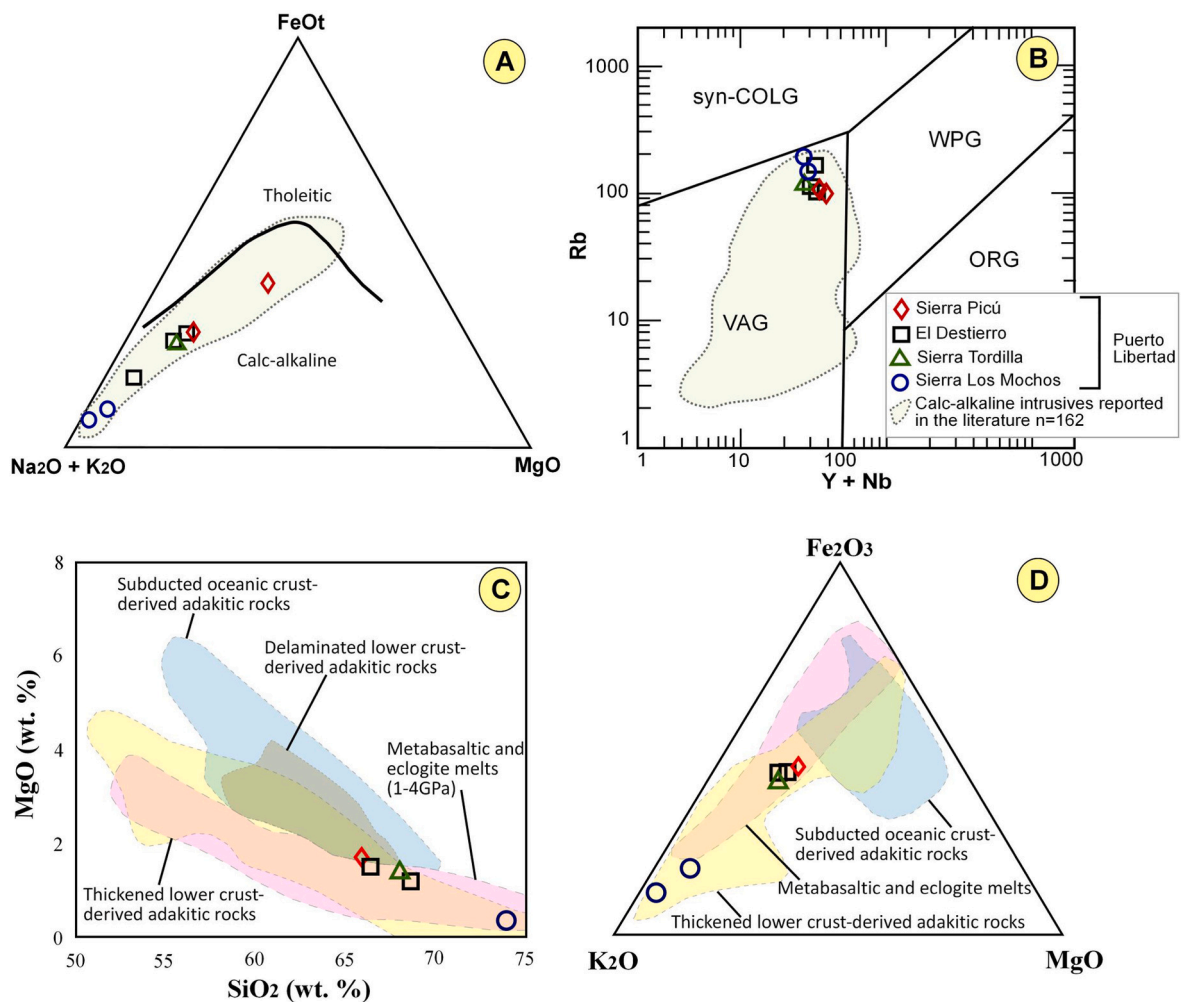
In Sonora, Pérez-Segura et al. (2009) found a relationship between adakitic magmatism and Cu, Zn, Ni and Co deposits in Late Cretaceous adakitic magmatism in the Sierra Santo Niño of the Bacanora Batholith and the San Lucas porphyry. The Bacanora batholith presents  $SiO_2$  values of 65.05%,  $Al_2O_3$  concentrations of 15.72% and MgO values of 1.95%; also, low concentrations of heavy rare earth elements (HREE) Y and Yb values of 12.5 and 1.3, respectively. High Sr values (475 ppm) and low  $(La/Yb)_N$  values. In the case of the San Lucas porphyry almost the same characteristics are present, showing Sr values of 229 ppm, also observed in one of the granitoids of the Sierra Los Mochos in Puerto Libertad and most of the Sonoran intrusives with adakitic affinity proposed in this work.

Consistent with the above, and our analysis of the rocks in the literature that have been proposed as classic arc magmatism and that in this work are reevaluated as adakitic or adakitic affinity rocks, we propose that mineralized intrusives such as Piedras Verdes (Espinosa-Perea, 1999; Santillana-Villa et al., 2020; Valencia-Moreno et al., 2021) and La Caridad Mining District (Rascón-Heimpel et al., 2012; Santillana-Villa et al., 2020; Valencia-Moreno et al., 2021), respectively show adakites and adakitic affinity rocks, as exhibited in Supplementary File 5.

## 6. Conclusions

In the transect studied in the region east of Puerto Libertad, Sonora, it is concluded that in an interval of no more than 4 Myr at depths between 4.9 and 6.2 km, took place the emplacement of syenogranitic, monzogranitic and granodioritic rocks from  $74.9 \pm 1.0$  Ma to  $71.9 \pm 0.7$  Ma corresponding to Laramide magmatism that began with a classic calc-alkaline magmatism in one of the intrusives of Sierra Los Mochos and progressively change to adakitic affinity in the same locality, to finally show adakitic characteristics in Sierra Tordilla, El Destierro and Sierra Picú intrusives. These adakitic affinity increase from south to north in the region.

In a re-evaluation of the samples of Laramide intrusive rocks from the literature, a null relationship between the spatial-temporal distribution of calc-alkaline, adakitic and adakitic affinity intrusives is identified, proposing that further analysis is necessary for the discrimination of this type of calc-alkaline arc rocks in order to define a correct geochemical discrimination. Therefore, we agree that the correct classification of adakites requires a detailed field work that allows clarity with the geological environment, detailed petrography, geochemical analysis and, above all, an important observation of the key elements in the discrimination of this type of magmatism to rule out the possibility that the concentrations in the key elements, do not come from mineralogical anomalies, and in the case of elements such as Sr, from contamination. Finally, the exploration of Adakites and rocks with adakitic affinity could be considered for determining sites of economic importance such as these associated with copper deposits.



**Fig. 9.** A) AFM diagram to discriminate between the calc-alkaline and tholeiitic of [Irvine and Baragar \(1971\)](#); B) Niobium + Yttrium vs. Rubidium discrimination diagram of [Pearce et al. \(1984\)](#) for sample intrusives rocks Puerto Libertad, Sonora, Mexico. VAG: volcanic arc granites; WPG: withing plate granites; ORG: ocean ridge granites; syn-COLG: syn-collisional granite; C) MgO vs. SiO<sub>2</sub> of [Yang et al. \(2015\)](#); D) Ternary diagram of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>O-MgO for the adakitic rocks, of [Yang et al. \(2015\)](#).

#### CRediT authorship contribution statement

**Alejandra M. Gómez-Valencia:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Validation, Supervision, Project administration, Methodology, Investigation, Formal analysis, Conceptualization. **Arturo J. Barrón-Díaz:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Validation, Supervision, Methodology, Investigation, Funding acquisition, Formal analysis, Conceptualization. **Iván R. Espinoza-Encinas:** Writing – review & editing, Formal analysis, Data curation. **Rufino Lozano-Santa Cruz:** Writing – review & editing, Resources, Methodology, Data curation. **Alexander Iriondo:** Writing – review & editing, Validation, Resources, Formal analysis. **Francisco A. Paz-Moreno:** Writing – review & editing, Validation, Supervision, Methodology, Formal analysis, Conceptualization. **Jesús R. Vidal-Solano:** Writing – review & editing, Visualization, Validation, Resources, Formal analysis.

#### Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interest or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

#### Data availability

Data will be made available on request.

#### Acknowledgments

The authors extend special thanks to the following projects and institutions: (1) Vicerrectoría UNISON for geochronology founding; (2) We are thankful to James Hagadorn and patrons from the Denver Museum of Nature & Science for funding for EMPA; (3) CONACYT Project 180784 "Geodynamic Evolution of the Proto-Gulf of California: Emphasis on the volcanic remains of the Miocene in Sonora, Mexico"/ Dr. Jesus Roberto Vidal Solano for the financing of field work; and (4) Geology Department at UNISON and Igneous Petrology students who collaborate in fieldwork. (5) We are also thankful to K. Domanik for the EMPA support and Aimé Orcí Romero for the thin section fabrication at ERNO-UNAM. (6) Irene Pérez Casillas, Concepción Arredondo de la Rosa from CarMinLab are acknowledge for their help with zircon mineral separation and CL imaging. (7) We are thankful with the suggestions of four anonymous reviewers which greatly help to improve this manuscript.

## Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103996>.

## References

- Anderson, T.H., Silver, L.T., 1981. An overview of Precambrian rocks in Sonora, Mexico. *Univ. Nac. Auton. Mex. Inst. Geol. Rev.* 5 (2), 131–139.
- Aguillón-Robles, A., Calmus, T., Benoit, M., Bellon, H., Maury, R.C., Cotton, J., 2001. Late Miocene adakites and Nb-enriched basalts from Vizcaino peninsula, Mexico: indicators of east pacific rise subduction below southern Baja California? *Geology* 29 (6), 531–534.
- Arvizu, H.E., Iriondo, A., Izaguirre, A., Chávez-Cabello, G., Kamenov, G.D., Solís-Pichardo, G., Foster, D.A., Lozano-Santa Cruz, R., 2009. Rocas graníticas pérmicas en la Sierra Pintada, NW de Sonora, México: magmatismo de subducción asociado al inicio del margen continental activo del SW de Norteamérica. *Rev. Mex. Ciencias Geol.* 26 (3), 709–728.
- Arvizu-Gutiérrez, H.E., 2015. Magmatismo Permo-Triásico en el NO de Sonora, México: inicio de la subducción y maduración de un margen continental activo. Tesis Maestría, Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, p. 224.
- Atwater, T., 1989. Plate tectonic history of the northeast Pacific and western North America. In: Winterer, E.L., Hussong, D.M., Decker, R.W. (Eds.), *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii*. Geological Society of America, Boulder, Colorado, pp. 21–72. <https://doi.org/10.1130/DNAG-GNA-N.21>.
- Ballard, J.R., Palin, M.J., Campbell, I.H., 2002. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce (IV)/Ce (III) in zircon: application to porphyry copper deposits of northern Chile. *Contrib. Mineral. Petrol.* 144 (3), 347–364. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0402-5>.
- Barrón-Díaz, A.J., Paz-Moreno, F.A., Hagadorn, J.W., 2019a. The Cerro Rajón Formation—a new lithostratigraphic unit proposed for a Cambrian (Terreneuvian) volcano-sedimentary succession from the Caborca region, northwest Mexico. *J. S. Am. Earth Sci.* 89, 197–210. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.11.003>.
- Barrón-Díaz, A.J., Paz-Moreno, F.A., Lozano-Santa Cruz, R., Herrera-Urbina, S., Centeno-García, E., López-Martínez, M., 2019b. Early Cambrian alkaline volcanism on the southern margin of Laurentia: evidence in the volcanoclastic units from the Puerto Blanco Formation in the Caborca block, NW Mexico. *Int. Geol. Rev.* 61 (10), 1189–1206. <https://doi.org/10.1080/00206814.2018.1501619>.
- Barrón-Díaz, A.J., Paz-Moreno, F.A., Miggins, D.P., Iriondo, A., 2019c. Geochronology and geothermometry of the laramide metamorphism in the cambrian metabasalts from the Cerro rajón formation, Caborca region, northwest Mexico. *J. S. Am. Earth Sci.* 41, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.01.005>.
- Bennett, S.E.K., Oskin, M.E., Iriondo, A., 2013. Transensional rifting in the proto-gulf of California, near bahía kino, Sonora, México. *Geol. Soc. Am. Bull.* 125, 1752–1782. <https://doi.org/10.1130/B30676.1>.
- Calmus, T., Pallares, C., Maury, R.C., Bellon, H., Pérez-Segura, E., Aguillón-Robles, A., Carreño, A.L., Bpurgois, 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 of Société Géologique de France* 179 (5), 465–481.
- Calmus, T., Vega-Granillo, R., Lugo-Zazueta, R., 2011. Evolución geológica de Sonora durante el Cretácico Tardío y el Cenozoico. In: Calmus, T. (Ed.), *Panorama de la Geología de Sonora*, 118, vol. 7. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín, México, pp. 227–266.
- Camprubí, A., 2013. Tectonic and metallogenic history of Mexico. In: Colpron, M., Bissig, T., Rusk, B.G., Thompson, J.F.H. (Eds.), *Tectonics, Metallogeny, and Discovery: the North American Cordillera and Similar Accretionary Settings*, 17. Society of Economic Geologists, Special Publication, pp. 201–243.
- Carr and Gazel, 2017. Iqpet software for modeling igneous processes: examples of application using the open educational version. *Mineral. Petrol.* 111, 283–289.
- Castillo, P.R., 2006. An overview of adakite petrogenesis. *Chin. Sci. Bull.* 51 (3), 257–268. <https://doi.org/10.1007/s11434-006-0257-7>.
- Chávez-Cabello, G., Aranda-Gómez, J.J., Iriondo, A., 2009. Culminación de la Orogenia Laramide en la Cuenca Sabinas, Coahuila, México. *Boletín de la Asociación de Geólogos Petroleros, A.C.* 54 (1), 78–89.
- Chung, S.L., Liu, D.Y., Ji, J.Q., Chu, M.-F., Lee, H.Y., Wen, D.J., Lo, C.H., Lee, T.Y., Qian, Q., Zhang, Q., 2003. Adakites from continental collision zones: melting of thickened lower crust beneath southern Tibet. *Geology* 31, 1021–1024. <https://doi.org/10.1130/G19796.1>.
- Cochemé, J.J., 1985. Le magmatisme cénozoïque dans le Nord-Ouest du Mexique: Cartographie de la région de Yecora-Maicoba-Mulatos. Illustration magmatique de la fin d'un régime en subduction et du passage a un régime distensif. Ph.D. Thesis. Université de Droit D'Économie et des Sciences D'Aix Marseille, p. 209.
- Coney, P.J., 1976. Plate Tectonics and the Laramide Orogeny, vol. 6. New Mexico Geological Society Special Publication, pp. 5–10.
- Coney, P., Reynolds, S.J., 1977. Cordilleran benioff zones. *Nature* 270, 403–406.
- Cox, K.G., Bell, J.D., Pankhurst, R.J., 1979. *The Interpretation of Igneous Rocks*. George Allen & Unwin, London, pp. 1–445.
- Crawford, A.L., Fallon, T.J., Green, D.H., 1989. Classification, petrogenesis and tectonic setting of boninites. In: Crawford, A.J. (Ed.), *Boninites and Related Rocks*. Unwin Hyman, London, pp. 1–49.
- Damon, P.E., Shafiqullah, M., Roldán-Quintana, J., Cochemé, J.J., 1983. El batolito Laramide (90–40 Ma) de Sonora, pap. In: *Memorias de la XV Convención Nacional de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México*, pp. 63–95. Guadalajara, Jalisco.
- Darin, M.H., Dorsey, R.J., Bennett, S.E.K., Oskin, M.E., Iriondo, A., Kunk, M.J., 2016. Late Miocene extension in coastal Sonora, Mexico: implications for the evolution of dextral shear in the proto-Gulf of California oblique rift. *Tectonophysics* 693, 378–408. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.04.038>.
- Defant, M.J., Drummond, M.S., 1990. A model for trondhjemitic–tonalite–dacite genesis and crustal growth via slab melting, archaean to modern comparisons. *J. Geophys. Res.* 95 (21), 503–521. <https://doi.org/10.1029/JB095iB13p21503>.
- Defant, M.J., Drummond, M.S., 1993. Mount St. Helens: potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc. *Geology* 21 (6), 547–550. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021<0547:MSHPEO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021<0547:MSHPEO>2.3.CO;2).
- Dickinson, W.R., Klute, M.A., Hayes, M.J., Janecke, S.U., Lundin, E.R., McKittrick, M.A., Olivares, M.D., 1988. Paleogeographic and paleotectonic setting of Laramide sedimentary basins in the central Rocky Mountain region. *Geol. Soc. Am. Bull.* 100 (7), 1023–1039. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1023:PAPSOL>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1023:PAPSOL>2.3.CO;2).
- Eells, J.L., 1972. The Geology of the Sierra La Berruga, Northwestern Sonora, México. M. S. Thesis. San Diego State College, San Diego.
- Espinosa-Perea, V.J., 1999. Magmatic Evolution and Geochemistry of the Piedras Verdes Deposit. University of Arizona, Sonora, Mexico. M. Sc. Thesis.
- Fragoso-Irinoe, A., Lazcano, J., MolinaGarza, R.S., Iriondo, A., 2021. Estimación gravimétrica del grosor cortical en el Golfo de California. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 73 (1), A270820 <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2021v73n1a270820>.
- García-Huerta, J.A., 2015. Geología del cerro Libertad en la región Puerto Libertad: contribución al estudio petrológico del magmatismo orogénico en Sonora, México. Departamento de Geología, Universidad de Sonora, p. 88. Graduated Thesis.
- Gans, P.B., 1997. Large magnitude Oligo-Miocene extension in southern Sonora: implications for the tectonic evolution of Northwest Mexico. *Tectonics* 16, 388–408. <https://doi.org/10.1029/97TC00496>.
- Gastil, R.G., Krummenacher, D., 1977. Reconnaissance geology of coastal Sonora between Puerto lobos and bahía kino. *Geol. Soc. Am. Bull.* 88 (2), 189–198. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1977\)88<189:RGOCBS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1977)88<189:RGOCBS>2.0.CO;2).
- Gómez-Valencia, A.M., 2011. Petrografía y geoquímica del volcanismo Oligoceno-Mioceno medio en Rayón, Sonora: Énfasis en el estudio y significado del volcanismo hipóalcalino en la región. Departamento de Geología, Universidad de Sonora, p. 143. BS Thesis.
- 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. Departamento de Geología, Universidad de Sonora, p. 274. MS Thesis.
- Gómez-Valencia, A.M., Vidal-Solano, J.R., López-Martínez, M., Vega-Granillo, R., Pallares, C., 2015. Petrografía, geoquímica y geocronología del magmatismo orogénico en Rayón: características petrológicas de los últimos magmas asociados a la subducción en Sonora, México. *Rev. Mex. Ciencias Geol.* 32 (2), 219–238.
- Gómez Valencia, A.M., Vidal Solano, J.R., y Vega Granillo, R., 2021. Geología de la Sierra Los Mochos y Lomas de Arivaipa, Puerto Libertad, Sonora, México: Implicaciones Tectono-Magmáticas en la evolución del límite divergente oblicuo Pacífico-Norte América. Convención Geológica Nacional 2021. Sociedad Geológica Mexicana.
- Gómez-Valencia, A.M., Vidal-Solano, J.R., Gimeno-Torrente, D., Lozano-Santacruz, R., 2021. Petrogénesis del magmatismo adakítico synrift del Mioceno Tardío de la Sierra Los Mochos y Lomas de Arivaipa, Sonora, México. XXXI Congreso Nacional de Geología.
- Gómez-Valencia, A.M., 2022. Geología de la Sierra los Mochos y Lomas de Arivaipa, Puerto Libertad, Sonora, México: implicaciones tectono-magmáticas en la evolución del Proto-Golfo de California. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Hermosillo, México. Ph.D. Thesis.
- González-León, C., 1980. La Formación Antimonio (Triásico Superior-Jurásico Inferior) en la Sierra del Álamo, Estado de Sonora. *Rev. Mex. Ciencias Geol.* 4 (1), 13–18.
- González-León, C.M., Solari, L., Valencia-Moreno, M., Rascón Heimpel, M.A., Solé, J., González Bécuvar, E., Lozano Santacruz, R., Pérez Arvizu, O., 2017. Late Cretaceous to early Eocene magmatic evolution of the Laramide arc in the Nacozari quadrangle, northeastern Sonora, Mexico and its regional implications. *Ore Geol. Rev.* 81, 1137–1157. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.07.020>.
- Gutscher, M.A., Maury, R.C., Eissen, J.P., Bourdon, E., 2000. Can Slab melting be caused by flat subduction? *Geology* 28, 535–538.
- Holland, T., Blundy, J., 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contrib. Mineral. Petrol.* 116, 433–447. <https://doi.org/10.1007/BF00310910>.
- Iriondo, A., 2001. Proterozoic Basements and Their Laramide Juxtaposition in NW Sonora, México. University of Colorado, Boulder, Colorado, p. 222. Ph.D. Thesis.
- Iriondo, A., Premo, W.R., 2011. Las rocas cristalinas proterozoicas de Sonora y su importancia para la reconstrucción del margen continental SW de Laurentia—La pieza mexicana del rompecabezas de Rodinia. In: Calmus, T. (Ed.), *Panorama de la geología de Sonora, México*, vol. 118. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín, pp. 25–55, 2.
- Irvine, T.N., Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.* 8, 523–548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>.
- Kamei, 2004. An adakitic pluton on Kyushu Island, southwest Japan arc. *J. Asian Earth Sci.* 24, 43–58. <https://doi.org/10.1016/j.jsaes.2003.07.001>.
- Kay, R.W., 1978. Aleutian magnesian andesites, melts from subducted Pacific Ocean crust. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 4, 117–132. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(78\)90032-X](https://doi.org/10.1016/0377-0273(78)90032-X).
- Leake, B.E., Woolley, A.R., Arps, C.E.E., Birch, W.D., Gilbert, M.C., Grice, J.D., Hawthorne, F.C., Kato, A., Kisch, H.J., Krivovichev, V.G., Linthout, K., Laird, J.,



- a regional context. *Int. Geol. Rev.* <https://doi.org/10.1080/00206814.2021.1878396>.
- Velderrain-Rojas, L.A., Vidal-Solano, J.R., Alva-Valdivia, L.M., Vega-Granillo, R., López-Martínez, 2022. Isla San Pedro Nolasco as a Late Miocene intrusive record at the eastern margin of the Gulf of California: insights from geological, geochemical and geochronological studies. *Geosci. Front.* 13 (3), 101351 <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2022.101351>.
- Vidal-Solano, J.R., 2005. Le volcanisme hypercalcin d'âge Miocene Moyen du Nord-Ouest du Mexique (Sonora) : Minéralogie, Géochimie, cadre géodynamique. Tesis de doctorado, Universidad Paul Cézanne, p. 256.
- 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. *J. Iber. Geol.* 39 (1), 121–130.
- Wang, Q., Zhao, Z.H., Xu, J.F., Bai, Z.H., 2004. The geochemical comparison between the tongshankou and yinzu adakitic intrusive rocks in southeastern Hubei: (delaminated) lower crustal melting and the genesis of porphyry copper deposit. *Acta Petrol. Sin.* 20 (2), 351–360.
- Wang, Q., Zhao, Z.H., Xu, J.F., Wyman, D., Xiong, X., Zi, F., Bai, Z., 2006. Carboniferous adakite-high-Mg andesite-Nbenriched basaltic rock suites in the northern Tianshan area: implications for Phanerozoic crustal growth in the central Asia orogenic belt and Cu-Au mineralization. *Acta Petrol. Sin.* 22 (1), 11–30.
- Watson, E.B., Wark, D.A., Thomas, J.B., 2006. Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contrib. Mineral. Petrol.* 151, 413–433.
- Wilson, M., 1989. *Igneous Petrogenesis*. Unwin Hyman, Springer, London, p. 466.
- Wodzicki, W.A., 1995. *The Evolution of Laramide Igneous Rocks and Porphyry Copper Mineralization in the Cananea District, Sonora, Mexico*. Ph.D. Thesis (Not Published). Universidad of Arizona, Tucson, Arizona, p. 181.
- Yang, G., Yang, S., Wei, L., Li, Z., Li, R., Xu, D., y Liu, M., 2015. Petrogénesis y significado geodinámico del plutón adakítico Tadong del Triásico Tardío en Qinling Occidental, China central. *Revista internacional de geología* 57 (13), 1755–1771. <https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1024291>.
- Zúñiga-Hernández, L.G., 2010. Estudio geológico, geoquímico y metalognético del cuadrángulo Huépac-Moctezuma, centro-norte de Sonora, México. Universidad de Sonora, Hermosillo, p. 126. M.S. Tesis.
- Zhang, Y.B., Sun, S.H., Mao, Q., 2006. Mesozoic O-type adakitic volcanic rocks and its petrogenesis, paleo-tectonic dynamic and mineralization significance of the eastern side of southern Da Hinggan, China. *Acta Petrol. Sin.* 22 (9), 2289–2304.
- A Yavuz, F., Doner, Z., 2017. WinAmptb: A Windows program for calcic amphibole thermobarometry. *Periodico di Mineralogia* 86, 135–167. <https://doi.org/10.2451/2017PM710>.
- Zhang, L., Li, S., Zhao, Q., 2021. A review of research on adakites. *Int. Geol. Rev.* 63 (1), 47–64. <https://doi.org/10.1080/00206814.2019.1702592>.

# ANEXO 2

## Artículo 2

**Geochemistry and geological control of Sonora obsidian:  
New insights into the provenance  
study of archaeological obsidians in Mexico**

Vidal-Solano, J. R., Gómez-Valencia, A. M., Hinojo-Hinojo, A.,  
Lozano-Santa Cruz, R., 2020.



## Geochemistry and geological control of Sonora obsidian: New insights into the provenance study of archaeological obsidians in Mexico

Jesús Roberto Vidal-Solano<sup>a,\*</sup>, Alejandra Marisela Gómez-Valencia<sup>a,b,c</sup>, Adriana Hinojo-Hinojo<sup>d</sup>, Rufino Lozano-Santa Cruz<sup>e</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Geología, Universidad de Sonora (UNISON), Hermosillo, Mexico

<sup>b</sup> Posgrado en Ciencias de La Tierra, Instituto de Geología, Estación Regional Del Noroeste, Universidad Nacional Autónoma de México (ERNO-UNAM), Hermosillo, Mexico

<sup>c</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora (UNISON), Hermosillo, Mexico

<sup>d</sup> Sección de Arqueología, Instituto Nacional de Antropología e Historia (Centro INAH Sonora), Hermosillo, Mexico

<sup>e</sup> Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México (LANGEM-UNAM), Ciudad de México, Mexico

### A B S T R A C T

Obsidian artifacts found in thirteen archaeological localities of Sonora show a petrological relationship with rhyolitic outcrops scattered in various geological localities (El Pinacate, Sierra Libre, Sierra El Aguaje, Hermosillo, Babidanchi and Sierra Los Mochos). X-Ray Fluorescence geochemical analysis of a group of 133 samples was done, including archaeological artifacts, as well as geological samples and anhydrous cores (raw material-lithic nodules) coming from both geological outcrops and archaeological sites. The geochemical data were compared with reference sample values from known primary obsidian knowing outcrops that also were analyzed by conventional techniques of ICP and XRF previously published. Geochemical results can be integrated into two large groups of obsidian from Sonora, and their spatial distribution holds a direct relation with the geological origin of perlitic outcrops. The first group corresponds to Oligocene rhyolites from the Sierra Madre Occidental. The second group correlates with Middle-Late Miocene rhyolites is associated to the Proto-Gulf of California development. Archaeologically, a distinct temporal sequence was identified as concerning its use according to the cultural areas in which they were found. The geological studies on obsidian sources help us to understand, on the one hand, the origin of perlitic landforms, their spatial situation and, on the other hand, to have a measurable comparative reference, that contributed to know the cultural extension of its indigenous use over time, as well as the reach of the social interaction networks, flaking techniques and use of specific artifact types. Finally, the integration of their geological control and geochemical characteristics allowed us to establish a reliable base to achieve provenance interpretations of obsidian lithic complexes in Sonora. All elements described here represent the obsidian phenomenon in Sonora and have an affinity with obsidian sources of NW Mexico, which provides a unique identity that needs to be located in the context of the interdisciplinary research of lithic in Mexico and SW United States.

### 1. Introduction

In diverse regions of Mexico, obsidian was a highly valued raw material. Its mining played an important role in the development of many Mesoamerican and West Mexico cultures, and was a crucial resource due to its high quality and its prevalence over the geological landscape, which involve the development of lithic specialization and the increase of regional and long-distance trade and commerce (Esparza-López and Ponce, 2003, 2005a, 2005b; Esparza-López, 2015; Pastrana et al., 2019). In Mexico, obsidian is found mainly in two important volcanic provinces, the Sierra Madre Occidental and the Transmexican Volcanic Belt. In the first case, obsidian occurs as marekanites originated in some of the last manifestations of Oligocene perlitic rhyolites (approx. 27 to 23 Ma), characterized by domes and lava flows (Demant et al., 1989; Cochemé

and Demant, 1991). In the second case, obsidian is more abundant and was originated in the Pliocene-Pleistocene (less than 5.3 ma) and distributed along with different volcanic fields, conformed by various types of volcanic landforms, distributed from the Pacific to the Gulf of Mexico, containing large decimetric obsidian blocks (Carballo and Pastrana, 2017).

Particularly in NW Mexico, during Oligocene and Miocene time, volcanism was the most important geological process. A complete geological record of both Geological Epochs prevails in Sonora, which due to extensive tectonics, abundant outcrops derived from effusive and explosive volcanic activity were exposed (Fig. 1). This volcanic record presents a large variety of basic to acid compositions. Thus, the occurrence of vitreous volcanic rocks is not fortuitous, among which is obsidian.

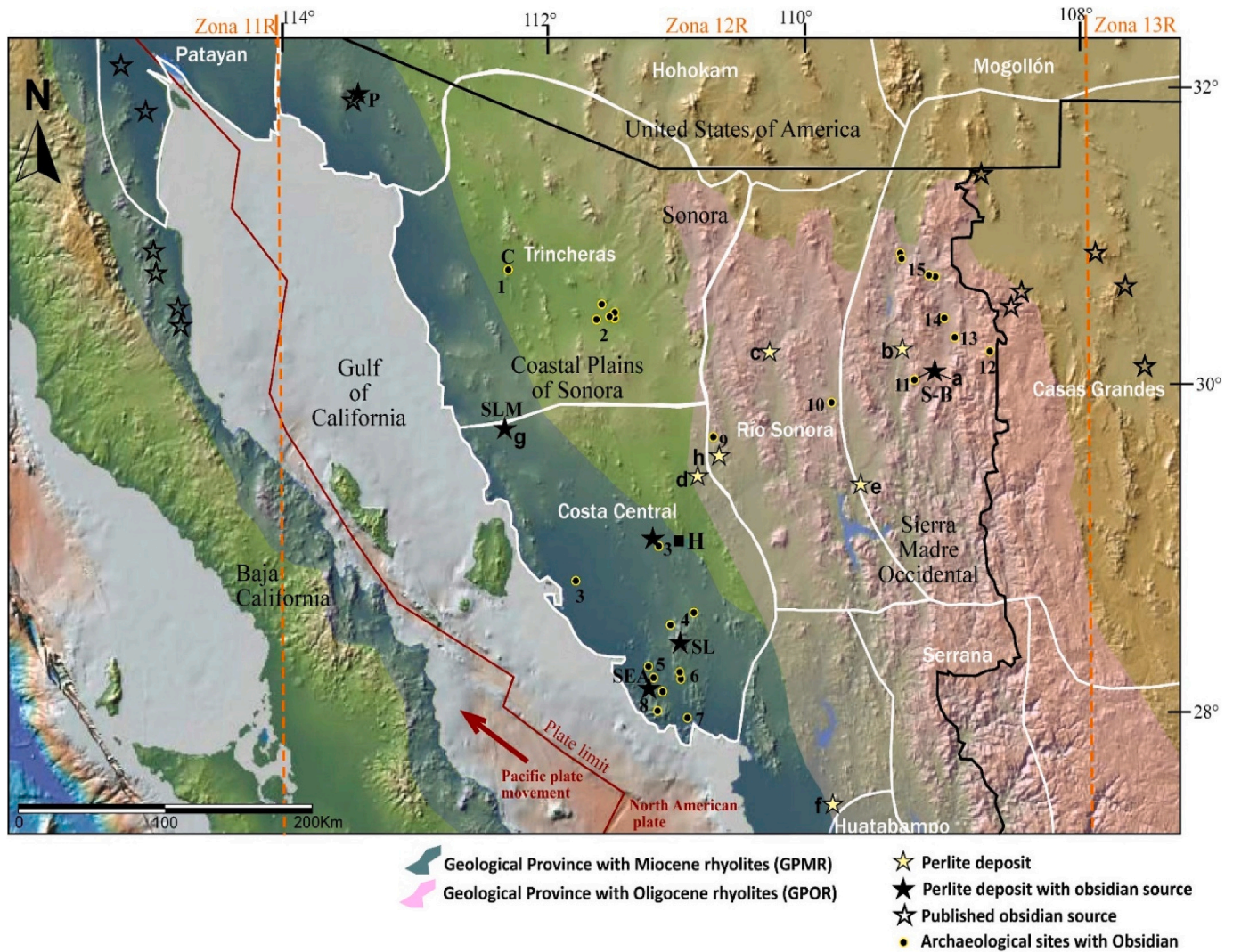
\* Corresponding author. Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Hermosillo, Mexico.  
E-mail address: [roberto.vidal@unison.mx](mailto:roberto.vidal@unison.mx) (J.R. Vidal-Solano).

Even if the geological studies in Sonora began several decades ago, they barely focused on the knowledge of the volcanism that produces vitreous rocks. In this field, highlights have been focused in acid volcanic rocks from the Sierra Madre Occidental (SMO, Demant et al., 1989; Cochemé and Demant, 1991), lesser attention has been given to the geological knowledge of obsidian, and even more scarce from a Geo-archaeological perspective.

In Sonora during Pre-Hispanic times, the obsidian usage and distribution did not occur widely in time and space. Its role in lithic technological development was complementary to other lithic raw materials, in which their extraction was more frequent and massive. However, its strategic importance has been recognized as one significant trade good, useful for the recognition of possible routes and networks of social interaction (Kibler et al., 2014; Pailes, 2016a, 2016b; Dolan et al., 2017).

Contributing to the location of primary obsidian sources since its

geological occurrence has guided the approach developed in this work, integrating a geological control of these sources so far found in Sonora (Barrera Guerrero, 2012; Gómez-Valencia, 2014; Pérez-Aguilar, 2017), and the archaeological occurrence of this lithic raw material. Geochemical analysis of both groups of samples allows defining associations between volcanic provinces and archaeological vestiges. In addition, we proposed to use the location of perlite deposits as a potential primary obsidian source for being surveyed. Finally, we report primary obsidian sources, located on the Central Coast of Sonora, which has not been considered before. These sources showed technological and temporal development more extensive than other Sonoran Cultural Areas.



**Fig. 1.** Map of the geological-tectonic framework of northwestern Mexico showing obsidian sources, perlite deposits, archaeological sites and the different provinces of the pre-Hispanic cultural traditions of Sonora. Geological localities with Oligocene or Miocene obsidian correspond to: P, El Pinacate; SLM; Sierra Los Mochos; H, Hermosillo; SL, Sierra Libre; SEA, Sierra El Aguaje; and S-B, Selene-Babidanchi. The Archaeological Sites are grouped under the following order: 1, Caborca (SON: E: 8: 5); 2, Trincheras (SON: F: 11: 81 and SON: F: 10: 134); 3, Hermosillo (SON: N: 2: 3); 4, Sierra Libre (SON: O: 5: 15 and SON: O: 5: 14); 5, Ejido Francisco Villa; 6, Sierra Santa Úrsula (SON: O: 13: 4, SON: O: 13: 5 and SON: O: 13: 6); 7, Guaymas (SON: R: 1: 7 and SON: N: 16: 6); 8, Sierra El Aguaje (SON: N: 16: 8); 9, Opodepe (SON: K: 1: 3); 10, Cumpas (SON: L: 1: 6); 11, Selene-Babidanchi (SON: H: 16: 3); 12, Bacerac (CHIH: C: 9: 42); 13, Bacerac El Gato (CHIH: C: 14: 3); 14, Bavispe (CHIH: C: 9: 4); 15, Agua Prieta (SON: H: 4: 1, SON: H: 4: 2, SON: H: 8: 1 and SON: H: 8: 2). For perlite localities the following deposits were considered: a, Aribabi-Huachineras; b, Huasabas-Babidanchi; c, Banamichi; d, Carbó; e, San Pedro de la Cueva; f, Obregón (Vidal-Solano et al., 2014) and g, Sierra Los Mochos (Vidal-Solano and Gómez-Valencia, 2017); h, Rayón (Gómez-Valencia, 2011; Gómez-Valencia et al., 2015). White contour polygons represent the different pre-Hispanic Cultural Traditions of Sonora (Gilman, 2016; relief image from <http://www.geomapp.org/>).

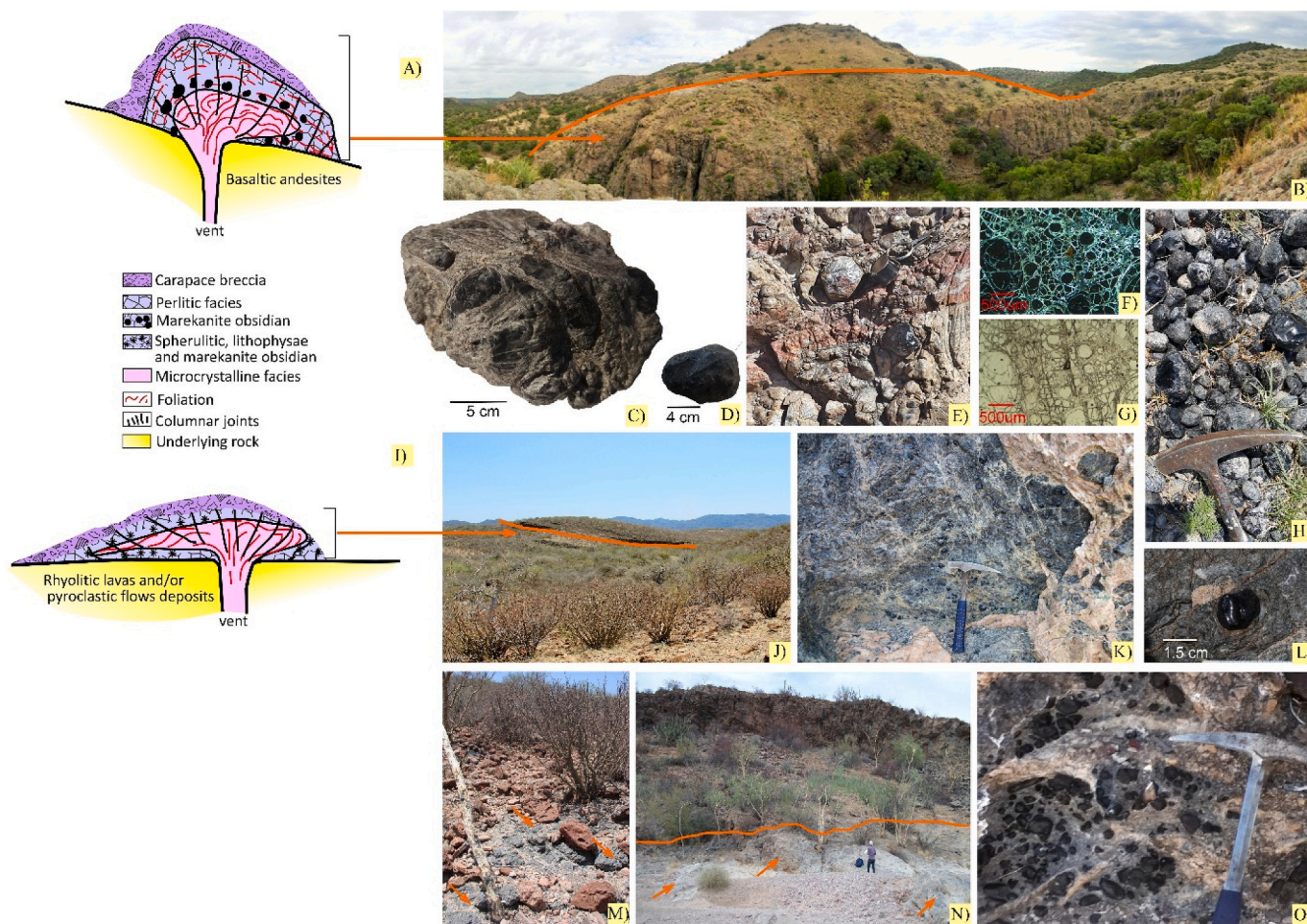


## 2. Geological framework

### 2.1. Occurrence of geological outcrops with obsidian in Sonora

Unlike the Transmexican Neovolcanic Belt, the obsidian presence in Sonora is exclusively associated to low lava dome or coulée flow-domes (Blake, 1990) occurrence, showing a high development of perlitic facies (Fig. 2). Perlite is a term used for vitreous volcanic rocks that exhibit numerous concentric fractures (Le Maitre et al., 2002), which can produce a pearly brightness on the rock (Fig. 2C and L). This cracking phenomenon occurs when hydration on obsidian deposits takes place. The sub-rounded obsidian nodules in Sonora were originated because of the perlitization process on vitreous rhyolites. These nodules are smaller than 10 cm, but mostly 3–5 cm of diameter known as marekanites (Fig. 2; Lacroix, 1934; Le Maitre et al., 2002). However, when obsidian nodules are smaller than 2 cm, they are commonly referred as *apache tears*. These particular attributes define the Sonoran obsidian outcrops, markedly contrasting to other volcanic landforms in Mexico and the world, which produced large blocks (even decimetric and metric), forming a fragmented compound of domes, lava flows and even

subvolcanic bodies. In Sonora, marekanite obsidian deposits of perlitic rhyolites, derivate from two magmatic events, occurred during the Cenozoic, each one of them exhibits specific petrological characteristics; which are distributed along with two geological provinces (Fig. 1): A) The older one is the Geological Province with Oligocene Rhyolites (GPOR), and has a metaluminous calc-alkaline chemical affinity, corresponding to coulée flow-domes of the last volcanic episodes in the SMO sequence. Its bulky intermittent outcrops follow a NW-SE direction at the edge of the SMO, in the easternmost Sonora state boundary; and B) The second one is the Geological Province with Miocene Rhyolites (GPMR); it is present sporadically as low lava domes and pyroclastic-flow deposits. This magmatic event regularly has a per-alkaline transitional chemical affinity and corresponds to the development of Middle-Late Miocene volcanic fields in the Proto-Gulf of California. These outcrops occur as isolated hills, within the Sonoran Coastal Plains, in the west half of Sonora, as well as in the coastal plains of eastern Baja California (Figs. 1 and 2).



**Fig. 2.** Volcanic dome models and aspect of perlitic deposits with primary sources of obsidian, concerning the two geological provinces in Sonora: **1.- Geological province with Oligocene rhyolites (GPOR):** A) Coulée flow-dome type; B) North view of Babidanchi rhyolitic dome (Domo La Bendición); the orange line shows the upper contact of the dome with basaltic andesite; C) Perlite hand sample of the Sierra Los Mochos shows obsidian nodules surrounded by concentric exfoliation; D) Example of an anhydrous vitreous core with weathering or cortex surface from the Selene dome source; E) Red and grey flow-banded perlitic with marekanite from Babidanchi dome source (the magnifying glass, as scale, measures 3 cm); F) and G) Photomicrographs in analyzed and natural light respectively, showing a pervasive perlitic texture with micrometric obsidian nodules from the Selene dome source; H) Obsidian nodules and nuclei from the Babidanchi rhyolitic dome source. **2.- Geological province with Miocene rhyolites (GPMR):** I) Low lava dome-type; J) North view of a volcanic dome outcrop with obsidian from arroyo El Cajete at Sierra Libre; K) Perlitic facies with marekanite from an outcrop in the arroyo El Galindro at Sierra Libre; L) Apache tear in the perlitic outcrop from arroyo El Cajete at Sierra Libre; M) and N) Typical aspect of perlitic outcrops with obsidian source in the Central Coast of Sonora at Sierra Libre and Sierra El Aguaje, respectively; O) Perlite with obsidian nuclei in marekanites on a weathering surface of desert varnish from Sierra Batamote source at El Pinacate region.

## 2.2. Primary obsidian sources in the oligocene rhyolitic province

### 2.2.1. Babidanchi

At the Rancho Babidanchi sector, obsidian is associated with a perlite mining prospect named “Selene” (Kibler et al., 2014; Hinojosa-Prieto et al., 2016; Melgarejo-Joris, 2019). The Selene Perlite deposit occurs inside a coulée flow-dome in the Upper Rio Bavispe Basin, located NE of Sonora in the Sierra Madre Occidental (Fig. 1). However, we report a second dome, called Babidanchi, with the same geological items and located 1 km to the northeast of Selene in the “La Bendición” mining prospect (Fig. 2B). Both domes contain obsidian and are unconformably covered by basaltic andesites of Oligocene-Miocene age (Melgarejo-Joris, 2019), defining the perlite extension in the area. Obsidian nuclei occur in the center of these domes, reaching 10 cm long in size, and one of them was called Selene Obsidian source by Kibler et al. (2014).

### 2.2.2. Sierra Los Mochos

The Cerro La Ventana at Sierra Los Mochos is a new primary source of obsidian in Sonora reported in this paper (Fig. 1), and is part of the Oligocene perlite deposits corresponding to the last volcanic episodes of the bimodal volcanic sequence of the Sierra Madre Occidental (Cochemé and Demant, 1991). These deposits correspond to a coulée flow-dome of rhyolitic composition within a volcanic sequence of andesitic-basaltic lavas and minor ignimbrites and rhyolitic lavas, covered by interspersed in clastic rocks derived from alluvial fans, which fill grabens and semi-grabens (Vidal-Solano and Gómez-Valencia, 2017). The obsidian is found within the perlitic facies in nodules with dimensions lesser than 4 cm characteristically; the obsidian in this locality shows a dark grey color and a moderate to intense concentric exfoliation, which seems to make it difficult to flake due to its fracture pattern (Fig. 2C).

## 2.3. Primary obsidian sources in the Miocene Rhyolitic Province

### 2.3.1. The El Pinacate

The presence of obsidian in El Pinacate Volcanic Field (PVF, Fig. 1), is limited to the peralkaline volcanism, corresponding to a succession of lavas, remnants of ignimbrites and rhyolitic domes of Miocene age (14 - 12 Ma). These natural glasses are petrogenetic linked with basaltic lava flows of the Pre-Pinacate volcanic event, reported in the locations of El Picú, Sierra Batamote, Vidrios Viejos, Lomas del Norte, and Los Vidrios (Shackley, 1988, 2005; Vidal-Solano, 1998, 2001; 2005; Vidal-Solano et al., 2005, 2008). An important feature of these outcrops corresponds to a succession of low lava domes of highly weathering soft morphology with a perlitic facies almost at the base of the units, which contains obsidian nucleus or marekanites (Fig. 2O; Judd, 1886), and also “apache tears”, which have variable colors between black, brown and bluish-grey (Vidal-Solano et al., 2005, 2008; Vidal-Solano et al., 2005; Vidal-Solano et al., 2008).

### 2.3.2. Hermosillo

Near the Ejido Europa located west of Hermosillo (Fig. 1), specifically at Cerro Izabal, is an outcrop corresponding to a rhyolitic low lava dome with very marked denudation. The rhyolitic body lays on a basal perlitic facies unit with obsidian nodules smaller than 5 cm, which have been analyzed by Vidal-Solano et al. (2013). Also, this obsidian linked with a pumice lapillite deposit derived from a pyroclastic flow related to the rhyolitic dome. Both rock units are covered by a vitrophyre, which occurs at the base of a peralkaline ignimbrite, defined as a stratigraphic marker dated at ca. 12 Ma, which is regionally known as the Ignimbrite of Hermosillo (Vidal-Solano et al., 2005, 2007).

### 2.3.3. Sierra Libre

Facies with obsidian in perlitic rhyolites are common in northern and southern boundaries of the Sierra Libre (Fig. 1, Lagarda-Lagarda, 1983; Paz-Moreno, 1992), where recently were reported huge volumes of

middle Miocene peralkaline acid lavas, associated with the Proto-Gulf of California (MacMillan et al., 2003; Barrera-Guerrero, 2012; Gómez-Valencia, 2014; Pérez-Aguilar, 2017), a precursor event to the current limit between the Pacific and North American plates. The geological deposits of obsidian in the Sierra Libre have been reported to the north in the localities of El Pilar-El Cajete and El Galindro (Fig. 2J, K and M), where occurred anhydrous obsidian nuclei, reaching up to 6 cm in diameter, within perlitic facies at the base of large rhyolitic lava with folded flow foliation and lithophysae (Contreras-Barragán et al., 2011; Hinojosa-Hinojosa et al., 2011a, 2011b; Hinojosa-Hinojosa et al., 2011a-b; Hinojosa-Hinojosa et al., 2011b; Barrera-Guerrero, 2012).

### 2.3.4. Sierra El Aguaje

Velderrain-Rojas (2014), reports that in the Sierra el Aguaje, located to the SW of the Sierra Libre, remain obsidian nodules developed in perlite facies of rhyolitic lava flows, which are emerging in the Arroyo San José de Robinson-El Tigre, within the Ejido Francisco Villa land (Figs. 1 and 2N). Geochemical analysis on Sierra El Aguaje obsidian shows a genetic link with peralkaline rhyolites of the Sierra Libre (Velderrain-Rojas, 2014).

## 3. Archaeological obsidian occurrence in Sonora

### 3.1. Pinacate region

The earlier geochemical obsidian analyses were conducted on El Pinacate Volcanic Field (PVF) at Los Vidrios, a primary source reported by Shackley in 1988, moreover, El Picú, Vidrios Viejos, Sierra Batamote and Lomas del Norte were found after (Vidal-Solano, 1998, 2005; Vidal-Solano et al., 2005). The importance of this research resides in a detailed stratigraphic geological record documented on these localities, and on the obsidian geochronology obtained (ca. 14 Ma and ca. 12 Ma, Vidal-Solano et al., 2008). Besides, Vidal-Solano (2005) categorized as peralkaline the chemical composition of the rhyolites and found a petrogenetic link at El Pinacate obsidian, where chemical rates are similar to the rocks formed at the beginning of the Gulf of California rifting.

Geochemical analysis from “Los Vidrios” locality, called Lomas del Norte by Vidal-Solano (1998, 2001 and 2005) and Vidal-Solano et al. (2005) to differentiate of a Quaternary basaltic cone in the PVF that has the same name, carried on by Steven Shackley (Shackley, 1988, 2005), showed that this obsidian source shows a secondary dispersion, reaching the Sierra Blanca and up to 65 km towards the Golfo of California. A second source was called “Los Sitios del Agua” (Martyneć et al., 2016) located 8–9 km from “Los Vidrios”, on the Sonoyta river. Apparently, “Los Sitios del Agua” correspond to the “Vidrios Viejos” source reported by Vidal-Solano (2005), characterized by a relevant color variability soft grey, black and jade green. Shackley recognized one geochemical group named “AZ unknown A” which later was confirmed as the “Los Sitios del Agua” source (Martyneć et al., 2016) found in the Phoenix Basin, frequently correlated to Los Vidrios source obsidian artifacts (Shackley, 1988).

### 3.2. Casas Grandes region in Sonora

Several geochemical studies had been conducted in the upper Bavispe Basin at Bacerac and Huachinera Municipality. Among the first analyzed samples were those recovered during the archaeological project *Reconocimiento Arqueológico en los Valles de Bavispe y San Bernardino, Sonora*, including samples of a potential source from Agua Fría Ranch (Douglas et al., 2003). The analysis produced two geochemical groups, one with the Agua Fría obsidian artifacts, characterized by high strontium contents, Shackley (<http://www.swxrflab.net/aguafría.htm>) places Agua Fría as a Tertiary Era source. Shackley points out chemical similarities between the Agua Fría group and the source Sierra La Breña from Chihuahua, Mexico. However, Agua Fría is not yet a primary

confirmed source due to the lack of a geological survey. The second geochemical group prevails among the samples from these archaeological sites. Obsidian archaeological distribution is more frequent in the south of the Upper Bavispe River Basin at the Huachinera municipality (Douglas and Quijada, 2004). The described appearance of the samples is banded, semi-translucent to lackluster and black to brownish.

Later, a new site nearby the town of Aribabi in the Huachinera zone, an obsidian source and lithic quarry, was recorder as Mesa de los vidrios, SON:H:16:3/H12B8626001 by Centro INAH Sonora archaeologist (Protección Técnica y Legal de Zonas Arqueológicas en Sonora Project).

Petrological and geochemical research was developed in the same locality, later known as Selene obsidian source (Kibler et al., 2014). This primary source emerged from fluidal rhyolite lava flow extended over 3 km. The anhydrous cores were placed only at the center of the lava flow structure due to the cooling type, 30 anhydrous nuclei per 1 square meter of density, and 3–8 cm long in size. Selene obsidian is described as black to red or reddish-brown color, occasionally banded and translucent appearance. The characterization of this source was based on the XRF analysis of 19 original samples (Kibler et al., 2014). Later these results were compared with those obsidian lithics recovered from the Upper Bavispe Valley and from the Moctezuma Valley, finding that in most cases, the raw material came from Selene (Kibler et al., 2014; Pailes, 2016a, 2016b).

Obsidian provenance research conducted in Chihuahua identified both Upper Bavispe Basin groups at 315 and 204 archaeological sites in the core zone of Casas Grandes cultural area, and 7 Selene obsidian flakes and 14 lithic artifacts from Agua Fria at 204, 242, 315 and 317 archaeological sites (Dolan et al., 2017), all sites are distributed over a 30 km zone around Paquimé and belong to the Medio Period (1200–1450 A.D.).

### 3.3. Moctezuma, Rio Sonora, Sahuaripa and Fronteras Valleys

A recent archaeological survey conducted in the Moctezuma Valley produced a systematic obsidian sampling (Pailes, 2016a). Forty-two samples were subject to XRF analysis, finding that 85% of the samples came from Selene source from Huachinera municipality; also five geochemical groups were recognized, 4 of them does not correspond to any known source, but one group was identified as Los Sitios del Agua source at El Pinacate region (Pailes, 2016a, 2016b).

In the Moctezuma Valley, Pailes (2016a, 2016b) reported that obsidian existed at seven archaeological sites about 47 recorded, with a distribution concentrated on the larger and complex sites in the northern zone of the Moctezuma Valley, and higher frequency was found at La Cuchilla and Teonadepa sites. Also, Pailes indicates that at La Cuchilla, was found an obsidian flake and core scrapers production; nevertheless, the most typical obsidian artifact was the triangular, concave base projectile arrow points, occasionally showing serrated edges, less than 1 cm long. The archaeological excavation conducted by Centro INAH Sonora on a habitation compound at La Cuchilla, dated from 1440 to 1660 A.D. (Blanquel-García and Hinojo-Hinojo, 2009). Otherwise, occupation at Teonadepa had been suggested from 1000 to 1550 A.D. showing the higher habitation rate among this kind of sites at northern Moctezuma Valley (Pailes, 2016a).

The most recent obsidian source provenance study includes a 292 lithic artifacts analysis from Río Sonora, Sahuaripa and Fronteras Valleys (Shackley, 2019). Several new chemical groups were reported, and the most representative was named “Río Sonora Unknown”. Other sources from Sonora were identified, Selene and Agua Fría obsidian were reported to the Sahuaripa and Fronteras Valleys sites, and Selene obsidian at Río Sonora Valley; also various known obsidian sources were identified from Arizona at Sahuaripa Valley sample, New Mexico and Chihuahua from Fronteras Valley, less representative, however. Shackley (2019) also reports the Los Vidrios source at Sahuaripa and FronterasValleys, which is considerably far from the source.

### 3.4. Central Coast of Sonora

Geochemical studies on obsidian provenance began as one of the lithic analysis objectives of La Pintada site archaeological research in 2009, which is a wide camp site and rock art locality at the northern portion of Sierra Libre (Fig. 1), south of Hermosillo Municipality, where obsidian represents the second most significant raw material. This notion was previously pointed out for a larger portion of the central coastline south of Bahía Kino (Bowen, 1976). Obsidian use at La Pintada was constant, at least since 400 A.D. to 1700 A.D. (Contreras-Barragán, 2011), although the cultural history at this site seems to have begun much earlier, according to the finding of Archaic Projectile Point types at the camp site. A geological survey was conducted as a geo-archaeological collaboration between Centro INAH Sonora and *Departamento de Geología de la Universidad de Sonora*; as a result, two obsidian sources were located, El Cajete source at Rancho El Pilar and El Galindo source, in the northeast zone of the Sierra Libre (Figs. 1 and 2).

It is important to note that obsidian artifacts of the Paleoindian Period had also been reported on Central Coast localities due to the significant archaeological evidence of cultural continuity in this cultural area. Obsidian Clovis points had been reported 48 km north of Guaymas (Di Peso, 1955; Bowen, 1976), at Cerro Izabal site (SON: J:16:8 site) at El Gramal site and El Bajío site (Sánchez-Miranda, 2010), also obsidian end scrapers have been recovered from El Fin del Mundo site (Sánchez-Miranda, 2010). We think it is unlikely that Clovis artifacts (and especially Clovis projectile points) were manufactured on local Sonora obsidian sources because of the size of the available obsidian nodules.

Later obsidian use contexts from Archaic to Prehistoric period were recorded at El Bajío locality, El Aigame (Sánchez-Miranda, 2010), Estero Tastiota (Holzkamper, 1956; López-Dávila, 2010), at Guaymas-Empalme zone in the Cochorit locality, where have been recorded a complete flaking process sequence on obsidian to the production of dart and arrow projectile points (Pérez-Reyes, 2015, 2016bib\_Pérez\_Reyes\_Tomás\_2015bib\_Pérez\_Reyes\_Tomás\_2016). Although no previous geochemical data have been reported, discreet low primary obsidian sources have been mentioned to El Gramal site, SON:N:11:20–21, Cerro Izabal site, SON:J:16:8 and El Bajío locality (Sánchez-Miranda, 2010).

## 4. Analytical methods

Geochemical analyses of the obsidian samples (Table 1) were performed with a portable X-ray fluorescence spectrometer (Thermo Scientific Niton XRF XL3t 500) at Mexican Geological Service (SGM), following the protocol reported by Zamora-Martínez et al. (2008) and Vidal-Solano et al. (2013).

The standards of the Instituto de Geología IGL series produced by the National Laboratory of Geochemistry and Mineralogy (LANGEM-UNAM; Lozano-Santa Cruz and Bernal, 2005) and some obsidian references samples previously analyzed in whole-rock by ICP and conventional XRF (Vidal-Solano et al., 2008, 2013bib\_Vidal\_Solano\_et\_al\_2008bib\_Vidal\_Solano\_et\_al\_2013) were analyzed under the same conditions to ensure control of the results. Minimum three measurements in each sample, using the SOIL and TestAllGeo modes, and 90–120 s per point, were taken on surfaces free of weathering and alteration to obtain the average concentrations for each element. Raw data and further analysis specifications are given in Vidal-Solano et al. (2020). Sonoran perlitic analytic data were obtained from previous scientific works (Vidal-Solano et al., 2014). The treatment of all geochemical data and the elaboration of diagrams were carried out with the IGPET 2007 software (Carr and Gazel, 2017). Finally, we prefer to use chemical quotients to avoid absolute values in the variation diagrams and, in this way, observe only the proportions between element concentrations.

**Table 1**

Chemical composition in ppm of the archaeological and geological samples of obsidian analyzed in this work, and geological samples of perlite reported in: \*1, Vidal-Solano et al. (2014); \*2, Vidal-Solano, unpublished ICP analysis; \*3, Barrera-Guerrero (2012); \*4, Velderrain-Rojas, 2014; \*5, Vidal-Solano and Gómez-Valencia, 2017; \*6, Gómez-Valencia (2011); Gómez-Valencia et al. (2015); \*7, Pérez-Aguilar (2017). The underlined number corresponds to the detection limit of the Thermo Scientific Niton XRF XL3t 500. GPOR and GPMR, Geological Province with Oligocene, and Miocene Rhyolites, respectively..

ARCHAEOLOGICAL SAMPLES												Geological Province
SAMPLE	Locality	Archaeological site	Fe	Mn	Zr	Nb	Y	Th	Rb	Sr	Zn	
LPROV	Caborca	SON:E:8:5	26247	684	1518	92	126	40	153	3	186	GPMR
35740	Trincheras	SON:F:11:37	6978	121	233	28	68	32	147	7	66	GPMR
35837		35837	27852	707	1537	94	125	41	155	3	189	
36366		SON:F:11:81	27106	709	1503	90	124	39	151	3	187	
36453		SON:F:10:134	26694	675	1485	90	122	38	149	<u>3</u>	182	
1231A	Hermosillo	SON:N:02:003	7639	188	183	15	21	18	99	150	37	GPMR
1231B			4825	99	125	9	12	18	95	64	22	
1231C			6454	166	172	9	17	16	87	131	36	
1231D			5899	173	165	9	15	14	81	125	33	
56510	Sierra Libre	SON:O:5:1	4593	121	90	<u>2</u>	<u>5</u>	14	121	16	38	GPMR
56630			6395	158	151	<u>2</u>	<u>5</u>	9	111	120	42	
56807			6384	183	149	<u>2</u>	<u>5</u>	11	110	117	28	
56819			9344	180	441	25	<u>5</u>	26	122	<u>3</u>	106	
56843			9887	235	679	<u>2</u>	<u>5</u>	<u>4</u>	104	<u>3</u>	110	
60566			10340	278	575	26	<u>5</u>	14	87	<u>3</u>	110	
60575			5022	138	119	9	<u>5</u>	13	111	66	30	
60591			980	<u>35</u>	8	<u>2</u>	<u>5</u>	<u>4</u>	5	23	135	
60599			7291	140	244	<u>2</u>	<u>5</u>	30	203	<u>3</u>	73	
60606			10323	253	697	<u>2</u>	<u>5</u>	8	108	<u>3</u>	107	
60687			11079	257	743	<u>2</u>	<u>5</u>	12	118	<u>3</u>	116	
65013			7041	208	178	10	<u>5</u>	14	93	136	34	
65020a			6223	192	154	<u>2</u>	<u>5</u>	<u>4</u>	122	118	34	
65020b			6905	<u>35</u>	177	10	<u>5</u>	13	93	143	34	
65047			10025	318	656	<u>2</u>	<u>5</u>	12	114	<u>3</u>	116	
65078i			9191	162	615	<u>2</u>	<u>5</u>	12	98	<u>3</u>	92	
65081			6583	166	155	<u>2</u>	<u>5</u>	11	111	120	58	
65085			7218	163	288	<u>2</u>	<u>5</u>	17	154	16	91	
65108i			8219	199	559	<u>2</u>	<u>5</u>	<u>4</u>	95	<u>3</u>	80	
65125i			9471	228	649	<u>2</u>	<u>5</u>	<u>4</u>	101	<u>3</u>	97	
65171			10339	302	623	<u>2</u>	<u>5</u>	<u>4</u>	110	<u>3</u>	106	
65173			34363	689	266	13	<u>5</u>	<u>4</u>	57	339	66	
65177			10941	219	864	<u>2</u>	<u>5</u>	11	116	<u>3</u>	119	
65208			6874	179	164	<u>2</u>	<u>5</u>	12	116	129	38	
67115			10514	300	605	25	<u>5</u>	15	84	<u>3</u>	112	
67151			31508	612	267	12	<u>5</u>	9	56	345	53	
67622a			6208	145	145	<u>2</u>	<u>5</u>	11	118	109	31	
67622b			6773	200	170	14	<u>5</u>	16	97	130	34	
81040a			4990	120	97	<u>2</u>	<u>5</u>	13	129	17	38	
81040b			7609	<u>35</u>	105	9	<u>5</u>	<u>4</u>	85	25	39	
81049b			5978	163	137	19	<u>5</u>	20	116	33	50	
81133			7547	126	400	<u>2</u>	<u>5</u>	20	140	<u>3</u>	88	
81146			8749	151	489	<u>2</u>	<u>5</u>	19	156	<u>3</u>	98	
81151			10104	268	666	<u>2</u>	<u>5</u>	7	101	<u>3</u>	101	
81212			10150	235	700	<u>2</u>	<u>5</u>	9	116	<u>3</u>	109	
81708			6453	135	150	<u>2</u>	<u>5</u>	9	112	119	32	
81880			6686	154	154	<u>2</u>	<u>5</u>	11	115	123	31	
81907			9911	232	648	<u>2</u>	<u>5</u>	9	108	<u>3</u>	106	
81933			9067	173	482	<u>2</u>	<u>5</u>	21	159	<u>3</u>	104	
81962			5908	104	161	<u>2</u>	<u>5</u>	13	110	54	23	
84215			9126	156	502	<u>2</u>	<u>5</u>	22	162	<u>3</u>	106	
84379			20658	366	306	13	<u>5</u>	9	76	303	56	
SLEG10-17A	SON:O:5:14	9413	244	552	25	70	13	81	<u>3</u>	106		
SLEG10-17B		9457	238	551	25	69	14	82	<u>3</u>	102		
SLEG10-19		10277	233	671	28	74	12	84	<u>3</u>	112		
SLEG10-199R		10590	240	824	<u>2</u>	<u>5</u>	11	112	<u>3</u>	132		

OBS-6	Santa Úrsula	SON:O:13:4	7975	212	183	13	<u>5</u>	17	100	153	35	GPMR	
OBS-7			6893	190	167	11	<u>5</u>	16	89	138	29		
obsidiana 1			6462	160	142	<u>2</u>	<u>5</u>	11	106	115	28		
obsidiana 4			6327	151	147	<u>2</u>	<u>5</u>	9	107	116	32		
obsidiana 5			6115	162	148	<u>2</u>	<u>5</u>	10	108	117	38		
obsidiana 6			7571	196	175	<u>2</u>	<u>5</u>	12	127	137	34		
obsidiana 7			6690	158	156	<u>2</u>	<u>5</u>	10	116	122	37		
obsidiana 10			6388	157	149	<u>2</u>	<u>5</u>	9	107	120	29		
SSU14-01A			4483	140	112	11	28	15	91	25	34		
SSU14-01B			4516	118	114	10	30	17	92	25	37		
SSU14-01C			4486	121	111	11	29	18	91	26	35		
obsidiana 8			SON:O:13:5	6433	169	147	<u>2</u>	<u>5</u>	9	115	127		38
obsidiana 9				6490	170	155	<u>2</u>	<u>5</u>	9	111	121		30
124000	Guaymas	SON:R:1:7	6629	166	167	11	19	14	88	133	33	GPMR	
124022			6632	185	167	8	18	15	87	132	165		
124001			6328	170	163	7	18	16	84	130	32		
1234A		SON:N:16:6	4251	104	114	4	10	16	87	59	19		
1234B			6608	171	169	10	18	15	90	135	33		
1234C			6199	172	161	9	17	14	84	129	30		
1236A		SON:N:16:8	5662	155	152	10	16	15	80	123	30		
1236B			4189	99	113	6	10	16	87	58	23		
1236C			6156	172	160	8	18	14	84	127	34		
1236D			6163	180	161	9	17	14	85	127	31		
1236E			4167	94	124	6	10	14	98	59	19		
1251		Opodepe	SON:K:1:3	6191	153	162	10	16	14	85	129		31
1266	7640			187	185	15	19	16	98	147	37		
1270	7263			186	176	14	19	17	96	145	36		
1281	8742			221	191	18	22	17	107	162	47		
55010	Cumpas	SON:L:1:6	4632	289	137	17	13	23	121	155	30	GPOR	
55335			3881	237	124	11	12	18	106	136	24		
SELENE1	Selene-Babidanchi	SON:H:16:3	3951	259	125	11	12	20	104	135	28	GPOR	
SELENE2			4243	264	133	12	11	19	107	144	29		
SELENE3			4261	272	131	15	12	20	112	144	30		
SELENE4			4056	261	128	12	12	20	102	140	29		
119740	Bacerac	CHIH:C:9:42	4934	300	143	18	14	25	124	160	33	GPOR	
120060			4552	280	133	17	14	21	117	151	33		
120110			8680	370	208	34	28	47	171	72	43		
120476			5004	320	147	20	15	23	125	167	33		
120476A			5879	373	150	25	14	27	154	183	49		
121040			5314	276	159	27	22	38	165	76	31		
121122			5048	297	174	14	13	17	105	175	32		
121403			6447	360	220	35	27	39	177	68	47		
121490			4234	268	134	13	12	17	109	149	30		
119583	Bacerac El Gato	CHIH:C:14:3	4456	183	154	18	20	32	140	86	22	GPOR	
92149	Bavispe	CHIH:C:9:4	3610	220	116	11	11	18	95	127	34	GPOR	
92190			3771	253	135	12	10	18	100	132	29		
92328			3931	259	127	10	12	19	106	138	31		
92354			142	30	5	<u>2</u>	<u>5</u>	4	2	7	<u>7</u>		
119002			4042	249	130	12	12	19	107	142	31		
119207			4118	265	130	11	11	20	106	140	29		
37068	Agua Prieta	SON:H:4:1	3704	251	119	10	11	20	99	130	28	GPOR	
37082		SON:H:8:2	3620	241	113	11	11	22	105	119	48		
37095		SON:H:8:1	3779	257	123	10	11	18	100	132	28		
37104A		SON:H:4:2	3904	274	124	12	11	17	104	135	29		
37104			3960	254	126	13	12	21	105	137	28		

GEOLOGICAL SAMPLES OF OBSIDIAN												Geological Province
SAMPLE	Locality	Source	Fe	Mn	Zr	Nb	Y	Th	Rb	Sr	Zn	
SE13-OBS <sup>*1</sup>	Babidanchi	Selene lava dome	8156	383	127	13	15	16	159	146	49	GPOR
EPVV10-01AR	El Pinacate	Vidrios Viejos (Cerro La Pirinola)	17150	350	908	<u>2</u>	<u>5</u>	<u>4</u>	114	<u>3</u>	117	GPMR
EPVV10-01A-ton1			17444	328	919	<u>2</u>	<u>5</u>	<u>4</u>	119	<u>3</u>	<u>7</u>	
EPVV10-01A-ton2			17161	316	911	<u>2</u>	<u>5</u>	<u>4</u>	119	<u>3</u>	<u>7</u>	
EPVV10-01A-ton3			17514	366	908	<u>2</u>	<u>5</u>	<u>4</u>	115	<u>3</u>	<u>7</u>	
EPVV10-01A-ton4			16776	369	904	<u>2</u>	<u>5</u>	14	110	<u>3</u>	<u>7</u>	
EPVV10-01A-tonpm			17150	350	908	<u>2</u>	<u>5</u>	<u>4</u>	114	<u>3</u>	<u>7</u>	
EPVV10-01A			16497	338	744	41	84	20	82	6	104	
EPVV10-01B			17127	367	761	42	84	19	85	6	111	
EPVV10-01BR			17762	381	947	<u>2</u>	<u>5</u>	15	116	<u>3</u>	116	
EPVV10-01B-ton1			17682	382	958	<u>2</u>	<u>5</u>	15	115	<u>3</u>	<u>7</u>	
EPVV10-01B-ton2			17911	391	948	<u>2</u>	<u>5</u>	14	113	<u>3</u>	<u>7</u>	
EPVV10-01B-ton3			17693	370	935	<u>2</u>	<u>5</u>	15	120	<u>3</u>	<u>7</u>	
EPVV10-01B-tonpm			17762	381	947	<u>2</u>	<u>5</u>	15	116	<u>3</u>	<u>7</u>	
PINACATE-1A			Sierra El Batamote		7775	180	234	18	<u>5</u>	19	75	
EH10-01	Hermosillo	Cerro Izabal	13000	270	730	43	79	23	126	3	134	GPMR
HE1401 <sup>*2</sup>			12646	394	771	<u>2</u>	79	20	143	3	127	
SLEC10-07A <sup>*3</sup>	Sierra Libre	Arroyo El Cajete	9788	272	586	25	69	13	81	<u>3</u>	103	GPMR
SLEC10-07B <sup>*3</sup>			9904	253	580	24	70	13	81	<u>3</u>	106	
84393-EC		10323	285	584	25	<u>5</u>	13	82	<u>3</u>	102		
SLEG10-19-ton1		Arroyo El Galindro	10654	221	821	<u>2</u>	<u>5</u>	10	117	<u>3</u>	<u>7</u>	
SLEG10-19-ton2			10468	232	834	<u>2</u>	<u>5</u>	20	107	<u>3</u>	<u>7</u>	
SLEG10-19-ton3			10648	267	816	<u>2</u>	<u>5</u>	<u>4</u>	111	<u>3</u>	<u>7</u>	
SLEG10-19-tonpm			10590	240	824	<u>2</u>	<u>5</u>	11	112	<u>3</u>	<u>7</u>	
EFV11-03B <sup>*4</sup>	Sierra El Aguaje	Arroyo de Robinson, Ejido Francisco Villa	12235	315		4	27	13	118	79	37	GPMR
EFV13-25A			7679	181	234	6	21	16	80	87	27	
EFV13-25B			6013	157	135	21	36	23	116	33	48	
EFV13-25C			5820	119	169	6	16	15	83	63	25	
SEAA13-13			6362	187	167	9	17	13	87	135	32	
SSU14-01A	Santa Úrsula	El Gito	4483	140	112	11	28	15	91	25	34	GPMR
SSU14-01B			4516	118	114	10	30	17	92	25	37	
SSU14-01C			4486	121	111	11	29	18	91	26	35	

GEOLOGICAL SAMPLES OF PERLITE											Geological Province
SAMPLE	Locality	Fe	Mn	Zr	Nb	Y	Th	Rb	Sr	Zn	
PCh <sup>*1</sup>	SMO undefined	8219	347	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	GPOR
PG13-01 <sup>*1</sup>		8750	328	<LOD	10	13	14	126	241	34	
PHua-1 <sup>*1</sup>	Huachinera	8621	490	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	GPOR
PHua-2 <sup>*1</sup>		10890	492	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	
P Bab-1 <sup>*1</sup>	Babidanchi	8028	571	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	GPOR
P Bab-2 <sup>*1</sup>		4569	490	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	
PSE13-06 <sup>*1</sup>		6264	399	<LOD	12	14	17	160	132	35	
P Ban-1 <sup>*1</sup>	Banámichi	5904	572	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	GPOR
P Ban-2 <sup>*1</sup>		6630	571	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	
PB13-01 <sup>*1</sup>		5496	568	<LOD	18	17	14	162	68	37	
PA13-01 <sup>*1</sup>		6297	405	<LOD	12	14	17	168	242	32	
PSLM <sup>*5</sup>	Sierra Los Mochos	8465	253	124	15	38	17	185	22	36	GPOR
PCar-2 <sup>*1</sup>	Carbó	7905	413	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	GPOR
ECDP09-02A <sup>*6</sup>	Rayón	6983	326	73	13	11	6	97	188	38	GPOR
PSL13-06 <sup>*7</sup>	Sierra Libre	14029	298	433	30	69	17	193	7	119	GPMR
PSL13-07 <sup>*7</sup>		16298	408	382	18	48	10	105	330	127	
PSL13-24 <sup>*7</sup>		16242	383	511	26	69	21	191	16	126	
PREF10-06 <sup>*3</sup>		14455	327	432	25	66	20	188	14	92	
PREF10-07 <sup>*3</sup>		15088	331	422	24	59	20	226	9	106	
PSLEG10-06 <sup>*3</sup>		15842	331	622	30	64	11	157	14	124	
PSLEG10-08 <sup>*3</sup>		17041	332	676	35	76	13	155	44	127	
PSLEG10-09 <sup>*3</sup>		14393	327	452	24	53	10	130	10	95	
PSLEG10-10 <sup>*3</sup>	15057	407	460	25	62	11	141	10	112		
PStU-1 <sup>*1</sup>	Sierra Santa Úrsula	7528	260	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	GPMR
PO13-01 <sup>*1</sup>	Cd. Obregón	8867	402	<LOD	9	12	13	91	200	34	GPOR
POb-1 <sup>*1</sup>		8403	412	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	
POb-2 <sup>*1</sup>		9805	497	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	
PSPC-1 <sup>*1</sup>	San Pedro de la Cueva	7012	396	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	GPOR
PSPC-2 <sup>*1</sup>		12218	477	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	

## 5. Geochemical results

The chemical concentrations of the analyzed geological and archaeological obsidian samples are reported in Table 1. The elements that presented the best detection results were the major elements Fe and Mn, as well as the trace elements Zr, Nb, Y, Th, Rb, Sr and Zn. The data show a compositional variation as a function of geographic length (Fig. 4A), which is evidenced by a Fe, Zr and Y enrichment, and a depleted Mn, Sr and Nb. The Fe/Mn, Zr/Rb, Sr/Y, and Y/Nb ratios allow discriminating two geochemical domains (Fig. 4B and C). Ternary diagrams allow us to observe these two domains differences better, showing that the relations between Sr/Y, Zr/Rb and Nb/10 ratios are good discriminators (Fig. 5).

## 6. Discussion

### 6.1. Geographical and geological implications

During the Oligocene-Miocene epoch in NW Mexico, and particularly in Sonora, important volcanic manifestations of rhyolitic composition occurred in two petro-tectonic contexts. These, although the development of abundant domes and lavas with obsidian facies, were strongly hydrated, transforming into perlite deposits, losing cohesion and decreasing the volume of obsidian material to only marekanites less than 15 cm in diameter (Fig. 2). This accentuated process of perlitization in the geological source of Sonora obsidian caused a more abundant

presence of perlitic glass than obsidian in the primary sources (Fig. 2C, E, 2K and 2L), this being a discriminating feature to distinguish these outcrops from those that occur in the rest of Mexico as in the Trans-Mexican Volcanic Belt (Carballo and Pastrana, 2017; Pastrana et al., 2019). On the other hand, the volcanic rocks of the GPOR, which contain the oldest primary sources of obsidians in Sonora, are of greater volume and from a coulée flow-dome type, unlike those younger primary sources of the GPMR, which are from a low lava dome-type where complex spherulitic (up to 30 cm) and lithophysae facies are developed (Fig. 2A and I). These features were a consequence of the viscosity scale in the rhyolitic magmas, less fluid in GPMR magmas (Table 2). Moreover, GPMR rocks are locally associated, in some cases, with pyroclastic density current deposits. The volcanic stratigraphy that characterizes obsidian sources in the two provinces is different: in GPOR, they are constraining it, intermediate to basic lava flows (andesite, basaltic andesite and basalt), in GPMR they are acid lavas and pyroclastic deposits (Rhyolite). These GPOR geological features are correlated in the primary obsidian source at Sierra Los Mochos area, which is located in the coastal plains of Sonora, showing that the geology of the area corresponds to an exotic crustal block of the SMO in the GPMR (Fig. 1). This case shows the importance of geological mapping studies in the characterization of obsidian sources. Another example is the case represented by several primary sources occurring in the same sector. However, only one source is known, such as Selene obsidian, where the source was reported only in one of the two domes known in the region (Melgarejo-Joris, 2019, Table 2), or Los Vidrios and Los Sitios del Agua

**Table 2**

General geological and archaeological characteristics of perlite deposits with obsidian source in the geological provinces with Oligocene and Miocene rhyolites of Sonora, México..

Locality of perlite with obsidian source	Site	Site dimension	Primary source type	Geological province	Chemical composition affinity	Obsidian (nodules)			Colour	Precesne of archaeological artifacts
						Size	Types	Characteristics		
El Pinacate	Vidrios Viejos (Los sitios del Agua)	< 0.5ha	Low lava domes and pyroclastic flow deposit	GPMR	Peralkaline rhyolite (Transitional magamtic series)	up to 10 cm	Nuclei, marekanites and apache tears	Excellent vitreous fracture with occasional cortex	Between black, brown and bluish gray and jade green	Dart and arrow points, debitage, cores, used flakes and blades.
	Lomas del Norte (Los Vidrios)									
	Sierra Batamote									
Hermosillo	Cerro Izabal	≤ 0.10ha	Low lava dome			< 5cm	Apache tears	Excellent vitreous fracture with occasional cortex	Grey, black to grey greenish and translucent green color	Projectile points.
Sierra Libre	Arroyo El Galindro	< 0.20ha	Low lava domes and pyroclastic flow deposit			< 6cm	Marekanites and apache tears	Excellent vitreous fracture	Grey, black to grey greenish and translucent green color, frequently opaque, vitreous, glossy, occasionally banded and translucent appearance	Dart and arrow points, cores, flakes.
	Arroyo El Pilar- El Cajete	< 0.10ha								
Sierra El Aguaje	Arroyo San José de Robinson-El Tigre, at Ejido Francisco Villa	< 0.10ha	Basal perlitic facies of lava flow	< 6cm	Marekanites and apache tears	Excellent vitreous fracture with occasional cortex	Grey, black to grey greenish and translucent green color, frequently opaque, vitreous, glossy, occasionally banded and translucent appearance	Dart and arrow points, cores, scrapers, debitage.		
Sierra Los Mochos	Cerro La Ventana	< 0.5ha	Coulée flow-dome	GPOR	Metaluminous rhyolite (calc-alkaline magmatic series)	< 4cm	Apache tears	Concentric exfoliation (difficult to flake due to its fracture pattern)	Dark gray	Not observed
Rancho Babidanchi	Domo Selene	> 1ha	Coulée flow-domes			10 cm	Nuclei, marekanites and apache tears	Excellent vitreous fracture	Red or reddish-brown color, occasionally banded and translucent appearance	Cores, debitage, scrapers, bifaces, retouch flakes and blades, arrow points.

sources (Shackley, 1988; Martyneec et al., 2016), that occur some kilometers north of the Cerro El Picú and Sierra Batamote sources at El Pinacate region. Finally, another type of primary obsidian source implication is the occurrence of obsidian blocks in some GPMR ignimbrites, where fragments come from previous local lava dome deposits, such as the case of the Cerro La Pirinola in the locality of Los Vidrios Viejos in the El Pinacate region (Vidal-Solano et al., 2008), or the rhyolitic pyroclastic flow deposit associated to a low lava dome from arroyo El Galindro in the Sierra Libre (Barrera-Guerrero, 2012).

## 6.2. Archaeological implications

### 6.2.1. Primary obsidian source

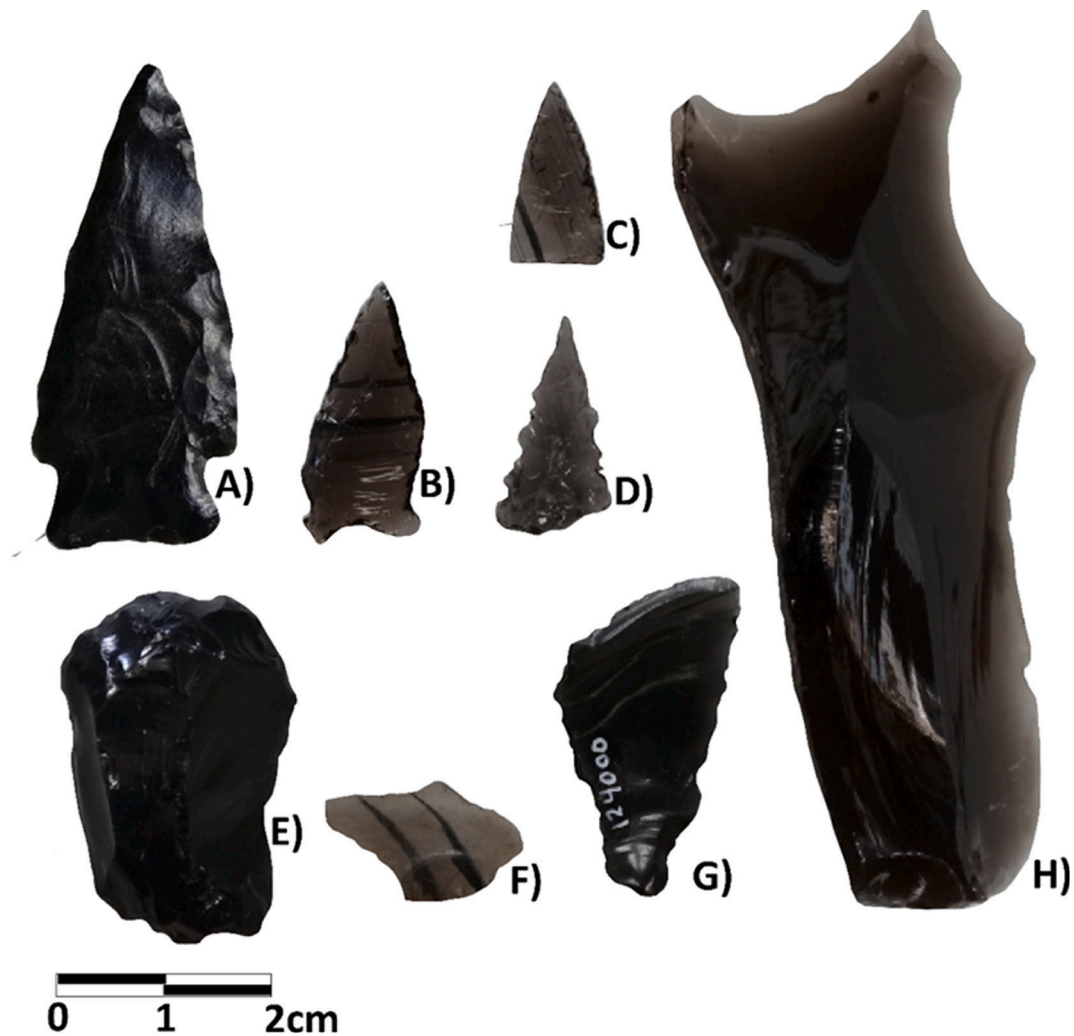
In this paper, we referred to **primary obsidian source** as a volcanic unit with one or several perlitic outcrops, wherein anhydrous cores are found *in situ* as components in the hydrous vitreous facies, characterized by a perlitic fracture (Table 2). Due to weathering, anhydrous cores can be observed in the vicinity of the source (Fig. 2D and H). Also, some of them could be flaked, in which case debris and artifacts may be accumulated (Fig. 3F and G). Additionally, a **secondary source** can be

considered as one that contains obsidian within sedimentary deposits, as are reported to Bahía San Felipe, Baja California where a distinctive obsidian flaking technique has been described (Porcayo-Michelini, 2014) and more recently to La Cueva site, Bacerac, Sonora (Martínez-Ramírez et al., 2016). Anvils are manufactured on volcanic alluvial pebbles or cobbles, which have a circular drill hole, 1.5–3 cm in size, on one or two faces of the cobble. Also, hammerstones can be found in the obsidian quarry context. Following the preceding, we report the presence of 7 new primary sources of obsidian in Sonora: Sierra Batamote at El Pinacate Region, Cerro Izabal at Hermosillo Region, Cerro La Ventana at Sierra Los Mochos, Arroyo El Galindro and El Pilar - El Cajete at Sierra Libre, Arroyo San José de Robinson at Sierra El Aguaje, and Domo Babidanchi (La Bendición) at Rancho Babidanchi (Table 2, Figs. 1, Fig. 2).

### 6.2.2. Use and distribution traits

There are some aspects to point out about obsidian use and distribution traits due to their geographic location along the coastal plains of Sonora (El Pinacate and Costa Central areas) and the Sierra Madre Occidental concerning the two geological provinces GPOR and GPMR

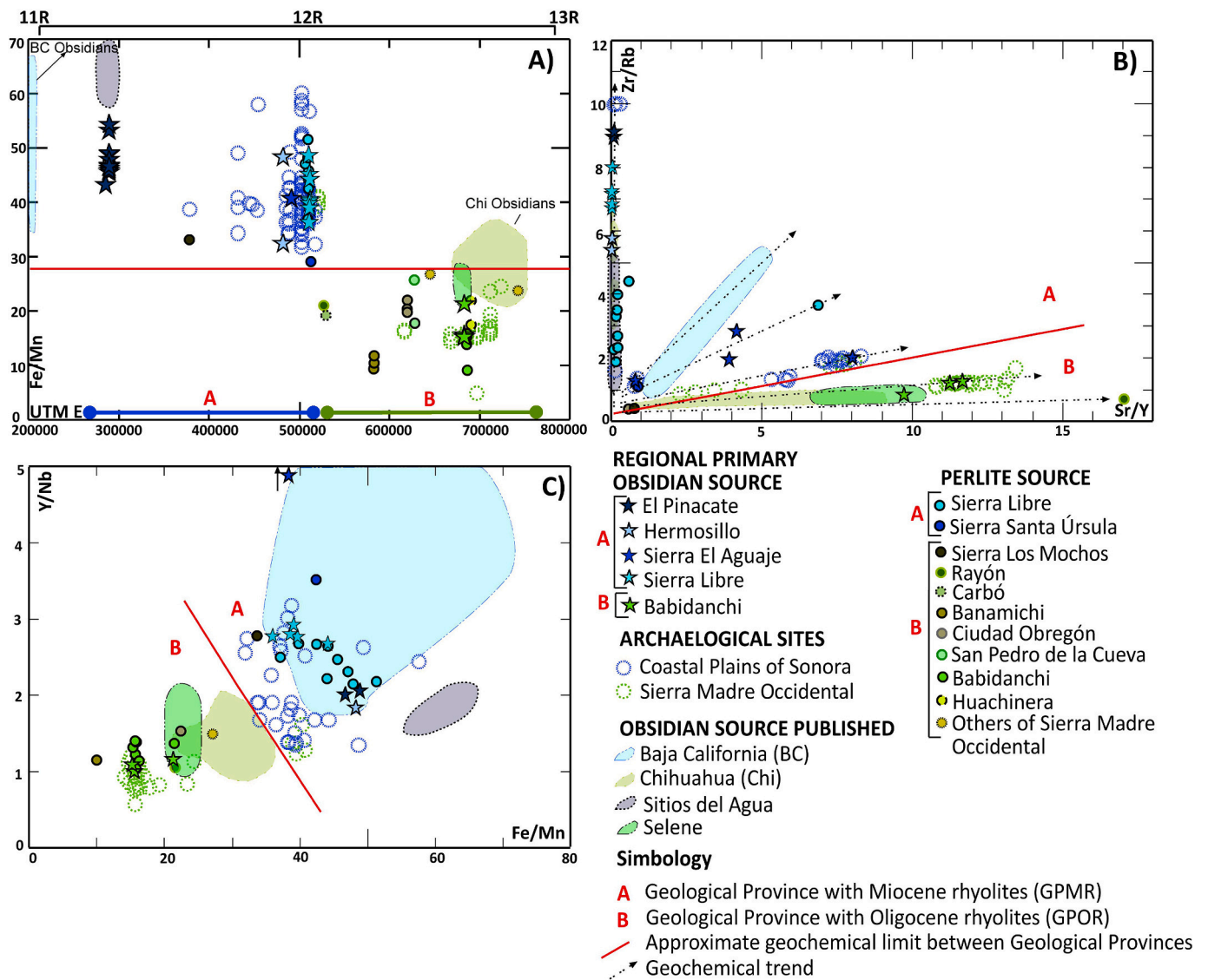




**Fig. 3.** Examples of the archaeological obsidian samples analyzed by XRF. The materials exhibit textural differences, tonality, transparency and translucency: A) projectile point, Trincheras 34–36453; B) Projectile point, Bavispe 55–119,002; C) Projectile point, Bacerac 45–119,740; D) projectile point, Cumpas 69–55010; E) Scraper, Guaymas 68–124,001; F) Bifacial retouched flake, Guaymas 66–124,000; G) Falke, 41120476 A; and H) Penknife, Bavispe 58–92190.

(Fig. 1). At El Pinacate, Rosenthal (1979) reported obsidian as the second more frequent lithic raw material around five principally types of rock from 54 archaeological sites surveyed by Julian Hayden. At the western sites (Tinaja Emilia-HPS 31 and Tinaja del Ojo-HPS32), this lithic component was formed by bifaces and projectile points, and also unifacial retouched flakes produced *in situ*, through bifacial flaking reduction (cf. Bipolar) of the obsidian nodules. Also, sites with a diverse production pattern are reported (Chivos Tanks-HPS 23, Tinaja del Cuervo-HPS 37 and Sitio La Playa -HPS 68) even so the focus on projectile point production is present (Rosenthal, 1979; López-Dávila, 2008). Despite Rosenthal (1979) pointed out about reduction process on obsidian nodules as the more recent lithic tradition at El Pinacate, Archaic obsidian dart projectile points had been identified in the archaeological collection from la Reserva de la Biósfera El Pinacate y Gran Desierto de Altar at the Schuk Toak Museum (km. 72 of the Peñasco-Sonoyta highway). Also, Ezell (1954) indicates the presence of Pinto, San José, northern side-notched and Gypsum projectile points, dated (Justice, 2002) from Middle to Late Archaic period (6000/5000–1500/800 B.C.). A comparable flaking process, like those specified to the El Pinacate region, has been recorded at the Central Coast of Sonora. Based on surface evidence, Bowen (1976) mentions that obsidian in the central coastline is selected to the manufacture of certain projectile point types, like concave base triangular type. Current findings at the southern Central Coast are suggesting an extensive obsidian

distribution, probably as a result of an intensive procurement and use of obsidian local primary sources. In recent, Prehistoric and Protohistoric periods, the obsidian acquisition is focused on the production of concave base triangular and ogival arrow points, showing serrated edges, also drills and cruciform are produced. Most constant and highest obsidian frequencies take place south of Bahía Kino (Bowen, 1976; López-Dávila, 2010), Tastiota (Holzkamper, 1956; López-Dávila, 2010), La Pintada - Sierra Libre zone (Contreras-Barragán, 2011) and at the north-central Guaymas Valley at the Arroyo Toro, Ranchito Santa Cruz, and Arroyo Santa Cruz sites (Pérez-Reyes, 2016). In this category of sites, obsidian frequency is around 15% of the total used raw materials, displaying a very complete and intensive flaked process (Contreras-Barragán, 2011). In the Guaymas region, we have found obsidians with a wide variety of characteristics (both physical and chemical), this could be an important component and potential zone to find diverse primary sources distinct from those on the La Pintada-Sierra Libre region. On the other hand, at SMO (Fig. 1), obsidian use at the upper Bavispe Valley begins in the Medio Period of Casas Grandes, but the greater concentration had been reported at the sites dated to 1300–1500 A.D. (Douglas and Quijada-López, 2004). At the interstate frontier between Chihuahua and Sonora obsidian use, although scarce, could occur earlier at open sites like “El Mirador” and Cliff dwellings like “Cueva de Ochoa” where obsidian artifacts were found in an adobe room dated to  $1071 \pm 87$  A.D. (Martínez-Ramírez et al., 2013). At “La Cueva” site (Bacerac



**Fig. 4.** Geochemical variation diagrams for northwestern Mexico perlites and obsidians: A) Longitude vs. Fe/Mn showing geographical distribution and chemical variation for the Lower Oligocene - Miocene Rhyolitic Province and the Middle-Late Miocene Rhyolitic Province; B) Sr/Y vs Zr/Rb showing geochemical trends between the established Rhyolitic Provinces; and C) Fe/Mn vs Y/Nb showing a chemical discriminant factor between Rhyolitic Provinces. Obsidian data from Baja California correspond to the localities reported by Panich et al. (2012), 2017, from Chihuahua, those reported by Dolan et al. (2017) and Sonora by Shackley (2018) and Kibler et al. (2014).

Municipality), recovered obsidian artifacts represent 12% of the lithic assemblage. In this site, a bipolar flaking technique has been recorded, and the production of dart and arrow projectile point distinct types (Martínez-Ramírez et al., 2016) like Guadalupe (100–100/1200 A.D.), Pueblo side-notched (1150–1300/1500 A.D.), Snaketown triangular (700–1150 A.D.), Cottonwood triangular (900 A.D.) and Sobaiपुरi (1500–1800 A.D.).

**6.2.3. Size implication**

One important consideration can be highlighted according to the size of the obsidian archaeological artifacts recovered in Sonora, as in central and western Mexico. The pieces that require abundant cores larger than 10 cm for their elaboration, as the Clovis artifacts, becomes unlikely that come from a Sonoran obsidian source. If it were the case, a particular regional exploration and/or a specified flaking process would be needed. Pervasive perlitization is common in NW México sources and, in many cases, can originate obsidian anhydrous nucleus of microns and millimeters in diameter (Fig. 2F and G).

**6.3. Geochemical implications**

**6.3.1. Perlites vs obsidians**

Since the perlitic glasses are derived from obsidian hydration in the primary source (Fig. 2), it is proposed to integrate to the chemical analyzes data of obsidian those of the perlite samples, in order to inquire about the origin of the archaeological artifacts. Geochemical studies focused on the analysis of perlite and obsidian in the same volcanic body at Babidanchi area, show that there is only a significant chemical difference in Na<sub>2</sub>O and MgO contents (Melgarejo-Joris, 2019; Melgarejo-Joris and Vidal-Solano, 2019). The reported analyzes of some Sonora perlites (Fig. 1 and Table 1), compared with the obsidian values of these localities, show the same geochemical behavior that allows them to be correlated and to define a specific domain for the PGOR and GMR geological provinces (Figs. 4 and 5). The narrow geochemical link between perlites and obsidians allows it to be possible to use perlite deposits as an exploration guide to finding new sources of archaeological obsidians.

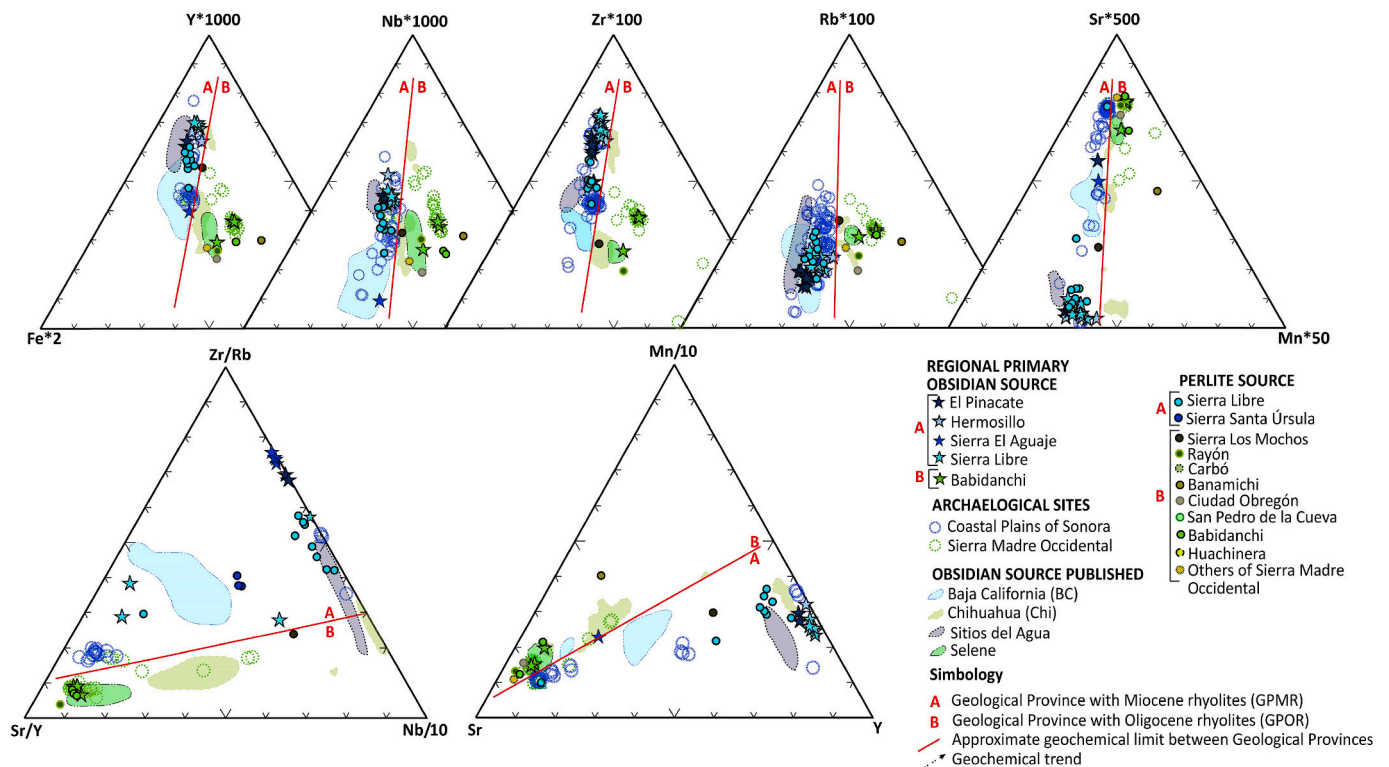


Fig. 5. - Geochemical ternary diagrams to discriminate provenance of northwestern Mexico obsidians and perlites. The main chemical characteristics of the Lower Oligocene - Miocene Rhyolitic Province and Middle-Late Miocene Rhyolitic Province can be observed. Obsidian data from Baja California correspond to the localities reported by Panich et al. (2012), 2017, from Chihuahua, those reported by Dolan et al. (2017), and Sonora by Shackley (2018) and Kibler et al. (2014).

### 6.3.2. Diagram definition

The geochemical diagrams developed in this work propose to emphasize the discrimination of geological provinces, showing the possibility of making a correlation at a regional level, which allows us to obtain valuable provenance information for the archaeological materials. In Sonora, perlites and obsidians of the GPOR (SMO) shows distribution in time and space different from those of the GPMR (Figs. 4 and 5). These geological features also maintain a geochemical identity, which is derived from the genesis of magmas involved in different tectonic scenarios (Basin and Range vs. Proto-Gulf of California).

### 6.3.3. Archaeological and geological obsidian-perlite correlations

Archaeological artifacts analyzed data show congruence with those of the geological samples (perlites and obsidians) of the provinces where they were reported, except for the archaeological samples of Opodepe site (Table 1, Fig. 4), where it is observed that proportions of the element contents, regularly fall within the limits or even in the GPMR domain. It is maybe because they correspond to sources from the west, or because there is a variation in the source with these chemical characteristics. In the same way, some element contents in the perlite from the Sierra Los Mochos obsidian source fall within the limits or even in the GPMR domain; however their geological relations are those of the GPOR, showing in this case that the geological control can resolve this local geochemical particularity of the province (Fig. 4a and c). Out of these exceptions, the geochemical data of this study indicate that the source of the archaeological artifacts are located in each of the geological provinces where the archaeological sites are located. However, at the local level, it is necessary to design other discrimination diagrams due to the geochemical variations that the samples derived from the chemical heterogeneity of extruded magma can present. Despite this, it has been possible to correlate samples from several sources in the same volcanic area due to their petrogenetic identity, as in the case of peralkaline sources from El Pinacate or Sierra Libre area (Fig. 5).

### 6.3.4. NW Mexico source correlations

Sonora obsidian geochemical data compared with other source data that have been reported at El Pinacate (Shackley, 2018) and Selene (Kibler et al., 2014) in Sonora state, and at Casas Grandes regional system (Dolan et al., 2017) and on the west coast of the Gulf of California (Panich et al., 2017), in the neighboring states of Chihuahua and Baja California respectively, show a concordance with the geographic distribution of geological provinces GPOR and GPMR (Figs. 4 and 5). However, some primary sources of Chihuahua obsidians, such as Antelope Wells, Los Jagüeyes, Chihuahua Unknown A and B, show chemical characteristics similar to those of GPMR (Figs. 4 and 5). Nevertheless they cannot be related to volcanism developed in the Gulf of California geological context, so it is important to note that the geological provinces for obsidian provenance, proposed in this work, have a limitation in Chihuahua.

## 7. Conclusion

We believe that in order to advance in the recognition of primary obsidian sources and understand the phenomenon of geochemical variability so far reported in Sonora and other parts of the southwest of the United States and northwest Mexico, it is essential to have a geological control and to integrate samples of related perlite sources. The understanding of the magmatic evolution in time and space linked to the different volcanic events that develop obsidian is a key factor to associate or discriminate the chemical tendencies of the primary sources at the regional level. The geological studies that have been carried out in the perlite deposits show that other variables must be considered apart from the chemical composition of the primary obsidian sources, such as the degree of perlitization that determines the size of the nuclei. Besides, its distribution is important for the recognition of new archaeological sites or unknown primary sources and associated with a provisioning network of raw materials in prehistoric times.

## CRedit authorship contribution statement

**Jesús Roberto Vidal-Solano:** Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing - original draft, Writing - review & editing, Supervision. **Alejandra Marisela Gómez-Valencia:** Validation, Formal analysis, Data curation, Writing - original draft, Writing - review & editing, Visualization, Project administration. **Adriana Hinojo-Hinojo:** Validation, Formal analysis, Resources, Data curation, Writing - original draft, Writing - review & editing, Visualization. **Rufino Lozano-Santa Cruz:** Validation, Investigation, Resources, Writing - review & editing.

## Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

## Acknowledgments

The authors extend special thanks to the following archaeological projects directed by Centro INAH Sonora and the University of Sonora and those who conducted them: (1) Proyecto Arqueológico La Pintada/Arqlga. Blanca Eréndira Contreras Barragán; (2) Proyecto Arqueológico Sierra Alta de Sonora/Arqlgo. Jupiter Martínez; (3) Colecciones comparativas de los materiales arqueológicos bajo custodia del Centro INAH Sonora/Arqlgo. Júpiter Martínez and Adriana Hinojo; (4) Research Grant #61198 from CONACYT (Mexico) project “Study of eruptive mechanism and petrogenesis of the peralkaline volcanism in NW Mexico (Sonora and Baja California)” to Jesus Roberto Vidal Solano; and (5) Research Grant #180784 from CONACYT (Mexico) project “Geodynamic Evolution of the Proto-Gulf of California: Emphasis on the volcanic remains of the Miocene in Sonora, Mexico” to Jesus Roberto Vidal Solano. Also, present special thanks to the Servicio Geológico Mexicano (Gerencia Noroeste) for authorizing the use of their XRF Analyzer, and their support, to the assistance received from Engr. Pedro Ygnacio Hernández Rábago, Engr. Francisco Cendejas Cruz and Geol. Guadalupe Zapata. For their support in making thin sections, we thanks to Geol. Adriana Aimé Orcí Romero from the Laboratorio de Laminación, ERNO-UNAM. Finally, we thank to the editor and anonymous reviewers that helped to improve this document.

## References

- Barrera-Guerrero, S., 2012. Contribución al estudio del Evento volcánico hipercalino del Mioceno Medio en el NW de México: Petrología de la Sierra Libre. M. S. Thesis. Universidad de Sonora, Sonora, 113pp.
- Blake, S., 1990. Viscoplastic models of lava domes. In: IAVCEI Proceedings in Volcanology, vol. 2. Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 88–126. Lava flows and domes.
- Blanquel-García, D.E., Hinojo-Hinojo, A., 2009. Proyecto de Salvamento Arqueológico Las Mesetas-Hermosillo 5. Preliminary Report. Centro INAH Sonora, p. 36.
- Bowen, T., 1976. Seri prehistory. In: The Archaeology of the Central Coast of Sonora, Mexico. Anthropological Papers, Issue 27. University of Arizona Press, Tucson, 120 pp.
- Carballo, D.M., Pastrana, A., 2017. Aztec obsidian industries. In: Nichols, Deborah L., Rodríguez-Alegría, Enrique (Eds.), The Oxford Handbook of the Aztecs. Oxford University Press, pp. 329–341.
- Carr, M.J., Gazel, E., 2017. Iqpet software for modeling igneous processes: examples of application using the open educational version. Mineral. Petrol. 111, 283–289.
- Cochemé, J.J., Demant, A., 1991. Geology of the yécora area, northern Sierra Madre Occidental, Mexico. In: Perez, E., Jacques, C. (Eds.), Studies of Sonoran Geology: Geol. Soc. Am. Special Paper, vol. 254, pp. 81–94.
- Contreras-Barragán, B.E., 2011. Informe técnico del Proyecto Arqueológico La Pintada, Sonora, tercera temporada 2009-2010. Report. Centro INAH Sonora, p. 639.
- Demant, A., Cochemé, J.J., Delpretti, P., Pignet, P., 1989. Geology and petrology of the tertiary volcanics of the northwestern Sierra Madre Occidental, Mexico. Bull. Soc. Géol. France 4, 737–748.
- Di Peso, Ch., 1955. Two Cerro Guaymas Clovis fluted points from Sonora, Mexico. KIVA 21 (1–2), 13–15.
- Dolan, S.G., Whalen, M.E., Minnis, P.E., Shackley, M.S., 2017. Obsidian in the Casas Grandes world: procurement, exchange and interaction in Chihuahua, Mexico, CE 1200 – 1450. J. Archaeol. Sci.: Report 11, 555–567.
- Douglas, J.E., Quijada-López, C.A., Martínez-Ramírez, J., 2003. Informe del Proyecto Reconocimiento Arqueológico en los Valles de Bavispe y San Bernardino, Sonora,

- México, Segunda Temporada. University of Montana and Centro INAH Sonora. Technical archive of the Archeology Section, Centro INAH Sonora, 180 pp.
- Douglas, J.E., Quijada-López, C.A., 2004. Between the Casas Grandes and the Río Sonora Valleys. In: Newell, G.E., Gallaga, E. (Eds.), Chronology and Settlement in the Upper Bavispe Drainage: Surveying the Archaeology of Northwest Mexico. University of Utah, pp. 93–109.
- España-López, R., 2015. La Tradición Teuchitlán, Revista Occidente, pp. 1–13.
- España-López, R., Ponce-Ordaz, C., 2003. La Obsidiana en el Contexto Arqueológico de Los Guachimontones: un recurso estratégico en el desarrollo de sociedades estatales. In: Cach, Eric (Ed.), Arqueología del Centro de Jalisco, vol. IV. Universidad de Guadalajara, Campus Lagos de Moreno, Jalisco. Núm. 1, pp. 73–93.
- España-López, R., Ponce-Ordaz, C., 2005a. La Obsidiana del contexto Arqueológico de los Guachimontones, Teuchitlán, Jalisco. Archaeological Project report of Teuchitlán-Colegio de Michoacán, pp. 145–170.
- España-López, R., Ponce-Ordaz, C., 2005b. La Obsidiana en el contexto arqueológico de los Guachimontones, Teuchitlán, Jalisco. In: Simposio Arqueología: El Occidente de México y el Mundo Mesoamericano, 28pp.
- Ezell, P.H., 1954. “An Archaeological Survey of Northwestern Papaguera”: the Kiva, vol. 19. Spring, Tucson, pp. 1–26. No. 2-4.
- Gilman, C., 2016. Culture Areas of Sonora in the Archaeology of Sonora. Archaeology Southwest Magazine, Online Highlights, Issue Editors, vol. 30. Randy McGuire and Elisa Villalpando, 3.
- 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. BSc Thesis in Geology. Universidad de Sonora, p. 143.
- 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. M.S. Thesis. Universidad de Sonora, p. 142.
- Gómez-Valencia, A.M., Vidal-Solano, J.R., López-Martínez, M., Vega-Granillo, R., y Pallares, C., 2015. Petrografía, geoquímica y geocronología del magmatismo orogénico en Rayón: características Petrologías de los últimos magmas asociados a la subducción en Sonora. Mexico: Rev. Mex. Ciencias Geol. 32 (2), 219–238.
- Hinojo-Hinojo, A., Gómez-Valencia, A.M., Vidal-Solano, J.R., Contreras-Barragán, B.E., 2011a. Antepasados de Obsidiana en La Pintada. “Señales de Humo” Centro INAH Sonora Bulletin, Mayo- Agosto 2011, p. 9.
- Hinojo-Hinojo, A., Gómez-Valencia, A.M., Vidal-Solano, J.R., y Contreras-Barragán, B.E., 2011b. “Estudio de los materiales líticos del sitio arqueológico La Pintada mediante el uso de un espectrómetro portátil de rayos X”, XVI Reunión Universitaria de Investigación en Materiales RUIM 2011. Universidad de Sonora - Hermosillo, Sonora, p. 94.
- Hinojosa-Prieto, H.R., Vidal-Solano, J.R., Kibler, K., Hinojosa-García, H.J., 2016. Geology of the Selene perlite deposit in the northern Sierra Madre Occidental, northeastern Sonora, México. Bol. Soc. Geol. Mex. 68 (Núm. 1), 129–163.
- Holzkamper, F.M., 1956. Artifacts from Estero Tastiota, Sonora, Mexico. KIVA 21 (No. 3 a 4), 12–19.
- Judd, J.W., 1886. On Marekanite and its Allies, vol. 3. Geological Magazine, London, pp. 241–248. Decade 3.
- Justice, N.D., 2002. Stone Age Spear and Arrow Points of the Southwestern United States. Bloomington & Indianapolis. Indiana University, Press.
- Kibler, K.W., Hinojosa Prieto, H.R., Shackley, M.S., Hinojosa-García, H.J., 2014. The Selene obsidian source (formerly Sonora unknown B) of the upper Río Bavispe Basin, Sonora, Mexico. KIVA 80 (No. 2), 168–192.
- Lacroix, A., 1934. Volcanisme et lithologie, Mission au Tibesti (1930-1931) dirigée par M. Dalloni. Acad. Sci. Paris 61, 169–366.
- Lagarda-Lagarda, I., 1983. Evaluación geológico-económica de los depósitos de perlita en la Sierra Santa Úrsula, Guaymas, Sonora. Bsc Thesis in Geology. Universidad de Sonora, 53pp.
- Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, P., 2002. Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms, Recommendations of the International Union of Geological Sciences Sub-commission on the Systematics of Igneous Rocks, second ed. Cambridge University Press, p. 236pp.
- López-Dávila, S.A., 2008. Proyecto de Salvamento Arqueológico Carretera Costera-Puerto Peñasco-Golfo de Santa Clara-Fase II. Centro INAH Sonora Report, p. 693.
- López Dávila, S.A., 2010. Proyecto de Salvamento Arqueológico Líneas de Transmisión eléctrica San Nicolás, Bahía Kino, Tastiota. Costa Central de Sonora. Centro INAH Sonora Report, 1467 pp.
- Lozano-Santa Cruz, R., Bernal, J.P., 2005. Assessment of a new set of geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis. Rev. Mex. Ciencias Geol. 22, 329–344.
- MacMillan, I., Gans, P., Roldán-Quintana, J., 2003. Voluminous mid-Miocene silicic volcanism and rapid extension in the Sierra Libre, Sonora, México. Geol. Soc. Am. Abstr. Prog. 34 (6) (electronic Abstract).
- Martínez-Ramírez, J., Delgado-Zamora, D.A., Jaramillo-Pérez, C., Rosas-Peña, J., Sánchez-Morales, I., Zúñiga-Núñez, X., 2013. Informe del Proyecto Arqueológico Sierra Alta de Sonora, Temporada 2013 Report. Centro INAH Sonora, 306 pp.
- Martínez-Ramírez, J., Jaramillo-Pérez, C., Ríos-Alvarado, A.G., 2016. Análisis de la lítica tallada, en: informe del Proyecto Arqueológico Sierra Alta de Sonora, Temporada 2015, Sitio La Cueva, CHIH:C:09:42. In: Martínez, J. (Ed.), Archivo Técnico de la Sección de Arqueología. Centro INAH Sonora, pp. 101–151.
- Martynec, R.J., Davis, R., Shackley, S., 2016. The Los Sitios del Agua Obsidiana Source (Formerly AZ Unknown A) and recent archaeological investigations along the Río Sonoyta, Northern Sonora. KIVA 76 (4), 413–429.
- Melgarejo-Joris, E., 2019. Caracterización petrológica y origen de los yacimientos de perlite en Babidanchi, NE de Sonora, México: Implicaciones geoquímicas e interdependencia de variables en su expansión. BSc Thesis in Geology. Universidad de Sonora, 129pp.

- Melgarejo-Joris, E., Vidal-Solano, J.R., 2019. Implicaciones geoquímicas e interdependencia de variables en la expansión de perlite. In: Iniguez, E., Kretschmar, T.G. (Eds.), Programa y Resúmenes del XXIX Congreso Nacional de Geoquímica, vol. 25. Actas INAGEQ, 206 pp.
- Pailes, M.C., 2016a. Archaeology of the Sierra Madre Occidental: research in the Moctezuma Valley of eastern Sonora, Mexico, 212. Arizona State Museum Archaeological Series, p. 446.
- Pailes, M.C., 2016b. Exchange economies of late prehistoric eastern Sonora, Mexico: a re-evaluation based on provenance data analyses. *J. Field Archaeol.* 41 (5), 587–602pp.
- Panich, L.M., Porcayo, A., Shackley, M.S., 2012. Obsidian sources of northern Baja California: the known and the unknown. *Calif. Archaeol.* 4, 183.
- Panich, L.M., Shackley, M.S., Porcayo, A., 2017. A reassessment of archaeological obsidian from southern Alta California and northern Baja California. *Calif. Archaeol.* 9 (Number 1), 53–77.
- Pastrana, A., Fournier, P., Parry, W.J., Otis, C.L., 2019. Obsidian production and use in Central Mexico after the Spanish invasion. In: Rani, T. (Ed.), *Technology and Tradition in Mesoamerica after the Spanish Invasion*. University of New Mexico Press, Albuquerque, pp. 15–33.
- Paz-Moreno, F.A., 1992. Le volcanisme mio-plio-quadernaire de l'Etat du Sonora (nord-ouest du Mexique): évolution spatiale et chronologique; implications pétrogénétiques. PhD Thesis, Univ. Aix-Marseille III, 220pp.
- Pérez-Aguilar, L., 2017. Evolución tectono-magmática en la región sur de la Sierra Libre, Sonora, México, y su relación con el proto-Golfo de California durante el Mioceno Medio-Tardío. MSc Thesis. Universidad de Sonora, 320pp.
- Pérez-Reyes Tomás, 2015. Report. Rescate Arqueológico Planta Ciclo Combinado Guaymas II Y III, Empalme, Sonora, vol. II. Centro INAH Sonora, 245 pp.
- Pérez-Reyes Tomás, 2016. Salvamento Arqueológico Obras Asociadas a la Subestación Empalme CC Sf6 Sonora. Report. Centro INAH Sonora, 923 pp.
- Porcayo-Michelini, A., 2014. Industria lítica de puntas de proyectil tipo San Felipe: La Industria lítica en el Norte de México, Coord. Leticia González Arratía and Lorena Mirambell. INAH, pp. 31–50.
- Rosenthal, J., 1979. Surface Context, Contemporaneity and Cultural Tradition: Chipped Stone Tools from the Sierra Pinacate, Sonora, Mexico. Ph.D. Thesis. The University of Arizona, 178 pp.
- Sánchez-Miranda, G., 2010. Los Primeros Mexicanos. Late Pleistocene/Early Holocene Archaeology of Sonora, Mexico. PhD. The University of Arizona, 360 pp.
- Shackley, M.S., 1988. Sources of Archaeological Obsidian in the southwest: an archaeological, petrological, and geochemical study. *Am. Antiq. Soc. Am. Archaeol.* 53 (4), 752–772.
- Shackley, M.S., 2005. *Obsidian: Geology and Archaeology in the North American Southwest*. University of Arizona Press, p. 246.
- Shackley, M.S., 2018. *Sources of Archaeological Obsidian in the Greater American Southwest*. Retrieved from. <http://www.swxrflab.net/swobsrscs.htm>.
- Shackley, M.S., 2019. Source Provenance of Obsidian Artifacts from Archaeological Contexts in Three Regions of Sonora, Mexico., Report prepared to Sánchez G. and Pailes M. for Proyecto Sahuaripa y Ladera Oeste de la Sierra Madre. INAH -The University of Oklahoma, 34 pp.
- Velderrain-Rojas, L.A., 2014. Contribución al estudio de los eventos volcánicos del Mioceno en la Sierra El Aguaje, porción Costera de Sonora, México. BSc Thesis in Geology, Universidad de Sonora, p. 121pp.
- Vidal-Solano, J.R., 1998. Contribución al estudio del Evento Volcánico Terciario Pre-Pinacate, Campo El Pinacate NW de Sonora, México: Geología, Petrografía y Geoquímica. BSc Thesis, Universidad de Sonora, p. 40p.
- Vidal-Solano, J.R., 2001. Estudio petrogenético del evento volcánico neógeno Pre-Pinacate, El Pinacate, Sonora, México. MSc Thesis. Universidad de Sonora, 93pp.
- Vidal-Solano, J.R., 2005. PhD Thesis. Le volcanisme hypercalcin d'âge Miocène moyen du Nord-ouest du Mexique (Sonora), Minéralogie, Géochimie, cadre géodynamique, vol. III. Université Paul Cézanne Aix Marseille, 180pp.
- Vidal-Solano, J.R., Paz Moreno, F.A., Demant, A., 2005. Caracterización y Geocronología del Evento Volcánico Terciario Pre-Pinacate, Campo El Pinacate, Noroeste de Sonora, vol. 18. Boletín del Departamento de Geología, UniSon, México, pp. 117–140 y 19.
- Vidal-Solano, J.R., Paz-Moreno, F.A., Demant, A., López-Martínez, M., 2007. Ignimbritas hipercalcalinas del Mioceno medio en Sonora Central: reevaluación de la estratigrafía y significado del volcanismo Terciario. *Rev. Mex. Ciencias Geol.* v24, 47–67.
- Vidal-Solano, J.R., Demant, A., Paz-Moreno, F.A., Lapierre, H., Ortega-Rivera, M.A., Lee, J.K.W., 2008. Insights into the tectonomagmatic evolution of NW Mexico: geochronology and geochemistry of the Miocene volcanic rocks from the Pinacate area. *Sonora: Geol. Soc. Am. Bull.* 120 (5/6), 691–708.
- Vidal-Solano, J.R., Lozano-Santa Cruz, R., Zamora, O., Mendoza-Córdova, 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. *J. Iber. Geol.* 39 (1), 121–130.
- Vidal-Solano, J.R., Reyna, M., Gastelum, J., Hinojosa-García, H., Perez-Tello, M., Hinojosa-Prieto, H., Escareño-Márquez, P., 2014. Petrographic, geochemical and thermal-gravimetric characterization on some perlite Oligocene deposits in the State of Sonora, Mexico: contribution to the study of the metallurgical process of expansion. *Adv. Miner. Mater. Eng. IMEC* 14pp.
- Vidal-Solano, J.R., Gómez-Valencia, A.M., 2017. Nuevos yacimientos de perlita y obsidiana relacionados al rifting del Oligoceno-Mioceno de la Sierra Madre Occidental ubicados en la provincia costera de Sonora, vol. 37. Reunión Anual Unión Geofísica Mexicana, Geos, p. 192. No. 1.
- Vidal-Solano, J.R., Gómez-Valencia, A.M., Hinojo-Hinojo, A., Lozano-Santa Cruz, R., 2020. Handheld X-Ray Fluorescence Geochemical Data of Geological and Archaeological Obsidian from Sonora. Data in Brief, Mexico (submitted for publication).
- Zamora-Martínez, O., Romero, M.F., Lozano-Santa Cruz, R., 2008. Evaluación del desempeño de un analizador portátil de Fluorescencia de Rayos X en la determinación de la composición elemental de residuos mineros. Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana, Pto. Vallarta, Jalisco, México. *Geos* 28 (2), 161.

# **ANEXO 3**

## **Artículo 3**

### **Handheld X-ray fluorescence geochemical data of geological and archaeological obsidian from Sonora, Mexico**

Vidal-Solano, J. R., Gómez-Valencia, A. M., Hinojo-Hinojo, A.,  
Lozano-Santa Cruz, R., 2020.



## Data Article

# Handheld X-ray fluorescence geochemical data of geological and archaeological obsidian from Sonora, Mexico



Jesús Roberto Vidal-Solano<sup>a,\*</sup>,  
Alejandra Marisela Gómez-Valencia<sup>a,b,c</sup>, Adriana Hinojo-Hinojo<sup>d</sup>,  
Rufino Lozano-Santa Cruz<sup>e</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Geología, Universidad de Sonora (UNISON), Hermosillo, México

<sup>b</sup> Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, Estación Regional del Noroeste, Universidad Nacional Autónoma de México (ERNO-UNAM), Hermosillo, México

<sup>c</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora (UNISON), Hermosillo, México

<sup>d</sup> Sección de Arqueología, Instituto Nacional de Antropología e Historia (Centro INAH Sonora) Hermosillo, México

<sup>e</sup> Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 3 August 2020

Revised 7 October 2020

Accepted 8 October 2020

Available online 22 October 2020

## Keywords:

Obsidian

Energy-dispersive XRF

Geochemical data

NW Mexico

Archaeological artifacts

## ABSTRACT

Geochemical detection using a portable XRF analyser is highly effective for nondestructive surface analysis in archaeological and geological obsidians. The data obtained in rock slabs, fragments, anhydrous nuclei, flaked and ground stone from Sonora, Mexico, were used to select certain analysed elements (Fe, Mn, Zr, Nb, Y, Th, Rb, Sr, Zn) that help to formulate geochemical variation diagrams to identify chemical trends and correlations between the samples. It proves to be an excellent analytical method for the provenance studies of archaeological artifacts. Subsequently, the integration of the obtained data here and their arrangement with the existing chemical analysis of obsidians for different localities of NW Mexico and the SW of the United States will allow for better knowledge of the primary sources of obsidian in the extraction and manufacture of archaeological artifacts.

DOI of original article: [10.1016/j.james.2020.102840](https://doi.org/10.1016/j.james.2020.102840)

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [roberto.vidal@unison.mx](mailto:roberto.vidal@unison.mx) (J.R. Vidal-Solano), [alejandra.gomez@unison.mx](mailto:alejandra.gomez@unison.mx) (A.M. Gómez-Valencia), [adriana\\_hinojo@inah.gob.mx](mailto:adriana_hinojo@inah.gob.mx) (A. Hinojo-Hinojo), [rufino@unam.mx](mailto:rufino@unam.mx) (R.L.-S. Cruz).

<https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106410>

2352-3409/© 2020 The Author(s). Published by Elsevier Inc. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

## Specifications Table

Subject	Geochemistry, Archaeology and Petrology
Specific subject area	Geoarchaeology (Obsidian provenance)
Type of data	Table (RAW DATA) Graphs Figure
How data were acquired	Determined by an X-Ray Fluorescence XL3t series NITON analyser from Thermo Fisher Scientific with support of the software Thermo Scientific™ Niton Data Transfer (NDT™)
Data format	Raw
Parameters for data collection	The analysis had an experimental stage to generate a final analytical protocol based on a repetition of at least three analyses per obsidian sample, procuring 120 counts per second, under the SOIL or TestAllGeo condition programs of Niton.
Description of data collection	The data was obtained from direct analysis on archaeological artifacts of obsidian of the Centro INAH-Sonora collections and geological materials of the La Rocateca-UNISON collection. Only some sections of rocks with relatively flat surfaces were required without any additional treatment of the geological samples. Excel was used to manage the database, descriptive analysis, and statistical evaluation were performed to define reliable element values.
Data source location	Institution: Servicio Geológico Mexicano (Gerencia Noroeste) City/Town/Region: Hermosillo, Sonora. Country: México
Data accessibility	Raw data in Mendeley Data <a href="https://data.mendeley.com/datasets/24kkg2hctg/5">https://data.mendeley.com/datasets/24kkg2hctg/5</a>
Related research article	Co-submission: J.R. Vidal-Solano, A.M. Gómez-Valencia, A. Hinojo-Hinojo, R. Lozano-Santa Cruz., 2020. Geochemistry and geological control of Sonora obsidian: New insights into the provenance study of archaeological obsidians in Mexico, Journal of South American Earth Sciences, Volume 104, 102,840. <a href="https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102840">https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102840</a>

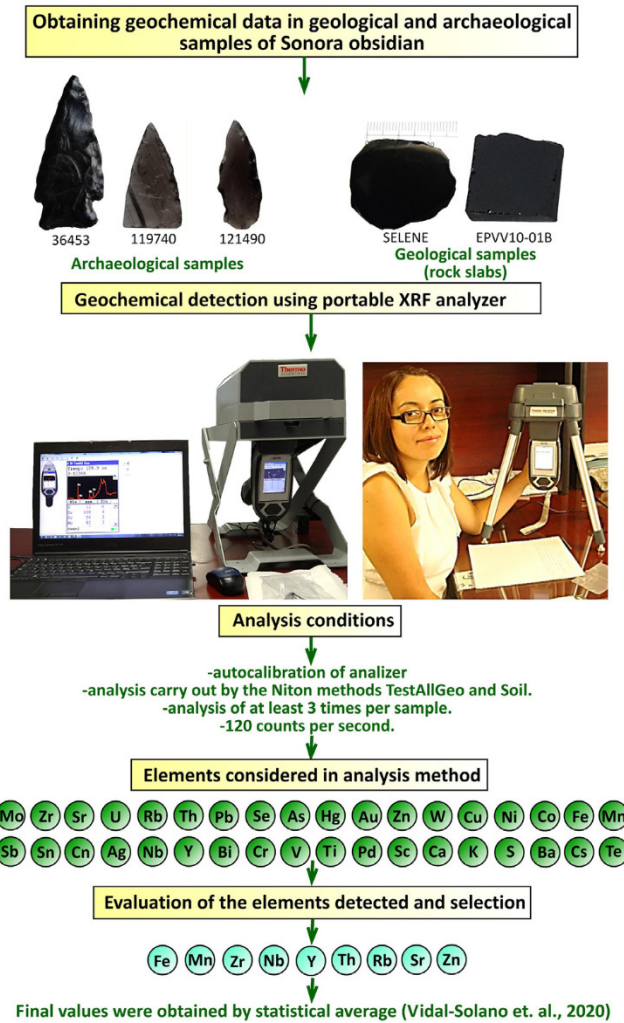
## Value of the Data

- This dataset provides a chemical reference of the samples from primary obsidian sources reported so far in Sonora, for comparative processing in existing XRF databases.
- This dataset could be of interest to geologists studying the distribution and the characteristics of rhyolitic volcanic units in NW Mexico.
- This dataset could be of interest to archaeologists studying the obsidian provenance in Mexico and SW of the USA.
- Based on an XRF portable analyser application model, the geochemical data from various sets of archaeological artifacts could be of comparative interest to other specialists.

## 1. Data Description

The raw geochemical data with Five hundred sixty-six analyses ([Supplementary Data and Fig. 1](#)), corresponding to 133 specimens of geological and archaeological obsidian artifacts mostly, including flaked and ground stone. Process 40 Projectile points, 36 varieties of lithic flakes, 17 lithic cores, 6 blades, 4 drills, 3 bifaces and 1 scraper were analysed; regarding ground stone objects, 1 cruciform and 1 pendant ([Fig. 2](#)) were analysed too. In the concerning of





**Fig. 1.** Analytical process concept map of the geological and archaeological specimens of obsidian from Sonora, Mexico.

primary source geological samples, 17 rock slabs previously employed in the petrographic studies performed, 4 anhydrous nuclei and 3 obsidian fragments were also analysed (Fig. 2).

The analysed samples come from 13 archaeological sites: **1**, Caborca (SON:E:8:5); **2**, Trincheras (SON:F:11:37; SON:F:11:81; and SON:F:10:134); **3**, Hermosillo (SON:N:2:3); **4**, Sierra Libre (SON:O:5:15 and SON:O:5:14); **5**, Sierra Santa Úrsula (SON:O:13:4 and SON:O:13:5); **6**, Guaymas (SON:R:1:7; SON:N:16:6 and SON:N:16:8); **7**, Opodepe (SON:K:1:3); **8**, Cumpas (SON:L:1:6); **9**, Selene-Babidanchi (SON:H:16:3); **10**, Bacerac (CHIH:C:9:42); **11**, Bacerac el Gato (CHIH:C:14:3); **12**, Bavispe (CHIH:C:9:4); and **13**, Agua Prieta (SON:H:4:1, SON:H:4:2; SON:H:8:1 and SON:H:8:2). Geological primary obsidian sources localities comprise Vidrios Viejos and La Sierra Batamote at El Pinacate Region, Cerro Izabal at Hermosillo, Arroyo El Cajete and Arroyo El Galindro at Sierra Libre, and Arroyo San José de Robinson of the Ejido Francisco Villa at Sierra El Aguaje. The characteristics of these obsidian geological deposits and other new localities are described in [1].

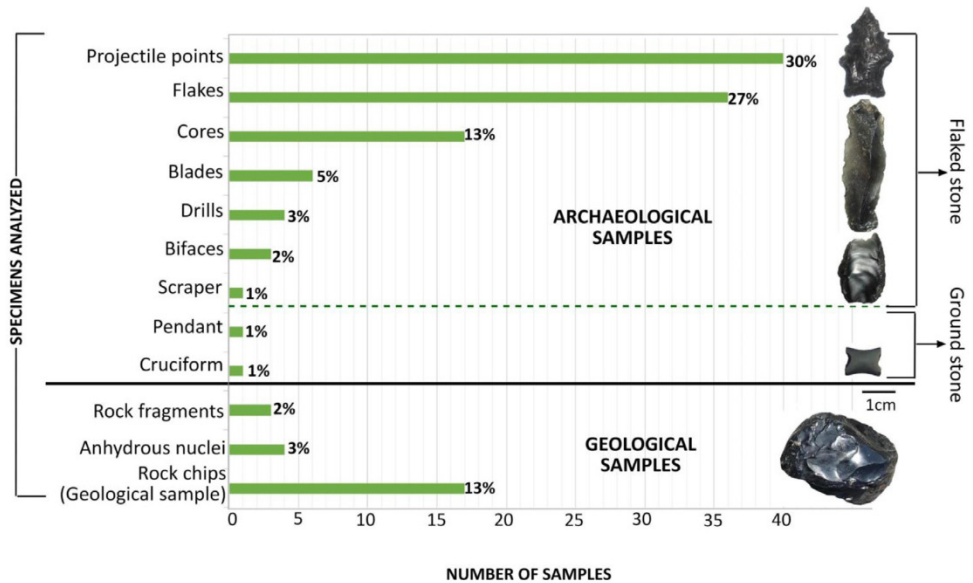


Fig. 2. Graphical representation of the concentration and types of geological and archaeological specimens of obsidian from Sonora, Mexico, analysed by the dispersive energy XRF technique (Supplementary Data).

## 2. Experimental Design, Materials and Methods

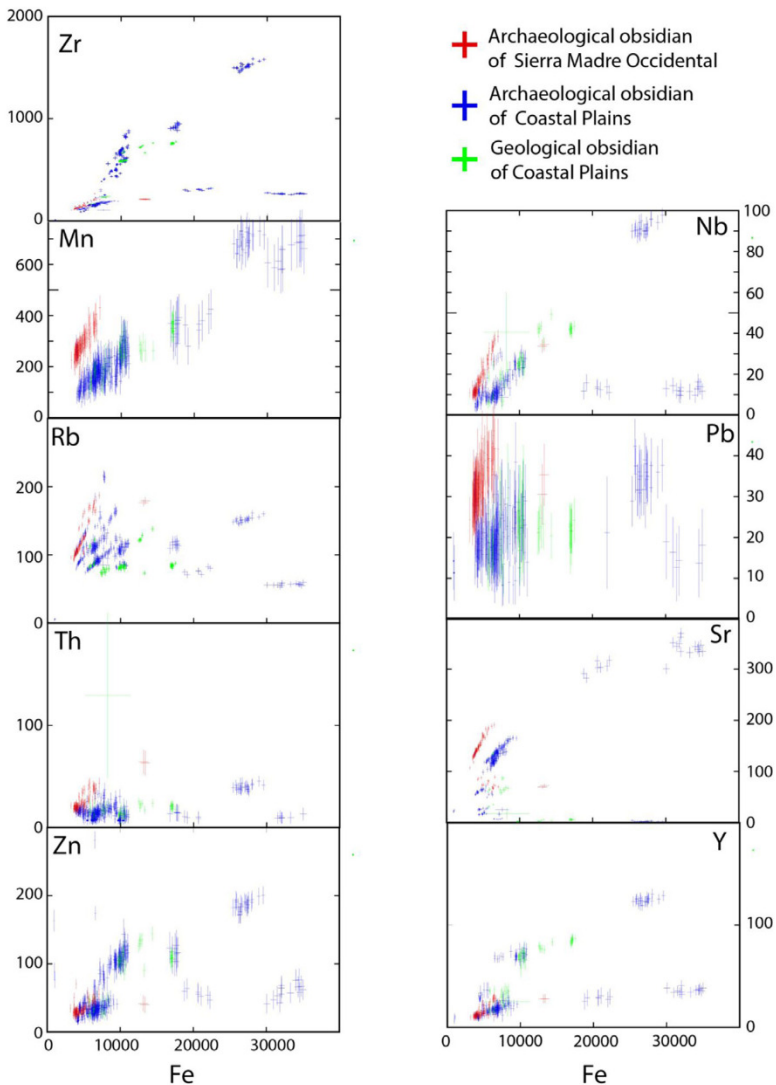
### 2.1. Selected samples

The initial stage in the obsidian analysis consisted of the petrological study of about 500 obsidian samples, both archaeological and geological, describing the physical parameters and appearance, the colour, the texture and the mineralogy to get the 133 obsidian specimens analysed [1] (Supplementary Data).

### 2.2. Sample processing and analysis

At the end of the experimental stage of the chemical detection of archaeological and geological obsidian samples, it was possible to establish an analysis protocol that was supported by the reliability values of the reference materials obtained by the portable analyser X-Ray Fluorescence XL3t (Fig. 1). The analysis method consisted first, in the auto-calibration of the device at the beginning of each examination stage, each measurement was 120 counts per second, and it was repeated at least three times per sample, slightly modifying the analysis position of the piece on each occasion. Subsequently, standardized reference materials [2], obsidian anhydrous nuclei and rock slabs were examined following the protocol to verify the reliability of the data. The device analysis mode was TestAllGeo or Soil method, which includes the widest element detection parameters to the geological application. The chemical elements considered by the *Niton Thermo Scientific, XL3t 500*, include: Mo, Zr, Sr, U, Rb, Th, Pb, Se, As, Hg, Au, Al, W, Cu, Ni, Co, Fe, Mn, Sb, Sn, Cd, Ag, Nb, Y, Bi, Cr, V, Ti, Pd, Sc, Ca, K, S, Ba, Cs y Te. The raw data of X-Ray analyses are presented in the supplementary material at Mendeley Data [<https://data.mendeley.com/datasets/24kkg2hctg/5>].

Subsequently, data processing was performed in Excel, which consisted of evaluating values obtained and its relationship with the analytical error for each element concerning the



**Fig. 3.** Geochemical variation diagrams for the elements selected and their analytical error in the ED- XRF raw data of the geological and archaeological specimens of obsidian analysed from Sonora, Mexico. The main chemical characteristics of obsidian samples related to geographical provinces can be observed.

reference standard. Elements with a low detection limit and those with high errors were discarded. The study obtained reliable detection values for Zr, Sr, Rb, Th, Pb, Zn, Fe, Mn, Nb and Y (Fig 1 and Fig. 3). Based on these chemical element values, a statistical average and a confidence limit at 95% were calculated using the student T for the number of measures in each sample. Some specimens are not reported because the measurements obtained were below the detection value [3] for certain chemical elements, or they were eventually measured at several times less than that required for the reported statistical values. Fig. 3 shows the variability and representativeness of the content of the nine selected elements, with their analytical error, for the geological and archaeological obsidian analyses, and the relations according to the geographical provenance. Good definitions and a tendency in the variation of the contents can be observed

in most elements except Pb. In addition, the archaeological samples from one province (Coastal Plains of Sonora, CPS) have a wide range in the element contents such as Mn, Rb, Zn, Nb, Sr and Y, but especially in Fe and Zr, with values from 3000 ppm to more than 30,000 ppm and from ~100 ppm to ~1500 ppm respectively. The chemical contents of geological obsidian samples from CPS sources are consistent with some values of the archaeological samples from the same province.

## Ethics Statement

Does not apply to this data.

## Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships which have, or could be perceived to have, influenced the work reported in this article.

## CRediT authorship contribution statement

**Jesús Roberto Vidal-Solano:** Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing - original draft, Writing - review & editing, Supervision. **Alejandra Marisela Gómez-Valencia:** Validation, Formal analysis, Data curation, Writing - original draft, Writing - review & editing, Visualization, Project administration. **Adriana Hinojo-Hinojo:** Validation, Formal analysis, Resources, Data curation, Writing - original draft, Writing - review & editing, Visualization. **Rufino Lozano-Santa Cruz:** Validation, Investigation, Resources, Writing - review & editing.

## Acknowledgments

The x-ray fluorescence analyses were performed at the Servicio Geológico Mexicano (Gerencia Noroeste) and we appreciate the assistance received from Engr. Pedro Ygnacio Hernández Rábago, Engr. Francisco Cendejas Cruz and Geol. Guadalupe Zapata. The manufacturing of the rock slabs was done in the Lamination Laboratory ERNO-UNAM, thanks to Geol. Adriana Aimé Orcí Romero. The authors extend special thanks to the following archaeological projects directed by Centro INAH Sonora and the University of Sonora and those who conducted them: (1) Proyecto Arqueológico La Pintada/ Arqlga. Blanca Eréndira Contreras Barragán; (2) Proyecto Arqueológico Sierra Alta de Sonora/ Arqlgo. Júpiter Martínez; (3) Colecciones comparativas de los materiales arqueológicos bajo custodia del Centro INAH Sonora/ Arqlgo. Júpiter Martínez and Adriana Hinojo Hinojo; (4) 61198 CONACYT Project "Study of eruptive mechanism and petrogenesis of the peralkaline volcanism in NW Mexico (Sonora and Baja California)"/Dr. Jesus Roberto Vidal Solano; and (5) 180784 CONACYT Project "Geodynamic Evolution of the Proto-Gulf of California: Emphasis on the volcanic remains of the Miocene in Sonora, Mexico" /Dr. Jesus Roberto Vidal Solano.

## Supplementary Data

Raw data to this article can be found online at Mendeley Data <https://data.mendeley.com/datasets/24kkg2hctg/5> or <http://dx.doi.org/10.17632/24kkg2hctg.5>

## References

- [1] J.R. Vidal-Solano, A.M. Gómez-Valencia, A. Hinojo-Hinojo, R. Lozano-Santa Cruz., Geochemistry and geological control of Sonora obsidian: new insights into the provenance study of archaeological obsidians in Mexico, *J. South Am. Earth Sci.* 104 (2020) 102840, doi:10.1016/j.jsames.2020.102840.
- [2] R. Lozano-Santa Cruz, J.P. Bernal, Assessment of a new set of geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 22 (2005) 329–344.
- [3] Thermo Scientific Niton XL3t GOLDD+ Series Environmental Analyzers: Elemental Limits of Detection in SiO<sub>2</sub> and SRM Matrices Using Soil Analysis. <https://es.scribd.com/document/319884174/Niton-XL3t-GOLDD-Alloy-LODs-AN44826-2010Jul13-1> (accessed October 1 2020).