

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

“PETROLOGÍA DEL VULCANISMO CRETÁCICO TARDÍO EN LAS REGIONES DE LA SIERRA EL CHANATE, CERRO LIBERTAD Y SIERRA LOS CERROS COLORADOS, SONORA OCCIDENTAL, MÉXICO”

TESIS

Que para obtener el Grado de:
Maestro en Ciencias-Geología.

PRESENTA:

JAVIER ALEXIS GARCÍA HUERTA



Hermosillo, Sonora, septiembre de 2017

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



UNIVERSIDAD DE SONORA
División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología
Maestría en Ciencias-Geología

TESIS DE MAESTRÍA

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

Alumno: **Javier Alexis García-Huerta**

Director de tesis: Dr. Jesús Roberto Vidal-Solano¹

Co-Director: cDra. Alejandra Marisela Gómez-Valencia^{1 y 2}

Asesores:

Dr. Juan Carlos García y Barragán^{1 y 3}, Dr. Cesar Jacques-Ayala³ y Dr. Ricardo Vega-Granillo¹

¹ Departamento de Geología, Universidad de Sonora (UNISON)

² Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora (UNISON)

³ Instituto de Geología, Estación Regional del Noroeste, Universidad Nacional Autónoma de México (ERNO-UNAM)

Hermosillo, Sonora, septiembre de 2017

DEDICATORIA

*La presente tesis está dedicada a las personas que
me han apoyado durante mi formación académica y personal,
a quienes agradezco y admiro...*

A mis padres

A mis Profesores

A todos mis familiares

Y a todos mis amigos y amigas

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a los proyectos de investigación CONACYT 180784 y 166018 respectivamente intitulados: 1) “Evolución geodinámica del Proto-Golfo de California: énfasis en los vestigios volcánicos del Mioceno en Sonora, México” a cargo del Dr. Jesús Roberto Vidal Solano; y 2) “Frente de cabalgadura laramídica en la región de Caborca-Santa Ana, Norte de Sonora: una alternativa a la hipótesis de la megacizalla de Mojave-Sonora” a cargo del Dr. César Jacques Ayala y al proyecto de investigación doctoral titulado: “Geodinámica de la Sierra Los Mochos-Puerto Libertad, Sonora-México: énfasis en el magmatismo orogénico adakítico de subducción al magmatismo anorogénico alcalino de rift y su significado con el Proto-Golfo de California.” a cargo de la cDra. Alejandra Marisela Gómez Valencia. Gracias al apoyo y de estos proyectos de investigación de ciencia básica fue posible realizar esta tesis. Además, estos proyectos llevaron a cabo el financiamiento para realizar trabajo de campo, laboratorio y algunos otros imprevistos de logística.

Quiero agradecer a mi director de tesis, el Dr. Jesús Roberto Vidal Solano, por permitirme formar parte de su proyecto de investigación, por la confianza, consejos y por estar siempre al pendiente del progreso de esta tesis de maestría. También quiero agradecer a mi co-directora de tesis, la cDra. Alejandra Marisela Gómez Valencia, por asesorarme y ayudarme enormemente cuando lo necesitaba.

Además, quiero agradecer a los miembros del Comité de Titulación: Dr. Ricardo Vega Granillo, Dr. Jesús Roberto Vidal Solano, cDra. Alejandra Marisela Gómez Valencia, Dr. Juan Carlos García y Barragán y Dr. César Jacques Ayala, quienes aceptaron ser parte de este jurado y fungieron como mis sinodales.

De igual manera agradezco al Instituto de Geología de la Estación Regional del Noroeste (ERNO-UNAM), al Químico Pablo Peñaflor encargado del Laboratorio de Preparación de muestras para geoquímica, gracias por su apoyo en la etapa de laboratorio; a la Geóloga Adriana Aimeé Orcí Romero por su apoyo en la elaboración de secciones delgadas para petrografía.

De la UNISON agradezco al personal administrativo del Departamento de Geología Unison. También agradezco a las M.C. Mavet Herrera Cadena y Dalila Canizalez Rodríguez, por facilitar el acceso al Laboratorio de Alimentos del Departamento de Ciencias Químico-Biológicas de la Universidad de Sonora, laboratorio en el cual se realizó una etapa de separación de circones, proceso en el que fue de gran ayuda mi amigo Luis Peña, gracias compañero.

Del Centro de Geociencias (CGEO) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Juriquilla, Querétaro, agradezco al Dr. Luigi Solari por el apoyo en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI); al técnico del LEI Carlos Ortega Obregón y a Harim Elmer Arvizu Gutiérrez, por su ayuda durante los fechamientos U-Pb en circones. También del CEGEO agradezco a la Química Ma. Concepción Arredondo de la Rosa del Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido CGEO, Campus UNAM Juriquilla, Querétaro, por su apoyo en la toma de imágenes en el SEM.

Del Instituto de Geología de la UNAM-CU, agradezco al Ing. Rufino Lozano Santacruz y al técnico Santiago Avilés Puntos ambos del Laboratorio de FRX del Instituto de Geología de la UNAM-CU, por su apoyo en la preparación de muestras y en la determinación de elementos mayores y trazas utilizados en esta tesis. Agradezco a la Ing. Geol. María del Consuelo Macías Romo del Laboratorio de Separación de Minerales I y II del Instituto de Geología de la UNAM-CU, por su apoyo en la separación y obtención de circones mediante la mesa Wilfley.

Por su ayuda en el trabajo de campo quiero agradecer a mis amigos: cDra. Alejandra Marisela Gómez Valencia, M.C. Luis Alonso Velderrain Rojas, Geol. Martín Alejandro Montaña del Cid, Geol. Angélica Bourjac de Anda y Geol. Jesús Ángel Zapata Martínez, gracias por su apoyo.

Además, quiero agradecer a mis amigos Farid Cruz Méndez, Hiram Amavisca y Alonso Figueroa quienes me ayudaron en la etapa de trituración de rocas.

Una pieza fundamental para el desarrollo de este trabajo es mi familia y amigos; pero el mayor agradecimiento es para mi madre Alejandra Huerta Garibay por todo el apoyo, comprensión y cariño que siempre me ha brindado a lo largo de mi formación académica y personal.

ALGUNAS ABREVIATURAS COMUNES USADAS EN ESTE TEXTO

A	andesita	LREE	Elementos de Tierras raras
AB	andesita basáltica		
AFC	Asimilación Fraccionada	ligeras	
		Ma	Millones de años
Anf	anfíbol	MORB	Basaltos de las dorsales medio oceánicas
Biot	biotita	N	Nogales,
C	Caborca,	Olv	olivino
CL	Cerro Libertad	Op	opacos
Czo	cuarzo	OxFe-Ti	Óxidos de Hierro-Titanio
D	dacita	Pl	plagioclasa
FA	feldespato alcalino	Px	piroxeno
FC	Cristalización Fraccionada	R	riolita
FET	Formación El Tuli.	RD	riodacita
FM	Formación Mesa	REAFC	Recarga-Erupción Asimilación-Cristalización Fraccionada
FRX	Fluorescencia de rayos x		
FT	Formación Tarahumara	REEs	Elementos de Tierras Raras
G	Guaymas	SCC	Sierra Los Cerros Colorados
GEC	Grupo El Chanate	SEC	Sierra El Chanate
H	Hermosillo	TA	traquiandesita
HFSE	Elementos de alto potencial iónico	VCTS	Vulcanismo del Cretácico Tardío en Sonora
HREE	Elementos de Tierras raras pesadas	VOPTS	Vulcanismo orogénico del Paleógeno Tardío en Sonora
L	latita		
LILE	Elementos litófilos de alto radio iónico		

RESUMEN

En el estado de Sonora el vulcanismo de arco continental que ocurrió durante el Cretácico Tardío ha sido ampliamente estudiado por diversos autores principalmente desde el punto de vista estratigráfico y metalogenético. Un análisis de la información recopilada en la literatura permite establecer que: 1) este vulcanismo ha sido reportado en diferentes unidades estratigráficas que corresponden a las formaciones Tarahumara, Mesa, El Tuli; complejo volcánico El Charro y Grupo El Chanate, presentes principalmente en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental como en la de la Llanura Sonorense; 2) la mayoría de las unidades estratigráficas datadas pertenecen a la Formación Tarahumara y coinciden en un rango de edad entre 80-64 Ma (Campaniano-Maastrichtiano); 3) las rocas tienen una firma geoquímica calci-alcalina y que van desde andesitas basálticas, andesitas, traquiandesitas y dacitas, predominando las variedades intermedias; y 4) las rocas presentan alteración; filica (cuarzo + sericita), argílica (caolinita + montmorillonita) y propilítica (clorita + epidota + sericita + pirlita) en menor proporción, predominando la alteración filica y argílica.

Por otra parte, en Sonora occidental, existen escasas investigaciones que reportan a este tipo de rocas, para lo cual en este trabajo de investigación se ha hecho un reconocimiento geológico en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, permitiendo ubicar nuevos afloramientos de este tipo de rocas magmáticas, en donde se encontró lo siguiente: 1) en La Sierra El Chanate se reconocieron dos series de derrames volcánicos andesíticos con una asociación mineral de Pl>FA>Anf>OxFe-Ti, estas unidades pertenecen al Cretácico Tardío; 2) en el Cerro Libertad existen unidades que posiblemente pertenecen al Cretácico Tardío y se agruparon como complejo volcánico Libertad, el cual está representado por depósitos epiclásticos-tobáceos, depósitos piroclásticos y derrames volcánicos de composición intermedia (Pl>FA>OxFe-Ti), que en general muestran una importante alteración argílica, filica y propilítica; y 3) en La Sierra Los Cerros Colorados se corroboró que la unidad de roca estudiada pertenece al Cretácico Tardío con una edad de 80 Ma y corresponde a una serie de 3 derrames volcánicos de composición intermedia (Pl>FA>OxFe-Ti; Pl>FA>Anf>OxFe-Ti; Pl>FA>Anf>Biot>OxFe-Ti), que fueron diferenciados principalmente por sus características petrográficas y mineralógicas, la intensa alteración filica - argílica y el elevado grado de fracturamiento.

Finalmente, mediante un estudio geoquímico de muestras representativas de las unidades cretácicas se obtuvo una evaluación de su alteración y de la movilidad de sus elementos mayores y traza, así como información sobre los procesos petrogenéticos implicados en su formación sugiriendo que estas rocas volcánicas calci-alcalinas en las regiones de estudio pudieron ser originadas mediante un proceso de recarga, erupción, asimilación y cristalización fraccionada (REAFc) en cámaras de magma de larga vida sometidas a recarga continua y cristalización fraccionada, siendo el modelo que más se ajusta en la evolución del vulcanismo Cretácico Tardío en Sonora.

Palabras clave: Vulcanismo, Cretácico Tardío, Sonora, Alteración.

CONTENIDO

I	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Justificación del estudio	3
1.2	Objetivo general y objetivos específicos	4
1.3	Localización de las regiones de estudio	4
1.4	Fisiografía	5
1.5	Metodología	7
II	ANTECEDENTES DEL VULCANISMO CRETÁCICO TARDÍO EN SONORA	9
2.1	Antecedentes del vulcanismo del Cretácico Tardío relacionados a las áreas de estudio	9
2.2	Información en la literatura del vulcanismo Cretácico Tardío en Sonora	10
2.3	Análisis y construcción de base de datos	19
2.4	Recopilación de datos geocronométricos	22
2.5	Recopilación de datos geoquímicos de rocas volcánicas del Cretácico Tardío	23
III	GEOLOGÍA DEL VULCANISMO CRETÁCICO TARDÍO DE LAS REGIONES DE ESTUDIO	24
3.1	Geología de la Sierra El Chanate	24
	3.1.1 Derrames de lava andesítica de Grupo El Chanate	24
	3.1.2 Derrames de lava andesítica del complejo volcánico El Charro	26
3.2	Geología del Cerro Libertad	29
	3.2.1 Granitoide laramide (Cretácico Tardío)	29
	3.2.2 Complejo volcánico Libertad (¿Cretácico Tardío?)	31
3.3	Geología de la Sierra Los Cerros Colorados	37
	3.3.1 Andesita porfídica	37
	3.3.2 Conglomerado	38
	3.3.3 Andesita porfídica de plagioclasa	38
	3.3.4 Andesita porfídica de feldespato	39
	3.3.5 Andesita glomeroporfídica	40
IV	PETROGRAFÍA DEL VULCANISMO CRETÁCICO TARDÍO	43
4.1	Petrografía de la Sierra El Chanate	46
	4.1.1 Grupo petrológico 1	46
	4.1.2 Grupo petrológico 2	46
	4.1.3 Grupo petrológico 3	46
4.2	Petrografía del Cerro Libertad	48
	4.2.1 Grupo petrológico 1	48
	4.2.2 Grupo petrológico 2	48
	4.2.3 Grupo petrológico 3	49
4.3	Petrografía de la Sierra Los Cerros Colorados	50

4.3.1	Grupo petrológico 1	50
4.3.2	Grupo petrológico 2	51
4.3.3	Grupo petrológico 3	51
V	ESTUDIO GEOQUÍMICO DE LAS UNIDADES VOLCÁNICAS EN LAS REGIONES DE ESTUDIO	54
5.1	Resultados	54
5.2	Evaluación de la alteración	54
5.3	Movilidad de los elementos	61
5.4	Características geoquímicas del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de estudio a partir de elementos traza y tierras raras	67
5.4.1	Clasificación	67
5.4.2	Afinidad magmática	69
5.4.3	Contexto tectónico	72
5.4.4	Características petrogenéticas	74
VI	GEOCRONOMETRÍA U-Pb EN CIRCONES	82
6.1	Resultados	82
VII	DISCUSIÓN	88
7.1	Alteración	88
7.2	Movilidad de los elementos	89
7.3	Sobre la dificultad de fechar las rocas volcánicas en estudio	89
7.4	Uniformidad del vulcanismo Cretácico Tardío en el estado de Sonora	90
VIII	CONCLUSIÓN	91
8.1	Compilación de base de datos	91
8.2	Análisis de la petrografía	91
8.3	Características geoquímicas	92
8.4	Análisis geocronométrico	92
IX	REFERENCIAS	94
ANEXOS		103
1	Base de datos exclusiva de rocas volcánicas del Cretácico Tardío en Sonora	104
2	Datos geoquímicos de la base de datos	110
3	Descripciones petrográficas de la Sierra El Chanate	120
4	Descripciones petrográficas del Cerro Libertad	122
5	Descripciones petrográficas de la Sierra Los Cerros Colorados	128
6	Técnica analítica geoquímica y preparación de muestras	132
7	Técnica analítica U-Pb	137
8	Preparación y separación de circones para análisis geocronométricos U-Pb	138

I INTRODUCCIÓN

En el estado de Sonora las secuencias litológicas del Cretácico Tardío, están representadas ampliamente por unidades litológicas que afloran principalmente en la parte oriental del estado (**Figura 1**), en donde se han identificado unidades magmáticas y sedimentarias, las cuales constituyen los vestigios de la evolución paleogeográfica y tectónica durante esta época geológica en el estado ([García-Barragán y Jaques-Ayala, 2011](#)). La ocurrencia y distribución de estos afloramientos indican un volumen mayor en la porción centro y este del estado, contrario a la porción occidental donde la mayoría de las unidades se presentan como afloramientos aislados de poca extensión (**Figura 1**) y de menor espesor, estas características indican un grado de erosión más avanzado en la porción occidental del estado. Tal distribución se debe en parte a la abundancia de cuerpos plutónicos del Cretácico y Paleógeno ([Calmus et al., 2011; 2015](#) y [Valencia-Moreno y Ortega-Rivera, 2011](#)), a la cobertura de rocas volcánicas neógenas, y a la marcada deformación extensiva, conocida como “Sierras y Valles Paralelos” la cual corta a estos afloramientos y los oculta debajo del grueso relleno sedimentario del Neógeno de los valles de Sonora.

Las rocas cretácicas magmáticas en Sonora han sido anteriormente estudiadas, sin embargo, actualmente se siguen reconociendo nuevos afloramientos en la porción occidental del estado, tal es el caso de recientes estudios realizados en el Cerro Libertad al Norte de Puerto Libertad - Sonora ([García-Huerta, 2015](#)), donde se ha descrito una secuencia magmática, epiclástica, tobácea y sedimentaria que bien puede correlacionarse con diversas secuencias cretácicas reportadas en la literatura del noroeste de Sonora por diferentes autores relacionadas a las Formaciones: **a)** Tarahumara ([Wilson y Rocha 1949; McDowell et al., 2001 y Roldán-Quintana et al., 2002](#)), **b)** El Tuli ([Rodríguez-Castañeda 1994; García y Barragán 2003](#)) o, **c)** con la Formación Anita ([Jacques-Ayala 1983](#)). Debido a que representan las evidencias de grandes cuencas que existieron durante el Cretácico Tardío, que se desarrollaron durante la evolución de un arco volcánico continental, producto de la orogenia Laramide.

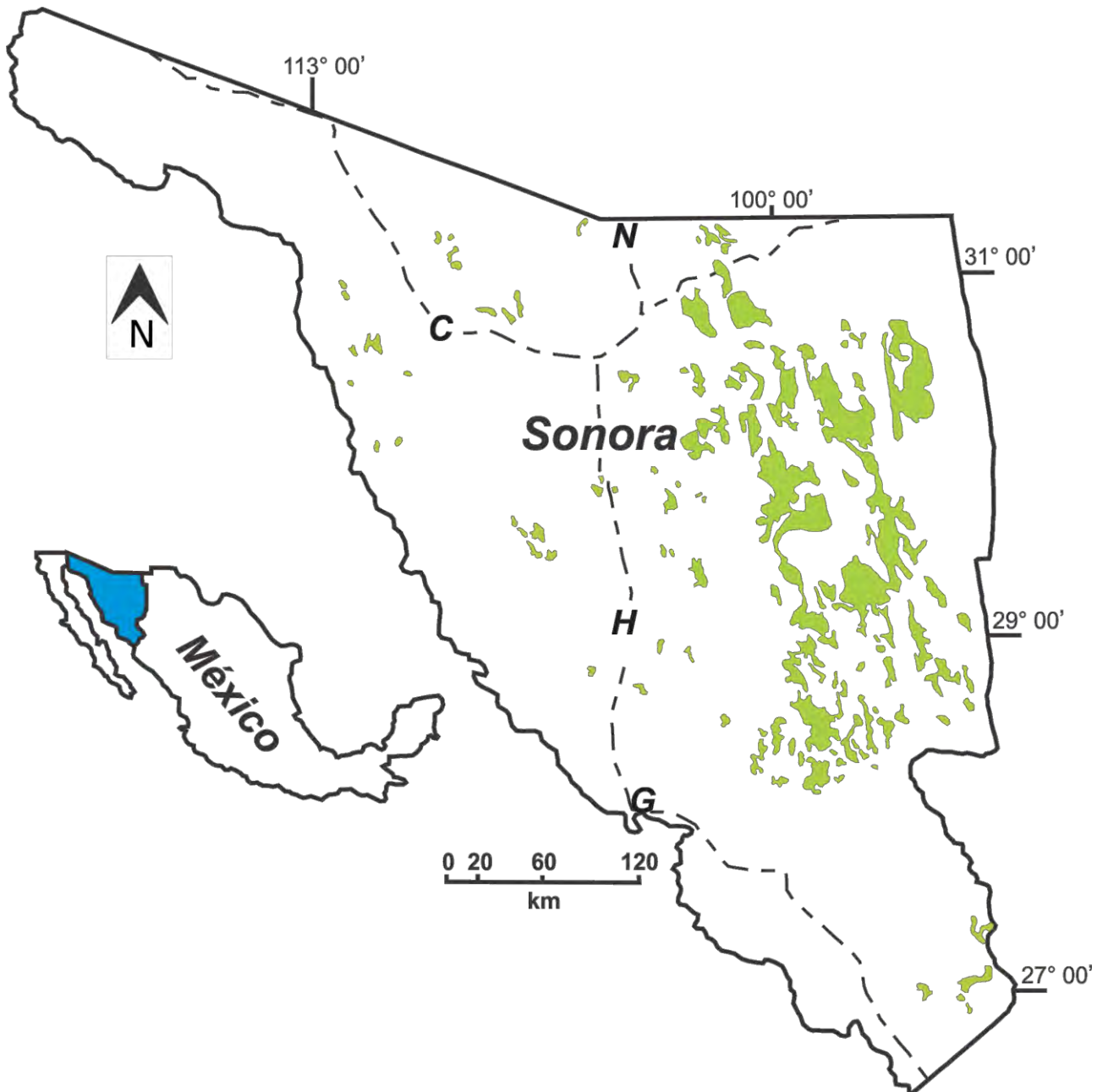


Figura 1.- Mapa del estado de Sonora, donde se muestra la distribución de los afloramientos de rocas volcánicas del Cretácico Tardío; modificado de [García-Barragán y Jacques-Ayala \(2011\)](#) y [González-León, et al., \(2011\)](#). Las abreviaturas en color negro representan a: **N** Nogales, **C** Caborca, **H** Hermosillo y **G** Guaymas.

1.1 Justificación del estudio

Los conjuntos litológicos del período Cretácico en Sonora, han sido ampliamente estudiados en diversos afloramientos que ocurren principalmente en la región centro y noreste del estado. La mayoría de estos estudios han contribuido a un mejor conocimiento y registro de la estratigrafía, haciendo énfasis principalmente en rocas sedimentarias con un gran contenido de fósiles. También diversos estudios geocronométricos han sido realizados en dichas unidades de roca poniendo especial atención en las unidades vulcano-sedimentarias a (García-Barragán y Jaques-Ayala, 2011), por lo que poco se conoce sobre la caracterización petrológica y geoquímica de los diferentes tipos de unidades magmáticas del Cretácico Tardío (Valentine, 1936; Wilson y Rocha 1949; Rodríguez-Castañeda 1994; Woodzicky, 1995; McDowell et al., 2001; Roldán-Quintana et al., 2002; García y Barragán, 2003 y Cox et al., 2006). Tampoco se sabe si los magmas fueron producto de la subducción de la placa Farallón debajo de la placa Norteamericana y mucho menos sobre la relación que guardan esos magmas con las unidades del Cenozoico. Por ejemplo, si las unidades magmáticas cretácicas son francamente calci-alcálicas o presentan pulsos magmáticos adakíticos, como recientemente se ha mostrado para las rocas magmáticas de las etapas finales de la subducción durante el Oligoceno-Mioceno (Gómez-Valencia, 2014 y Gómez-Valencia et al., 2015).

Esta investigación parte de los datos más representativos de rocas del Cretácico Tardío las cuales se han descrito en varias localidades del estado, y que corresponden a secuencias de rocas volcánicas, así como también a las que se consideran como vulcano-sedimentarias y que se pueden correlacionar fácilmente con las unidades de roca que afloran en la región de Puerto Libertad, Sierra El Chanate y Sierra Los Cerros Colorados (Figura 2). De esta manera y mediante este trabajo, se propone mostrar una identidad magmática de las secuencias de rocas cretácicas, que ocurren en las regiones de estudio, así como contribuir aún más al conocimiento sobre el Cretácico Tardío en el noroeste de Sonora, tratando de mostrar la diferencia que guardan estas rocas con secuencias magmáticas más recientes que han sido estudiadas en la región.

1.2 Objetivo general y objetivos específicos

Este estudio tiene como objetivo general generar una contribución al conocimiento petrológico de secuencias volcánicas, epiclásticas y tobáceas atribuidas al Cretácico Tardío en las áreas de Puerto Libertad, Sierra El Chanate y Sierra Los Cerros Colorados en el noroeste de Sonora, México, bajo los siguientes objetivos específicos:

- (1) Realizar una cartografía geológica y secciones estructurales para las localidades en estudio con rocas volcánicas cretácicas.
- (2) Establecer la estratigrafía haciendo énfasis en el estudio del vulcanismo Cretácico Tardío presente en las áreas de estudio.
- (3) Por medio de un estudio petrológico, tratar de mostrar la diferencia entre distintas unidades magmáticas y buscar si existe una relación genética de todos los episodios magmáticos involucrados en las áreas de estudio.
- (4) Mostrar las diferencias y similitudes que llegaran a guardar las unidades magmáticas del Cretácico Tardío con las del Cenozoico de la región.
- (5) Contribuir a la resolución de un posible problema de nomenclatura estratigráfica de las unidades del Cretácico Tardío de la región.
- (6) Realizar la geoquímica de elementos mayores y traza, así como análisis geocronométricos por el método U/Pb en los circones de las unidades estudiadas en la región costera.
- (7) Comparar y correlacionar las secuencias vulcano-sedimentarias del área con las de otras regiones para definir sus similitudes y diferencias y establecer la extensión del vulcanismo del Cretácico Tardío en la parte norte centro de Sonora.

1.3 Localización de las áreas de estudio.

Las áreas de estudio son tres y se localizan en la porción noroeste y central-costera del estado de Sonora (**Figura 2**). En la región noroeste se estudió: 1) la Sierra El Chanate, la cual se ubica entre Pitiquito y Altar, a 27.5 km al noreste Caborca; 2) el Cerro Libertad localizada entre Puerto Libertad y Puerto Lobos, a 19 km en dirección noreste de Puerto Libertad y 3) en

la región central-costera se trabajó en la Sierra Los Cerros Colorados, localizada en la porción costera de Hermosillo, a 70 km al sureste de Bahía de Kino.



Figura 2.- Mapa del estado de Sonora, mostrando la ubicación de las áreas de estudio en los contornos marcados en color amarillo. Las abreviaturas en color negro representan a: **N** Nogales, **C** Caborca, **H** Hermosillo y **G** Guaymas. Los polígonos de color verde representan la distribución de los afloramientos de rocas volcánicas del Cretácico Tardío; modificado de [García-Barragán y Jacques-Ayala \(2011\)](#) y [González-León, et al., \(2011\)](#).

1.4 Fisiografía

El estado de Sonora incluye parte de cuatro provincias fisiográficas: Sierra Madre Occidental, Llanura Sonorense, Sierras y Llanuras del Norte y Llanura Costera del Pacífico. La provincia Llanura Sonorense abarca más del 50% del estado de Sonora y se divide en tres

subprovincias: Desierto de Altar, Sierra del Pinacate y Sierras y Llanuras Sonorenses (INEGI, 1991). Las áreas de estudio se ubican dentro de la provincia Llanura Sonorense (Figura 3).

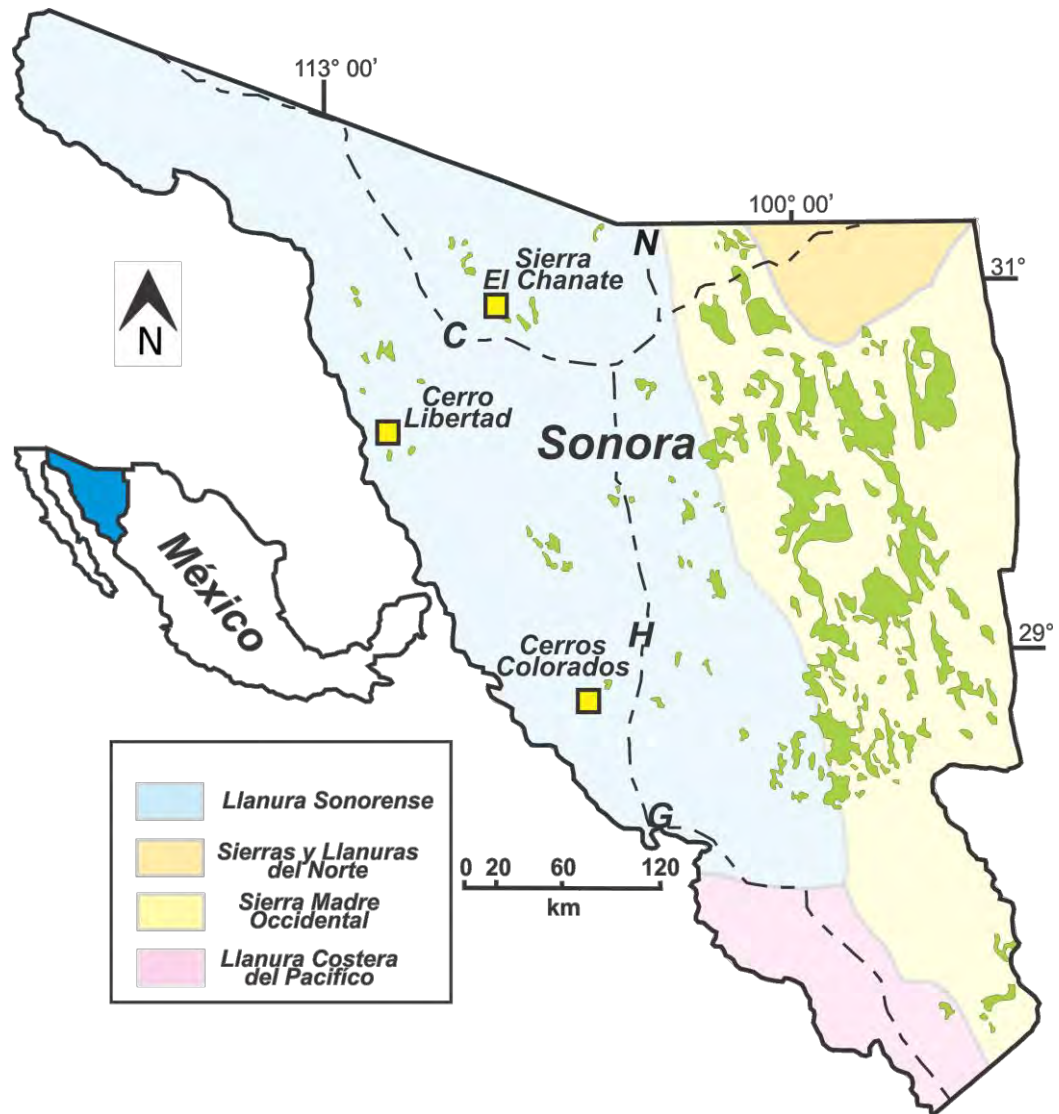


Figura 3.- Mapa que muestra las provincias fisiográficas del estado de Sonora; modificada de INEGI (1991). La ubicación de las áreas de estudio está representada en los cuadrángulos de color amarillo. Los polígonos de color verde representan la distribución de los afloramientos de rocas volcánicas del Cretácico Tardío; modificado de García-Barragán y Jacques-Ayala (2011) y González-León, et al. (2011).

1.5 Metodología

Como parte de la etapa inicial de trabajo se eligieron estratégicamente las áreas de mayor interés las cuales fueron: Sierra El Chanate, Puerto Libertad y Sierra Los Cerros Colorados. Para después llevar a cabo un reconocimiento fotogeológico de las regiones a estudiar, mediante el apoyo de los rasgos geomorfológicos detectados en el análisis de imágenes de satélite con el programa Google Earth®.

Una vez seleccionadas las regiones a estudiar, la etapa inicial de gabinete, consistió en la recopilación y análisis de la literatura existente, enfocándonos principalmente en datos geológicos del Cretácico Tardío en Sonora. Fue así que nos percatamos que la mayor parte de las investigaciones han sido orientadas a rocas con mineralización económicamente explotable. Finalmente se diseñaron campañas de campo estratégicas, las cuales se llevaron a cabo, durante el desarrollo de la presente investigación. El objetivo principal de estas visitas a campo fue el levantamiento cartográfico y de secciones estratigráficas, así como también hacer un muestreo para análisis petrográficos, geoquímicos y geocronométricos.

Durante el trabajo de campo se llevó a cabo un reconocimiento general de la litología y en algunos casos se realizaron observaciones a detalle tratando de obtener una mayor comprensión del magmatismo atribuido al Cretácico Tardío en el noroeste de Sonora.

La preparación de muestras se realizó en varias etapas y bajo el siguiente orden:

1.- Preparación de muestras de roca para la fabricación de láminas delgadas.

La elaboración de láminas delgadas se llevó a cabo en el Laboratorio de Laminación del Instituto de Geología de la Estación Regional del Noroeste de la Universidad Nacional Autónoma de México (ERNO-UNAM), con el apoyo de la Geol. Aimée Adriana Orcí Romero.

2.-Preparación de muestras y obtención de datos geoquímicos.

La trituración de rocas y la molienda 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. La fragmentación de las muestras, se realizó con una trituradora de quijadas de acero marca Braun Chipmunk. La molienda se realizó en un

molino planetario de bolas PM 100 marca RETSCH y contenedor de ágata. Los análisis geoquímicos de elementos mayores y algunos elementos traza, se llevaron a cabo en el Laboratorio de FRX del Instituto de Geología de la UNAM-CU, gracias al apoyo del Quím. Rufino Lozano Santacruz. Esta etapa se aborda de manera completa en el apartado de anexos.

3.-Preparación de muestras y obtención de datos geocronométricos U-Pb en circones.

La separación de circones se llevó a cabo en tres etapas. La primera etapa 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. La 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. La tercera etapa se llevó a cabo en el Laboratorio de Separación de Minerales I y II del Instituto de Geología de la UNAM, gracias al apoyo de la Ing. Geol. María del Consuelo Macías Romo. El análisis y la obtención de datos se llevó a cabo en el Laboratorio de Estudios Isotópicos del Centro de Geociencias UNAM campus Juriquilla, a cargo del Dr. Luigi A. Solari. Estas etapas se abordan de manera completa en el apartado de anexos.

II ANTECEDENTES DEL VULCANISMO CRETÁCICO TARDÍO

2.1 Antecedentes del vulcanismo Cretácico Tardío relacionados a las áreas de estudio.

La porción noroeste del estado de Sonora, región en donde se localizan las áreas de estudio ([Figura 3](#)), ha sido objeto de varios estudios encaminados a determinar la tectónica y la estratigrafía de esa región tanto por parte de investigadores e instituciones del sector público como del sector privado, siendo algunos de éstos de carácter geológico regional.

Inicialmente [Gastil y Krummenacher \(1977\)](#), efectuaron un trabajo de reconocimiento geológico entre Puerto Lobos y Bahía de Kino, dividiendo la región en cuatro subprovincias y realizaron dataciones isotópicas de rocas intrusivas y volcánicas del Cretácico Tardío y Cenozoico. Por otra parte, [Morales-Morales et al., \(2007\)](#), considerando los estudios de [Gastil y Krummenacher \(1977\)](#), realizaron para el Servicio Geológico Mexicano, la cartografía geológica a escala 1:50 000, donde si bien se menciona la presencia de rocas posiblemente correlacionables con la Formación Tarahumara, no se mencionan los argumentos para tal correlación. Dicha cartografía, además, hace énfasis en las zonas de mineralización generadas por la intrusión de cuerpos graníticos laramidicos. [Verdugo-Mariscal \(1985\)](#), realizó una historia geológica del noroeste del estado de Sonora, donde incluye parte de la región de estudio, mencionando la presencia de diferentes etapas de magmatismo con los respectivos eventos tectónico-estructurales involucrados y considerando eventos comprensivos y extensivos.

En la porción este del estado de Sonora se describió por primera vez la Formación Tarahumara ([Wilson y Rocha 1949](#); [McDowell et al., 2001](#) y [Roldán-Quintana et al., 2002](#)), posiblemente correlacionable con las secuencias cretácicas, Formación El Tuli ([Rodríguez-Castañeda 1994](#) y [García y Barragán, 2003](#)) o con el complejo volcánico El Charro ([Jacques-Ayala 1983](#)). En la Sierra El Chanate al noroeste de Caborca en los trabajos realizados por [Jacques-Ayala \(1983; 1989;1999\)](#) y [Jacques-Ayala et al., \(2009\)](#), se menciona que las unidades cretácicas son vulcano-sedimentarias y varían en espesor de 1200 a 3500 metros, dividiéndose en tres unidades estratigráficas distintivas: Grupo Bisbee (formaciones Morita,

CAPITULO 2 ANTECEDENTES DEL VULCANISMO DEL CRETÁCICO TARDÍO EN SONORA

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

Arroyo Sásabe y Cintura); Grupo El Chanate (formaciones Pozo Duro, Anita y Escalante) y el complejo volcánico El Charro. Por otra parte, se ha mencionado la presencia de rocas tipo Tarahumara en la base de la Sierra Picú al Este de Puerto Libertad ([Morales-Morales et al., 2007](#) y [Gómez-Valencia 2014](#)).

Recientemente [García-Huerta \(2015\)](#), describió al norte del poblado de Puerto Libertad (noroeste de Sonora), afloramientos rocosos mesozoicos, seccionados principalmente por fallas normales, fallas lítricas y fallamiento lateral principalmente derecho. Mencionó que, de la base a la cima, la secuencia litológica está constituida por un apilamiento mayor a 250 metros de espesor con al menos 8 unidades magmáticas, epiclásticas, tobáceas y sedimentarias, correlacionables con afloramientos similares a la Formación Tarahumara, Formación El Tuli y complejo volcánico El Charro, los cuales afloran en otras localidades de Sonora, algunas de éstas mencionadas con anterioridad.

De esta manera, se considera que las rocas del batolito de Sonora y las volcánicas dacíticas-andesíticas constituyen el desarrollo de un arco magmático continental que registra el progreso de la convergencia entre una placa oceánica y una continental ([McDowell et al., 2001](#); [Calmus et al., 2011 y 2015](#); [Valencia-Moreno y Ortega-Rivera, 2011](#) y [González-León et al., 2011](#)), cuyo resultado corresponde a afloramientos de rocas que pertenecen al Cretácico Tardío, con una importante distribución, tanto en la zona centro, como en la región noreste del estado de Sonora ([Figura 5](#)). Durante el periodo comprendido entre el Cretácico Tardío y el Paleógeno, se desarrolló la orogenia Laramide, término que se ha utilizado para definir a un estilo de deformación que ha afectado al estado de Sonora y por consiguiente a las unidades en estudio ([González-León et al., 1992](#); [Valencia-Moreno et al., 2001](#); [Calmus et al., 2015](#); [González-León et al 2016](#)).

2.2 Información en la literatura del vulcanismo Cretácico Tardío en Sonora

Los antecedentes anteriores son relacionados a las áreas de estudio. Como parte del trabajo de investigación bibliográfica se realizó una recopilación sobre la geología del vulcanismo del Cretácico Tardío reportada en el estado de Sonora. Subsecuentemente se

CAPITULO 2 ANTECEDENTES DEL VULCANISMO DEL CRETÁCICO TARDÍO EN SONORA

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

mencionan en este apartado los trabajos geológicos más representativos que han sido reportados en la literatura para este episodio magmático en Sonora. La información recabada se dividió en cuatro sectores de Sonora, que corresponden a: región norte, región central, región sur y región costera.

Región norte

En la región norte se encuentra la Formación Mesa (Valentine, 1936; Woodzicky, 1995 y Cox et al., 2006), correlacionable con la Formación Tarahumara (Wilson y Rocha 1949; McDowell et al., 2001 y Roldán-Quintana et al., 2002), la cual se extiende desde Cananea hasta el sureste del Río Sonora, en donde las rocas de la Formación Mesa son las encajonantes de los depósitos de tipo pórfido cuprífero. La Formación Mesa consiste de dos miembros: miembro inferior compuesto por andesita y miembro superior compuesto por dacita (Cox et al., 2006). La parte inferior del miembro compuesto por dacita fue datado en 65.8 ± 0.4 millones de años en una biotita por el método $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$.

Miembro inferior compuesto de andesita

La parte superior de este miembro consiste de andesita gris oscura con 1000 metros de espesor y tiene una textura fragmental, la cima de la unidad está marcada por capas finas de 20 centímetros de espesor de una toba andesítica. La andesita está constituida por fenocristales de plagioclasas de 3 milímetros de longitud, estos cristales están alterados a carbonatos y minerales de arcilla.

Miembro superior compuesto de dacita

Comprende 1200 metros de espesor de toba-brecha y toba. La unidad de base es una toba de cristales y está compuesta de fenocristales de plagioclasa de 3 a 5 milímetros comúnmente en agregados con bordes redondeados y quebrados esta unidad tiene un espesor de 150 a 200 metros. La plagioclasa es alterada de oligoclasa a albita. Fenocristales pequeños de biotita tienen bordes oscuros con finos granos de magnetita y minerales opacos; en esta unidad los fenocristales de cuarzo son raros. La matriz está compuesta de microlitos finos de plagioclasa, con feldespato potásico secundario.

CAPITULO 2 ANTECEDENTES DEL VULCANISMO DEL CRETÁCICO TARDÍO EN SONORA

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

Dentro del distrito minero de Cananea, [Wodzicki \(1995\)](#) buscó la relación que hay entre la evolución de las rocas ígneas laramídicas y la mineralización de pórfido cuprífero. Ahí describió a la Formación Mariquita ([Valentine, 1936](#)), la cual consiste en andesita basáltica con alto contenido de potasio; Estas rocas quedan clasificadas en los diagramas de álcalis vs sílice como traquiandesitas basálticas – andesitas. La Formación Mariquita tiene una serie de flujos volcánicos con echados de 15° al este; estos flujos forman la parte superior de la Sierra Mariquita. La roca fresca de la Formación Mariquita es gris oscuro con textura de “huella de pavo” (*turkey track*) la cual se caracteriza por grupos de fenocristales de plagioclasa de 10 a 12 milímetros. En la matriz estas rocas contienen olivino, plagioclasa, hornblenda y ocasionalmente piroxeno y magnetita. Los cristales de plagioclasa son comúnmente reabsorbidos. Además, contiene amígdalas rellenas de cuarzo + magnetita + epidota.

En el depósito tipo pórfido cuprífero de Milpillas del distrito minero de Cananea ([Valencia-Gómez, 2005](#); [Valencia et al., 2006](#) y [Noguez-Alcántara et al., 2007](#)) estudiaron el pórfido cuarzomonzonítico hospedante de la mineralización en el yacimiento. Edades por los métodos uranio-plomo y renio-osmio dieron como resultado una edad de 63 millones que ayudó marcar los límites en edad del magmatismo y la mineralización en este distrito minero ([Valencia-Gómez, 2005](#) y [Valencia et al., 2006](#)). En el área de Milpillas las rocas hospedantes son unidades volcánicas y volcanoclásticas de la Formación Mesa del Cretácico Tardío ([Valentine, 1936](#); [Woodzicky, 1995](#) y [Cox et al., 2006](#)).

En el área del Alacrán ubicada a 18 km al sureste de Cananea, [Arellano-Morales \(2004\)](#), describe un depósito mineral de tipo pórfido cuprífero, a su alrededor se encuentra una potente secuencia de rocas volcánicas compuesta por derrames, tobas y aglomerados andesítico-dacíticos con más de 700 metros de espesor, fechadas en 69 ± 0.2 Ma; esta secuencia se correlaciona con la Formación Mesa y con la Formación Tarahumara.

En el prospecto de pórfido cuprífero Los Alisos del distrito minero La Caridad [Rascón-Heimpel \(2011; 2012\)](#), realizó una reconstrucción geológica y metalogenética, en donde reporta rocas volcánicas del Cretácico Tardío - Paleoceno Temprano, las cuales son correlacionadas de manera regional con la Formación Tarahumara ([Wilson y Rocha 1949](#); [McDowell et al., 2001](#) y [Roldán-Quintana et al., 2002](#)). Estas rocas varían entre dacita y

CAPITULO 2 ANTECEDENTES DEL VULCANISMO DEL CRETÁCICO TARDÍO EN SONORA

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

andesita, aunque predominan las últimas; su textura cambia de afanítica a porfídica y comúnmente se presentan como horizontes aglomeráticos y flujos piroclásticos. Existen también areniscas de origen epiclástico, derivadas de las propias rocas andesíticas, las cuales fueron depositadas en cuencas muy cercanas a su fuente. Comúnmente forman lomeríos altos y redondeados en secuencias intercaladas con tobas y coladas andesíticas. Las rocas más antiguas que afloran en esta región pertenecen a una secuencia volcánica andesítica del Cretácico Tardío, fechadas en 73.6 ± 1.0 Ma, las cuales son intrusionadas por un pórfido feldespático de 60.2 ± 0.8 Ma (Rascón-Heimpel et al., 2012).

En el depósito de pórfido cuprífero de la Caridad al sureste de Nacozari Seagart et al., (1974), realizaron un estudio sobre la geología, mineralización y alteración del. Este depósito ocurre principalmente en rocas félsicas a intermedias y brechas asociadas; todas estas rocas son de edad Cretácico Tardío y se encuentran intrusionadas por “stocks” de pórfidos cuarzo-monzoníticos, subsecuentemente la alteración hidrotermal y la mineralización exhiben una relación genética con los pórfidos cuarzo-monzoníticos.

En el cuadrángulo de Nacozari, González León et al., (2011 y 2016) realizaron un estudio de la estratigrafía, geocronometría y geoquímica de las rocas del arco magmático laramide. La estratigrafía de la Formación Tarahumara fue descrita en seis diferentes localidades del cuadrángulo dando como resultado seis secciones estratigráficas descritas de manera general como:

Sección uno medida en Picacho de Arizpe tiene un espesor de 1200 metros y consiste de tobas de ceniza, dacitas, riolitas, areniscas y lutitas.

La sección dos, medida en el Rancho Teguachi con un espesor de 1000 metros, tiene en su parte basal un conglomerado de 29 metros intercalado con rocas volcánicas, dacitas, riolitas e ignimbritas. Sobreyaciendo se encuentra una unidad que consiste de brechas andesíticas, riolitas e ignimbritas.

Sección tres, medida en cañada Motepori con 880 metros de espesor, la unidad de base está compuesta de un conglomerado de 100 metros de espesor, la parte media corresponde a dacitas, riolitas, ignimbritas y tobas de ceniza. La parte superior es conformada por brechas andesíticas, ignimbritas, dacitas, arenisca volcánica y lutita.

CAPITULO 2 ANTECEDENTES DEL VULCANISMO DEL CRETÁCICO TARDÍO EN SONORA

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

La sección cuatro, medida en el arroyo el Salmón con un espesor de 1040 metros, contiene un conglomerado de 80 metros el cual corresponde a la base de la sección, la parte media de la sección corresponde a brechas andesíticas, andesitas, dacitas, ignimbritas y aglomerados. La parte superior de esta sección está compuesta por dacitas, ignimbritas y riolitas.

La sección cinco pertenece al Cerro Colorado con 1865 metros de espesor, está compuesta en su parte basal por un conglomerado de 50 metros intercalado con dacitas, ignimbritas y riolitas. La parte media de la sección está compuesta por flujos y brechas de andesita, dacita, riolita, ignimbrita y arenisca volcanoclástica. La parte superior consiste en dacita, riolita, ignimbrita y arenisca.

Por último, la sexta sección en la Sierra el Oso está estimada con un espesor de 930 metros de espesor, la base está compuesta por una intercalación de conglomerado, andesita, ignimbrita y riolita. La parte media corresponde a flujos andesíticos y la parte superior se compone de brechas andesíticas y riolíticas.

En el Rancho San Antonio, a 40 kilómetros al sur de Cananea, se encuentra la Formación el Tuli del Cretácico Tardío (Rodríguez-Castañeda, 1994 y García y Barragán, 2003), en donde García y Barragán (2003), realizó un trabajo de estratigrafía y sedimentología. La Formación el Tuli fue dividida en 3 miembros: Miembro inferior, Miembro dos y Miembro superior. La Formación El Tuli es una secuencia vulcanosedimentaria de dos kilómetros de espesor y consiste en conglomerado, brecha, arenisca, lutita, andesita afanítica a porfídica y bloques de caliza. En la parte superior de la Formación el Tuli una toba riolítica produjo una edad de 76 Ma mediante el método de U-Pb en zircón (García y Barragán, 2003).

En el cuadrángulo Arizpe-Mazocahui el arco magmático laramide está compuesto por rocas volcánicas de la Formación Tarahumara, intrusionadas por diversos plutones graníticos (González-León et al., 2011). Un conglomerado basal de la Formación Tarahumara contiene clastos deformados del Neoproterozoico, Proterozoico y del Cretácico Temprano. La parte inferior de la Formación Tarahumara está compuesta por ignimbrita riolítica, toba de ceniza, flujos andesíticos y estratos volcanoclásticos intercalados. La parte superior consiste de

CAPITULO 2 ANTECEDENTES DEL VULCANISMO DEL CRETÁCICO TARDÍO EN SONORA

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

ignimbritas riolíticas-dacíticas, tobas de ceniza y rocas volcanoclásticas. La edad de la Formación Tarahumara fue definida en esta región entre 79 y 59 millones de años.

En la localidad de Huépac, [Beraldi-Campesi y Cevallos-Ferriz \(2005\)](#), reportan una gran diversidad de microfósiles permineralizados que se encuentran embebidos en pedernal, asociados a estromatolitos que afloran en una secuencia vulcanosedimentaria del Cretácico Tardío (Turoniano-Maastrichtiano). La diversidad de microfósiles reportada representa un ambiente de depósito lacustre asociado a magmatismo que pertenece a la Formación Tarahumara.

Al suroeste de Opodepe, en el marco geológico del pórfido El Crestón, [Valenzuela-Navarro et al. \(2005\)](#), mencionan que aflora una secuencia vulcanosedimentaria constituida por flujos de lava de composición andesítica, intercalada con sedimentos lacustres. Los afloramientos se restringen a la parte sur del área, cerca del cerro El Batamote. La base de esta secuencia está formada por un conglomerado cubierto por horizontes de flujos andesíticos, con alternancia de areniscas y calizas. El conglomerado es polimíctico, con fragmentos de ortocuarcita y andesita en una matriz silicificada. Las andesitas son de color verde oscuro de textura afanítica a porfídica, con cristales prismáticos de plagioclasa. En lámina delgada las rocas andesíticas presentan fenocristales de plagioclasas con fuerte alteración hidrotermal y reemplazamiento a sericita, los cuales se encuentran embebidos en una matriz de microcristales de plagioclasa y escaso piroxeno.

Por otro lado, al este de Moctezuma, [Roldán-Quintana \(1994\)](#), describe la geología del sur de la Sierra de Oposura, en donde menciona una secuencia de rocas volcánicas y volcanoclásticas, las cuales se asignan al Cretácico Tardío. Es una secuencia compuesta por derrames de lava y toba de composición andesítica, así como areniscas de origen volcánico. La base de esta secuencia presenta escasos horizontes de ignimbrita. En la cima, la ignimbrita y la toba lítica de composición riolítica aumentan, encontrándose intercaladas con conglomerado de origen volcánico de color rojizo. Los fragmentos del conglomerado son subredondeados de 2 a 30 centímetros de diámetro y consisten en ignimbrita, riolita y andesita, en una matriz arenosa con abundante feldespato y biotita. La expresión morfológica de esta unidad corresponde a terrenos elevados, generalmente alargados, con amplias zonas de alteración

CAPITULO 2 ANTECEDENTES DEL VULCANISMO DEL CRETÁCICO TARDÍO EN SONORA

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

hidrotermal de color blanco o amarillento, así como zonas rojizas. Se estima un espesor de 100 metros para esta unidad, que además sufre la intrusión de granitos del Batolito Oposura del Paleoceno tardío.

En el cuadrángulo de Huépac-Moctezuma, [Zúñiga-Hernández \(2010\)](#), realizó un estudio geológico, geoquímico y metalogenético en el cual menciona que al norte de Arizpe las rocas volcánicas son contemporáneas a la Formación Tarahumara; éstas fueron nombradas Formación Alcaparros por [González- León et al., \(2000\)](#) y corresponden a una secuencia de rocas andesíticas y volcánicas con una edad $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ en biotita de 72.1 millones de años correspondiente al depósito Washington y al distrito Cumobabi.

En la Sierra El Chanate, en el noroeste de Sonora, las rocas cretácicas varían en espesor de 1200 a 3500 metros y se han dividido en tres unidades estratigráficas distintivas ([Jacques-Ayala, 1983; 1989;1999](#) y [Jacques-Ayala et al., 2009](#)): Grupo Bisbee (formaciones Morita, Arroyo Sásabe y Cintura); Grupo El Chanate (formaciones Pozo Duro, Anita y Escalante) y el complejo volcánico El Charro. La unidad más antigua es el Grupo Bisbee y de manera general consiste de lodolitas rojas con areniscas, lutitas y calizas. Grupo El Chanate cubre concordantemente al anterior y es una secuencia clástica y volcánica con espesor entre 700 y 2800 metros. El complejo volcánico El Charro sobreyace discordantemente al Grupo El Chanate y consiste de brechas volcánicas, tobas y aglomerados. En una andesita del complejo volcánico, se obtuvo una edad $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ en hornblenda de 71.6 ± 0.7 Ma ([Jacques-Ayala et al., 2009](#)).

Región central

El Servicio Geológico Mexicano ([SGM, 2006](#)), hizo el estudio geológico de la carta Suaqui Grande. En esta región las rocas del Cretácico Tardío son cuerpos batolíticos y rocas vulcanosedimentarias de la Formación Tarahumara, que cubre la mayor parte de la carta. Dicha unidad se estima que tiene un espesor de hasta 2,800 metros y está formada principalmente de lavas andesíticas a dacíticas con alteración propilítica, aglomerados, brechas volcánicas y rocas piroclásticas félsicas. Seis edades isotópicas U-Pb obtenidas en esta unidad

CAPITULO 2 ANTECEDENTES DEL VULCANISMO DEL CRETÁCICO TARDÍO EN SONORA

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

produjeron, cuatro edades entre 73 y 70 Ma y otras dos de 90 y 89 Ma (McDowell et al., 2001).

Al noroeste de Bacanora en la Sierra Santo Niño ubicada a 150 kilómetros de la ciudad de Hermosillo, existen afloramientos de roca que se pueden correlacionar con la Formación Tarahumara (Pérez-Segura et al., 2009). Comprenden litologías de andesita verde masiva, toba andesítica y rocas volcanoclástica. Comúnmente estas rocas tienen alteración hidrotermal con minerales de clorita + epidota + calcita + cuarzo + pirita. El espesor de estas unidades de roca se estima en 1500 metros.

Entre Suaqui Grande y Onavas se encuentra el área de Santa Rosa; en esta área Gans (1977), reportó datos de $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ de varios episodios magmáticos que van desde el Cretácico Tardío al Mioceno, en una sección estratigráfica de tres a cuatro kilómetros de espesor que incluye el batolito granodiorítico laramide y sus correspondientes rocas volcánicas andesíticas y, por último, lavas máficas intercaladas con sedimentos tobáceos y abanicos conglomeráticos del Mioceno medio al Oligoceno tardío.

Región sur

Hacia el sur de Sonora en un transecto este-oeste desde Maycoba a San Carlos, Roldán-Quintana et al. (2009), realizaron un estudio de la química, de isótopos y de edades del batolito laramidico. El transecto estudiado lo dividieron en tres regiones geológicas: **1)** Región Costera (COR) en donde encontraron afloramientos aislados del arco volcánico del Cretácico Tardío, pero sólo la parte plutónica; **2)** región central (CER) dominado por rocas del batolito laramidico, así como rocas volcánicas y volcanoclásticas y, **3)** Sierra Madre Occidental (SMOc) dominada por afloramientos del arco volcánico del Cretácico Tardío, cubiertos por rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental.

Por otra parte, el Servicio Geológico Mexicano (2008) reporta unidades del Cretácico Tardío mediante el proyecto Potreritos en Yécora, Sonora, México. Ahí mencionan que la litología del proyecto es simple y consiste de cuatro unidades; la más antigua corresponde a andesitas correlacionables con la Formación Tarahumara, las cuales están afectadas por

CAPITULO 2 ANTECEDENTES DEL VULCANISMO DEL CRETÁCICO TARDÍO EN SONORA

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

intrusivos granodioríticos. Esta secuencia volcánica está constituida por toba, brecha, aglomerado y flujos de lava de composición andesita-dacita.

Región Costera

En la región costera de Sonora al noreste de Puerto Libertad, los prospectos La Fortuna de Cobre y el Americano, son sistemas de mineralización de tipo pórfido cuprífero situados cerca de la costa de Sonora. La geología de ambos prospectos se encuentra principalmente constituida por rocas volcánicas, cuerpos subvolcánicos feldespáticos e intrusivos granodioríticos del Cretácico Tardío (Salvatierra-Domínguez, 2000). En este trabajo se realizó una caracterización geoquímica además de que se definieron zonas de alteración para los pórfidos.

Otro caso importante es el de la estructura semicircular Rancho Nuevo, la cual está localizada a 60 kilómetros en dirección norte de Bahía Kino. La estructura está compuesta de rocas graníticas que intrusionan a andesitas; esta unidad está reconocida en Sonora como parte del batolito laramidico. De la unidad de andesita fue obtenida una edad de 79.5 ± 1.0 millones de años (García-Martínez et al., 2014).

En Bahía Kino, en la costa de Hermosillo, Ramos-Vélazquez et al. (2008), describen a la andesita Tordillo, la cual es de color gris con textura porfídica caracterizada por fenocristales de plagioclasa en una matriz afanítica con cristales de biotita. Esta andesita fue datada mediante estudios isotópicos de $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ en 62.5 ± 1.5 millones de años.

Finalmente cabe destacar que en las regiones de Sierra El Chanate, Puerto Libertad y Sierra Los Cerros Colorados no existen estudios estratigráficos-petroológicos en las unidades volcánicas del Cretácico Tardío que definan a las presumibles fuentes magmáticas, sus variaciones composicionales o procesos involucrados en la formación de esas rocas.

CAPITULO 2 ANTECEDENTES DEL VULCANISMO DEL CRETÁCICO TARDÍO EN SONORA

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

2.3 Análisis y construcción de base de datos

Debido a que este trabajo tiene un objetivo petrológico, una tarea primordial fue recopilar información de tesis y artículos científicos publicados en revistas mexicanas y extranjeras, correspondientes al vulcanismo del Cretácico Tardío en el estado de Sonora. La información encontrada permitió comparar los datos generados en el este trabajo y así mostrar una similitud genética que identifique a las unidades volcánicas del Cretácico Tardío en las regiones de estudio.

La construcción de esta base de datos involucró la siguiente información:

- Tipos de roca
- Localidad
- Alteración
- Edad
- Método geocronométrico utilizado
- Composición química
- Isotopos

Bajo los criterios anteriormente mencionados, se procedió a la selección los trabajos que contuvieran información acerca de cartografía, petrografía, geoquímica, evolución geológica, geocronometría y datos de isótopos, para después extraer la información exclusivamente de rocas volcánicas. Esto dio como resultado un total de 28 trabajos dedicados al estudio de los yacimientos minerales y 24 dedicados a la investigación científica.

Lo anterior permitió obtener información de un total de 127 muestras correspondientes a rocas volcánicas del Cretácico Tardío – Paleógeno temprano; estas se encuentran enlistadas en la **Tabla AN-1** dentro de la sección de anexos.

La recopilación de los datos de la literatura proporciona una idea sobre la composición y la ubicación en tiempo-espacio de las unidades volcánicas distribuidas ampliamente en el estado de Sonora y que son objeto del trabajo de investigación de esta tesis. Los datos

CAPITULO 2 ANTECEDENTES DEL VULCANISMO DEL CRETÁCICO TARDÍO EN SONORA

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

obtenidos representan episodios magmáticos desde el Cretácico Tardío hasta el Paleógeno temprano.

Se puede observar que las edades se acumulan entre 80 a 64 Ma, un rango que del Campaniano al Paleoceno. Esto puede reflejar magmatismo uniforme durante este periodo de tiempo para Sonora (Figura 4).

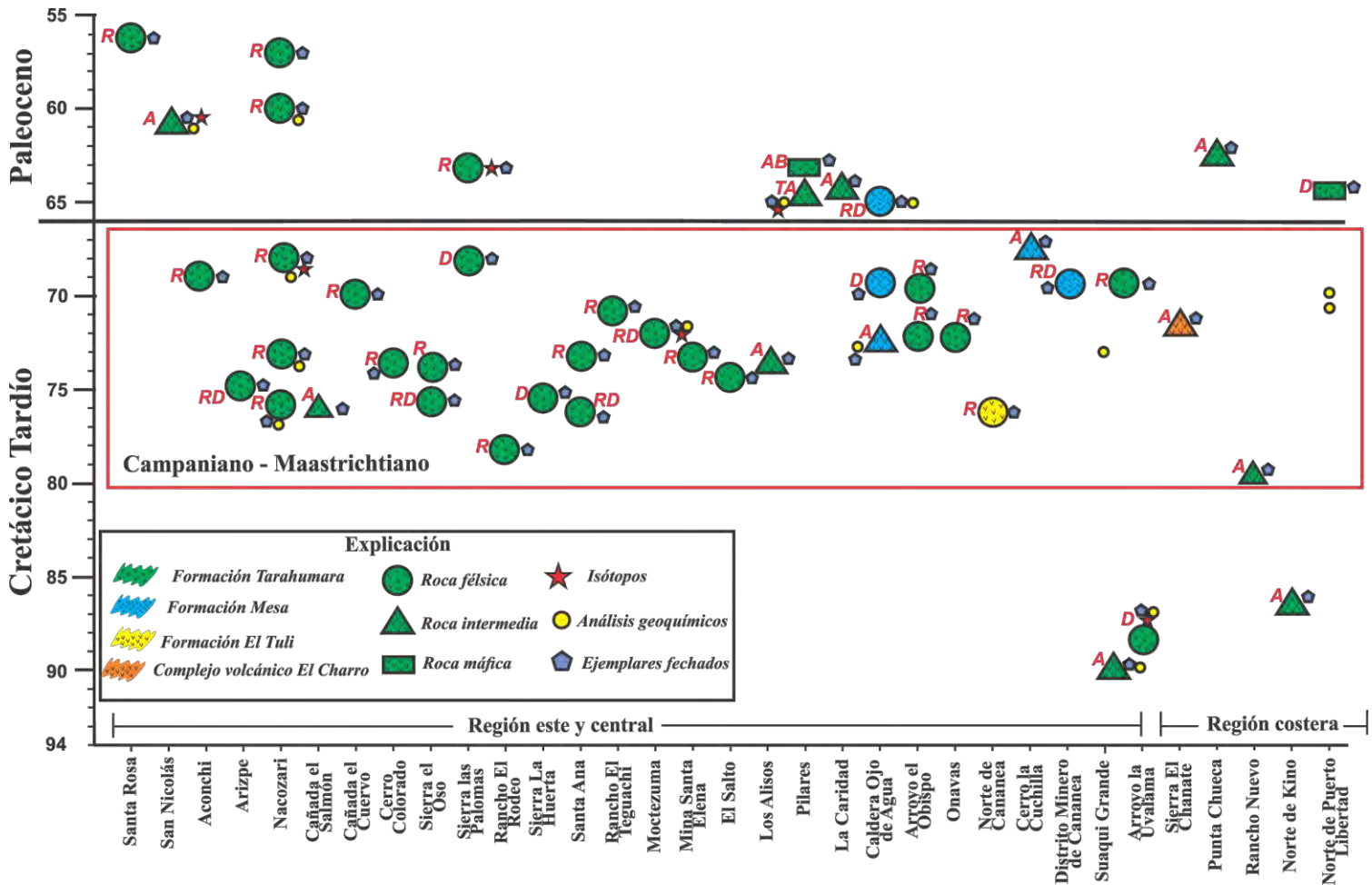


Figura 4.- Distribución espacio-temporal del vulcanismo del Cretácico Tardío en Sonora. Las abreviaturas corresponden al tipo de roca analizado: **AB** andesita basáltica, **A** andesita, **TA** traquiandesita, **D** dacita, **RD** riodacita, **R** riolita.

La información recabada del vulcanismo del Cretácico Tardío se distribuye en más de 40 localidades del estado de Sonora, en donde se contabilizan 78 con fechas isotópicas, siendo

CAPITULO 2 ANTECEDENTES DEL VULCANISMO DEL CRETÁCICO TARDÍO EN SONORA

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

"Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México"

el método U-Pb el más utilizado, 58 ejemplares de análisis geoquímicos de elementos mayores y trazas, así como cuatro ejemplares de isotopos de Nd (Tabla AN1, Figura 5).

Cabe señalar que la mayoría de los datos obtenidos se encuentran dentro de la porción de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental.

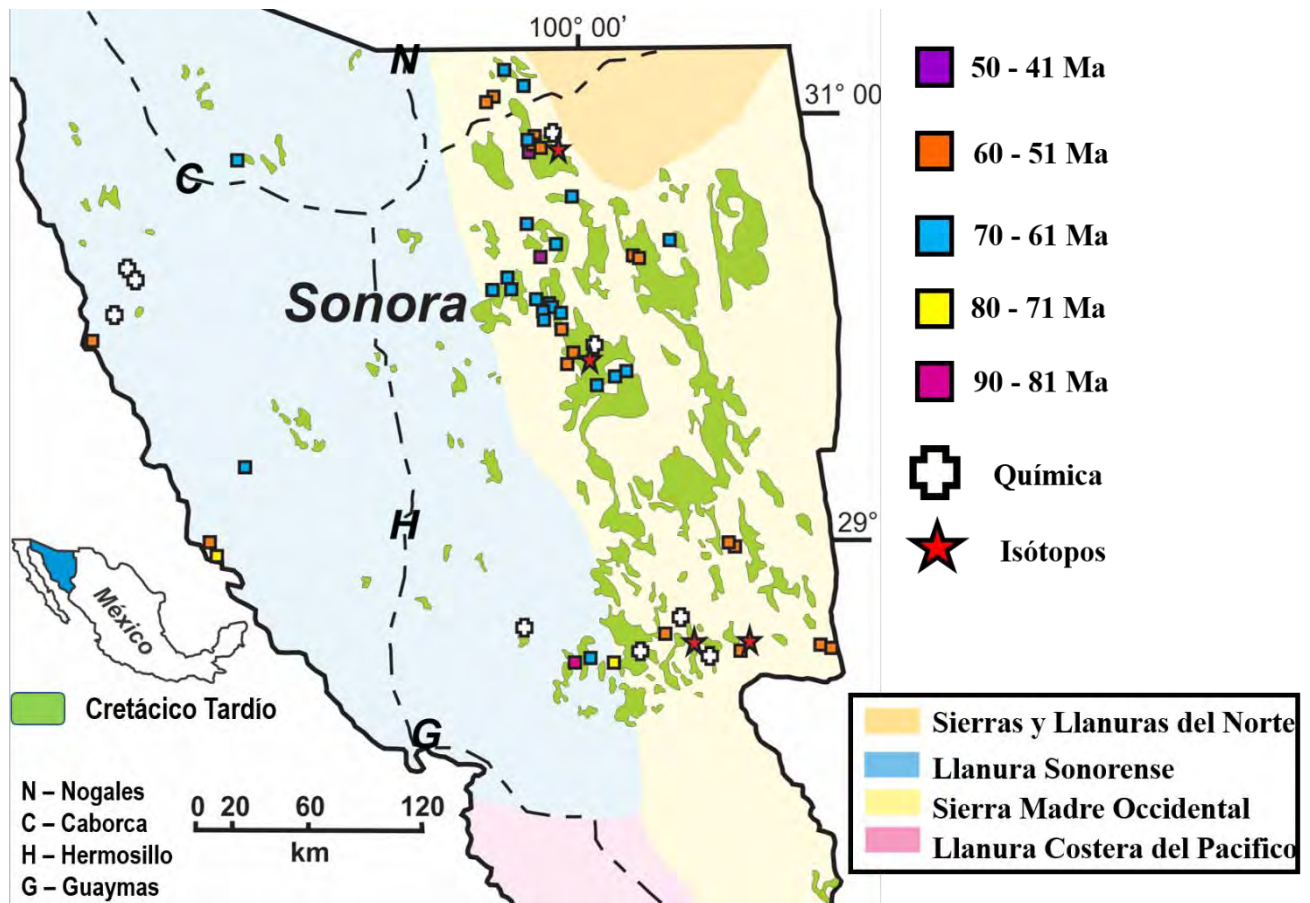


Figura 5.- Distribución espacial de la base de datos correspondiente al vulcanismo Cretácico Tardío en Sonora dentro de las provincias fisiográficas; imagen modificada de INEGI (2011). Las áreas de color verde representan la distribución de los afloramientos de rocas volcánicas del Cretácico Tardío; modificado de García-Barragán y Jacques-Ayala (2011) y González-León, et al. (2011).

2.4 Recopilación de datos geocronométricos

Se obtuvo un total de 78 edades isotópicas que corresponden al vulcanismo del Cretácico Tardío en Sonora; la captura de estos datos se encuentra en la **Tabla AN1**. Los datos corresponden a rocas volcánicas que varían en composición desde andesitas, dacitas, riolitas, ignimbritas y tobas; los métodos utilizados para fechar estas rocas son los siguientes: $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$, siendo el método U-Pb en circones el más empleado. Utilizando un enfoque estadístico, se construyó un histograma de frecuencias (**Figura 6**); mediante el cual se pueden detectar los principales picos de edades para rocas volcánicas del Cretácico Tardío – Paleoceno que han sido fechadas en Sonora. Los principales picos están dos en rangos de 76 a 69 y de 66 a 63 Ma. Estos se pueden interpretar como los principales pulsos magmáticos que dieron origen al vulcanismo del Cretácico Tardío en Sonora.

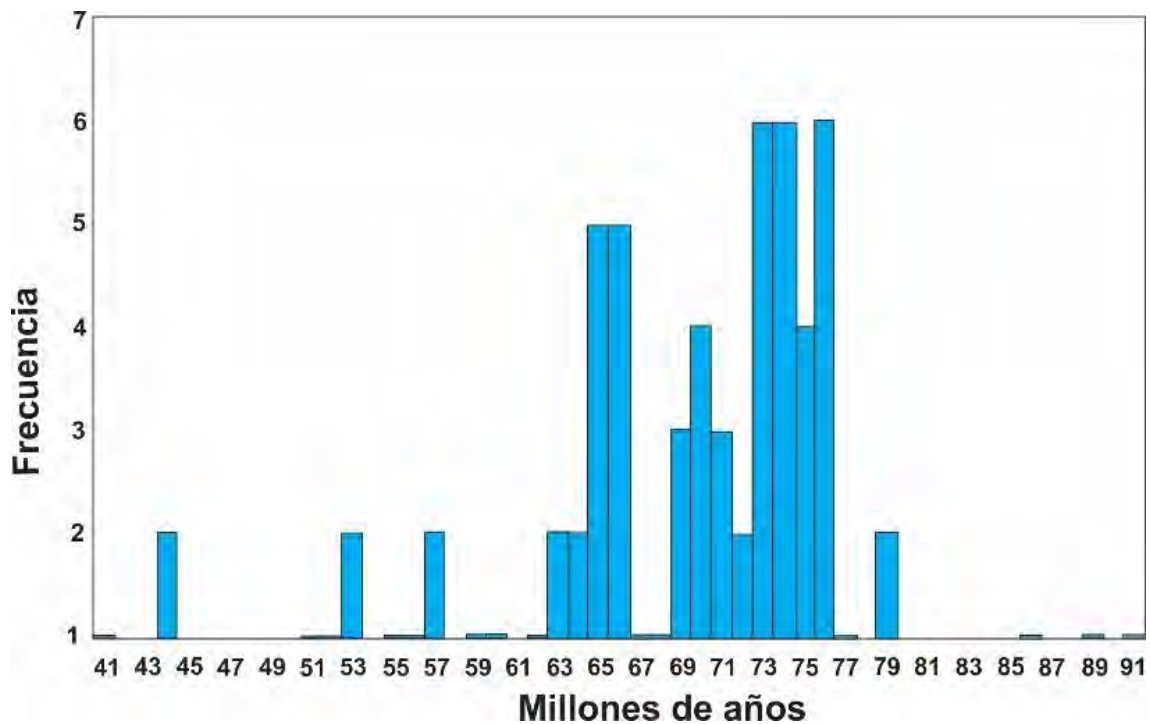


Figura 6.- Histograma de frecuencias para edades isotópicas de rocas volcánicas del Cretácico Tardío - Eoceno temprano del estado de Sonora.

CAPITULO 2 ANTECEDENTES DEL VULCANISMO DEL CRETÁCICO TARDÍO EN SONORA

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

2.5 Recopilación de datos geoquímicos de rocas volcánicas del Cretácico Tardío

Mediante la construcción de la base de datos para las rocas volcánicas del Cretácico Tardío de Sonora se obtuvo información de 59 muestras de roca que contienen datos de elementos mayores, traza y de tierras raras.

Estos datos se utilizaron junto con los análisis del vulcanismo cretácico estudiado dentro de la presente tesis, para ser considerados en la caracterización geoquímica. La recopilación de estos datos geoquímicos se presenta en la **Tabla AN2** dentro de la sección de anexos.

III GEOLOGÍA DEL VULCANISMO CRETÁCICO TARDÍO DE LAS REGIONES DE ESTUDIO

3.1 Geología de la Sierra El Chanate

El estudio de la geología de la Sierra El Chanate fue realizado por [Jacques-Ayala, 1983; 1989;1999](#) y [Jacques-Ayala et al. 2009](#), en donde describen la estratigrafía de las rocas cretácicas de la Sierra El Chanate. El espesor va de 1200 a 3500 metros y fueron divididas en tres unidades estratigráficas: Grupo Bisbee (formaciones Morita, Arroyo Sásabe y Cintura); Grupo El Chanate (formaciones Pozo Duro, Anita y Escalante) y el complejo volcánico El Charro.

Para los fines de este estudio, el trabajo se centró en los derrames de lava andesíticos que se intercalan en las unidades de roca del Grupo El Chanate y del complejo volcánico El Charro, y se dividió en dos unidades: 1) Derrames de lava andesítica del Grupo El Chanate y 2) Derrames de lava andesítica del complejo volcánico El Charro. Los minerales identificados se representan con las siguientes abreviaturas: **Pl.**- Plagioclasa; **FA.** - Feldespato Alcalino; **Anf.** - Anfíbol; **Czo.** - Cuarzo; y **OxFe-Ti.**- Óxidos de hierro-titanio.

3.1.1 Derrames de lava andesítica del Grupo El Chanate

Estas rocas afloran en la porción central del área de estudio y están intercaladas con lodolitas rojas, areniscas y conglomerados ([Figura 7](#)). Este afloramiento tiene un espesor de 5 a 10 metros y se encuentra moderadamente afectado por fracturamiento y oxidación; en general, es de color morado grisáceo ([Figura 8](#)). Esta unidad se encuentra moderadamente afectada por intemperismo, sin embargo, las fracturas debilitaron su consistencia. Se clasifica con una andesita porfídica de Pl-FA con matriz café microcristalina. En superficie fresca presenta color gris oscuro y en superficie intemperizada color café rojizo.



Figura 7.- Intercalación entre un conglomerado (derecha) y una unidad de areniscas (centro) con derrames de lava andesítica del Grupo El Chanate (izquierda).

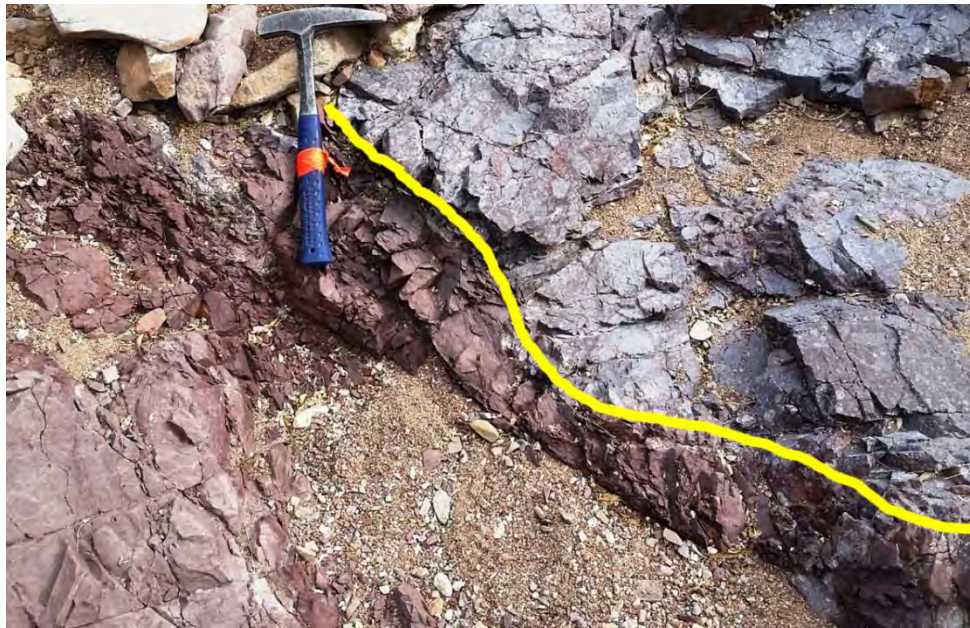


Figura 8.- Afloramiento del Grupo El Chanate en donde se muestra un contacto geológico entre un derrame de lava andesítica (arriba derecha) y una unidad de lodolitas rojas.

3.1.2 Derrames de lava andesítica del complejo volcánico El Charro

Estas rocas afloran de manera potente en la porción sureste del área, sin embargo, el acceso dicha porción no fue posible, por lo que se estudiaron los afloramientos remanentes los cuales presentan una morfología de lomeríos bajos, formados por rocas muy fracturadas, que aparecen en la porción noreste de la Sierra El Chanate, (Figura 9A). El espesor de las capas va de los 5 a 10 metros (Figura 10); estos derrames tienen su respectiva brecha de base. Se clasifica como una andesita porfídica a glomeroporfídica con minerales esenciales de Pl-FA-OxFe-Ti, en una matriz rojiza microcristalina (Figura 9B). Jacques-Ayala (2009) reportó una edad de 71.6 ± 07 Ma en una roca andesítica de esta unidad (Figura 10 y 11).



Figura 9.- A) Afloramiento de andesita muy fracturado, el cual se encuentra aflorando de manera aislada; B) imagen de la muestra de roca de la unidad de andesita porfídica, en donde se puede apreciar la matriz de color rojiza.

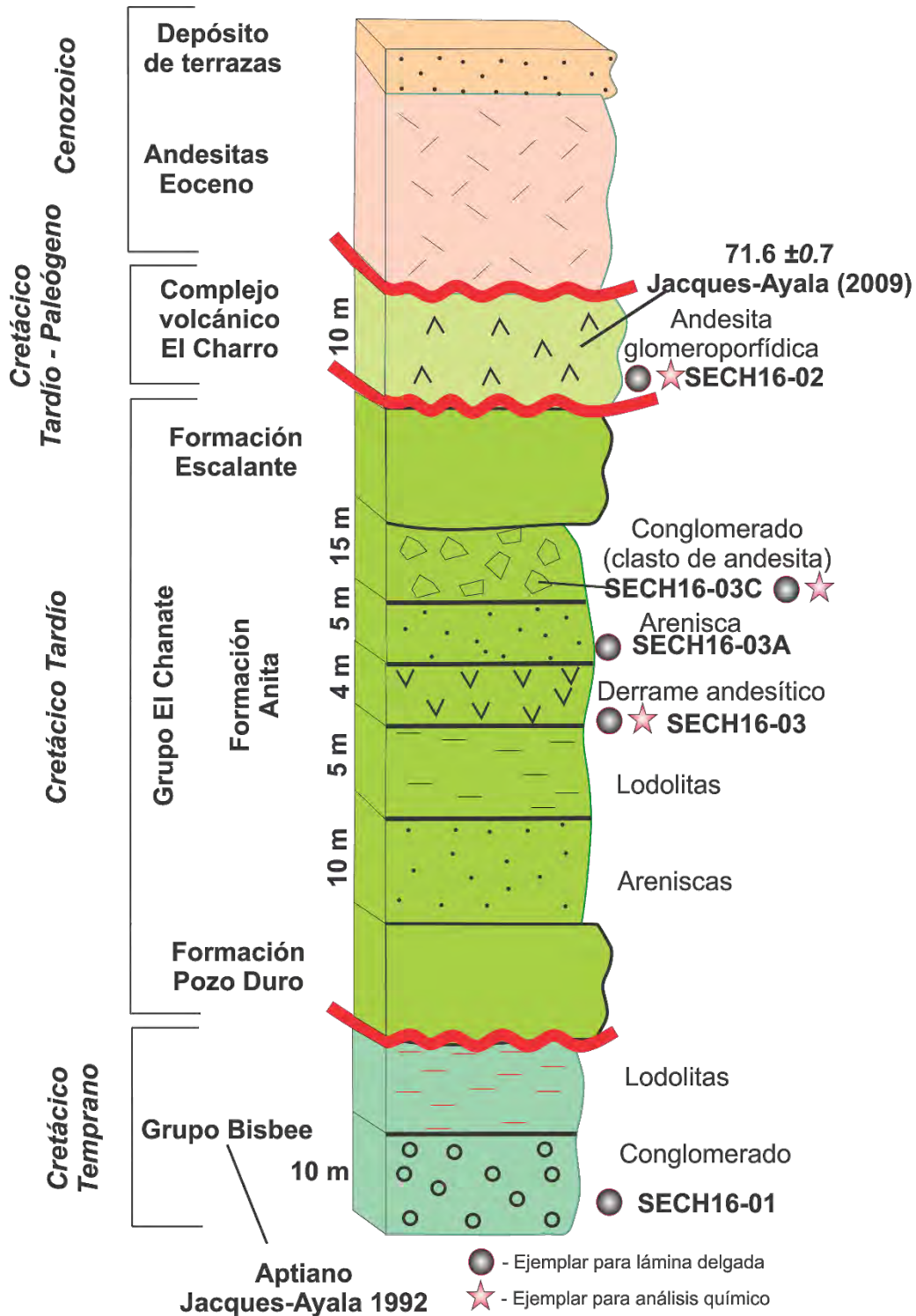


Figura 10.- Columna estratigráfica simplificada de la Sierra El Chanate con la posición de las muestras estudiadas. Modificada de Jacques-Ayala (1992).

CAPITULO 3 GEOLOGÍA DEL VULCANISMO CRETÁCICO TARDÍO DE LAS REGIONES DE ESTUDIO

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

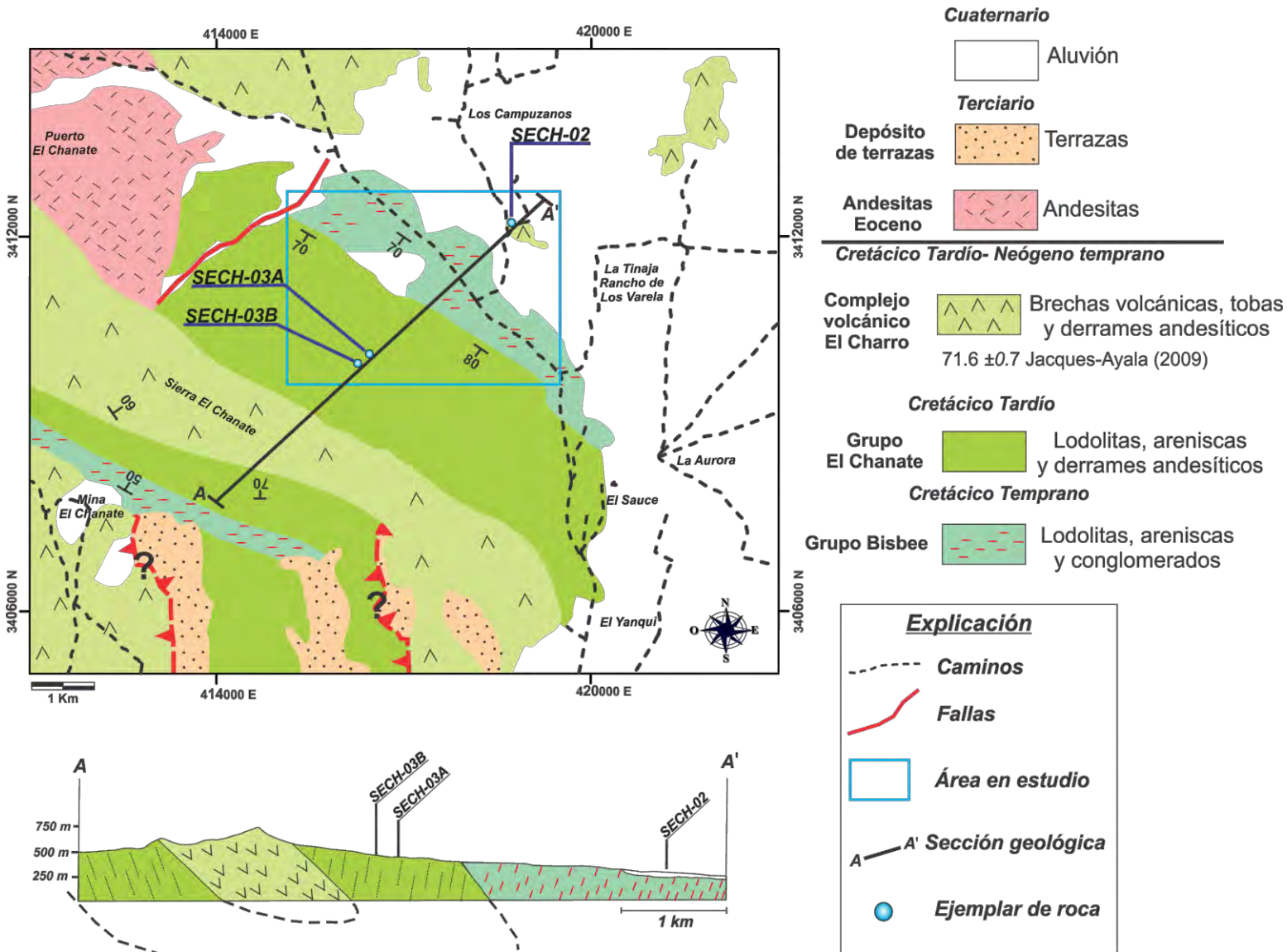


Figura 11.- Mapa geológico y sección geológica de la Sierra El Chanate, modificado de Jacques-Ayala (1993).

3.2 Geología del Cerro Libertad

La geología del área del Cerro Libertad en la región de Puerto Libertad fue descrita por [García-Huerta \(2015\)](#); quien la separo en siete unidades correspondiendo cronológicamente a las siguientes secuencias: 1) granitoide laramide; 2) complejo volcánico Libertad; 3) basalto El Puente; 4) unidad detrítica tipo Báucarit; 5) basalto Las Lomitas; 6) miembro volcánico Las Cejas Coloradas y 7) unidad detrítica del Plioceno-Cuaternario. Para los fines de este estudio se analizarán las unidades 1 y 2, que son las que corresponden al magmatismo del Cretácico Tardío.

3.2.1 Granitoide laramide (Cretácico Tardío)

Aflora exclusivamente en la porción oeste del área de estudio donde está afectado en cierto grado por fracturamiento. El intrusivo presenta diferencias tanto composicionales como morfológicas que se describen a continuación. El primer cuerpo plutónico es predominantemente de composición granodiorítica, y morfológicamente muestra escarpes muy pronunciados ([Figura 12A](#)), tiene color gris claro con tonos en color crema, en superficie de intemperismo.

El segundo cuerpo intrusivo se encuentra cortando al anterior ([Figura 12A](#)) y también es de composición granodiorítica de tonalidad melanocrática con abundancia de anfíbol y con una intensa alteración propilitica (epidota+calcita+cuarzo); en superficie de intemperismo presenta un color café amarillento y en superficie fresca un color verde oscuro con algunas manchas blancas.

Estos intrusivos suelen mostrar morfológicas abruptas ([Figura 12A](#)) ocasionalmente suaves a manera de lomeríos ([Figura 12B](#)) y zonas de contacto donde se incrementa el grado de alteración argílica y por sectores propilitica. ([Figura 12C](#)).

Finalmente, se pudo reconocer una relación de corte que muestra que el granitoide laramide, intrusiona al Complejo volcánico Libertad ocasionando una aureola de contacto

CAPITULO 3 GEOLOGÍA DEL VULCANISMO CRETÁCICO TARDÍO DE LAS REGIONES DE ESTUDIO

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

donde se incrementa de la alteración propilitica, además se detectó la presencia de minerales verdes como malaquita (Figura 12D).

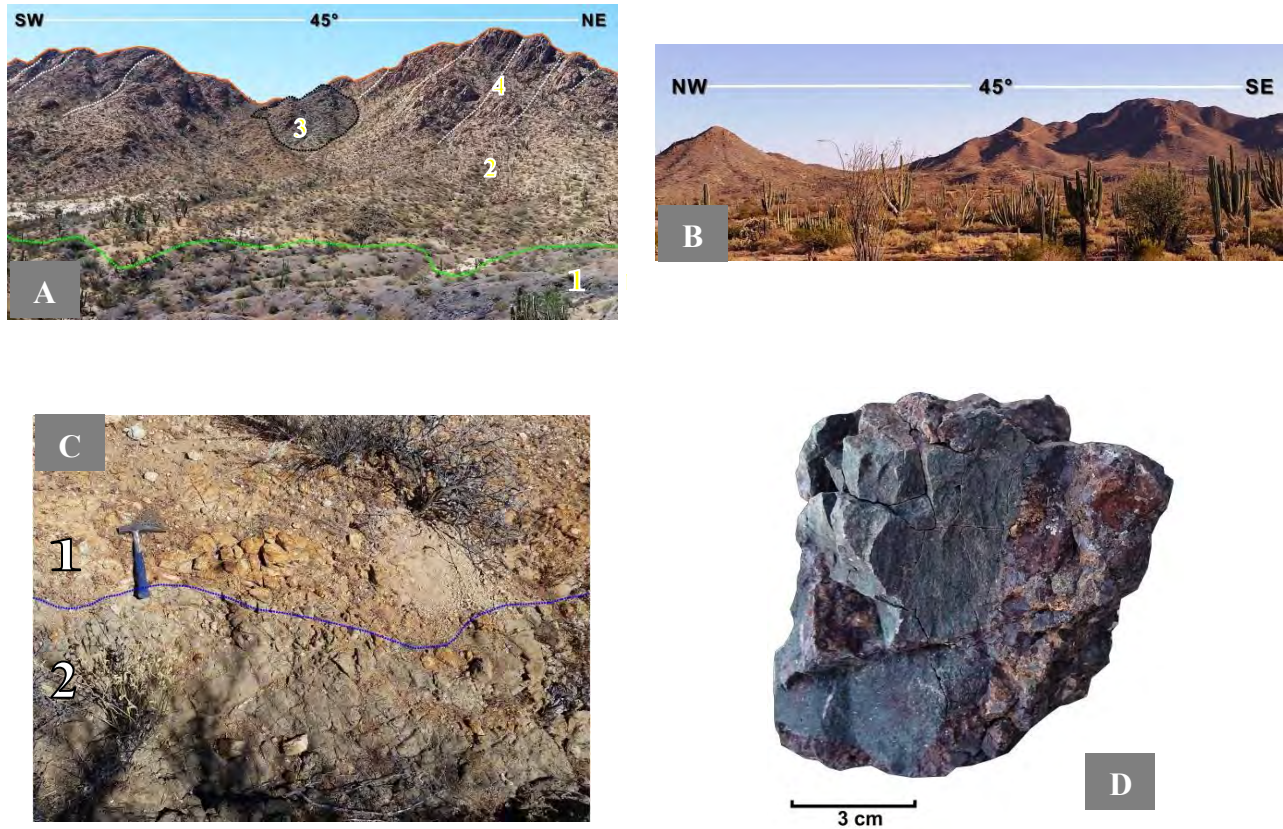


Figura 12.- **A)** Fotografía panorámica que muestra: 1. Afloramiento del complejo volcánico Libertad en contacto con 2. Granitoide larámide. El cuerpo plutónico anterior se encuentra intrusionado por 3. Cuerpo granodiorítico y 4. Diaclasas inclinadas en dirección noreste. **B)** Intrusivo granítico con morfología suave en lomeríos. **C)** Intrusivo granítico (1) intrusionado por granodiorita (2), donde se destaca el alto fracturamiento y la intensidad de alteración; y **D)** Muestra de mano de una brecha andesítica muy alterada, esta muestra fue tomada en la zona de contacto entre el granitoide laramide y el complejo volcánico Libertad.

3.2.2 Complejo volcánico Libertad (¿Cretácico Tardío?)

Se nombra por primera vez en la región de Puerto Libertad, al complejo volcánico Libertad, compuesto por seis unidades litológicas asociadas a pulsos volcánicos fluidales, volcanismo explosivo, rocas hipabisales, secuencias epiclásticas-tobáceas y secuencias detríticas, unidades que se describen a continuación de la base a la cima:

- (1) Pulsos volcánicos andesíticos de base. En la porción centro-noroeste de la región de estudio, este tipo de rocas comienzan con porciones brechoides ricas en clastos de andesita y dacita (Figuras 13A y B) y abundancia en vetillas rellenas de carbonatos de calcio. La secuencia comienza con una alternancia de rocas intermedias de composición principalmente andesítica con textura porfídica que varían en composición: Pl>FA>OxFe-Ti y Pl>FA>Anf>OxFe-Ti con diferencias en la intensidad de alteración (argílica y filica).
- (2) Rocas volcánicas de origen explosivo. Constituidas por dos conjuntos litológicos de al menos 30 metros de espesor (Figura 13D), el primero en la base es una brecha volcánica color rojizo fuertemente fracturada, seguida de un depósito piroclástico de caída libre de color blanco a blanco verdoso el cual está silicificado y muestra estratificación con gradación normal; el depósito piroclástico contiene fenocristales de Pl>FA>Anf>Czo>OxFe-Ti. Este depósito está cubierto por un depósito de bloques y ceniza, moderadamente consolidado. Presenta estratificación con intervalos de 20 cm de espesor, con horizontes un poco más consolidados, los cuales a su vez están afectados por alteración argílica y propilítica y en menor proporción con calcita + epidota, presentando un color gris púrpura a gris rojizo.
- (3) Depósito detrítico. Esta unidad está estratificada con horizontes silicificados, tiene un espesor aproximado de 40 metros y presenta color gris a gris amarillento (Figura 13F).
- (4) Depósito epiclástico-tobáceo. Este depósito está formado por tufitas y detritos, predominando un paraconglomerado polimíctico sostenido por matriz (30%), con clastos subredondeados, moderadamente consolidados (Figuras 13G y H); los clastos son de composición andesítica a dacítica con tamaños que van desde 1 a 3 cm, contenido de cristales de Pl>Anf>FA>Bta.

- (5) Dique basáltico 1. En el campo, se encontró que este cuerpo es discordante y corta a las rocas volcánicas de base descritas anteriormente, además de presentar un intenso fracturamiento (Figura 13C). El dique se encuentra muy afectado por alteración argílica. En superficie de intemperismo presenta un color amarillo grisáceo y en superficie fresca tiene color gris claro con manchas rojizas. Es un cuerpo hipabisal fuertemente oxidado de composición basáltica, con textura porfídica de $Pl > Px > Olv > OxFe-Ti$.
- (6) Dique basáltico 2. En general es de color gris claro con manchas rojizas en superficie fresca, mientras que en superficie de intemperismo tiene un color amarillo grisáceo. Hacia los bordes, este cuerpo intrusivo se vuelve de grano fino, sin embargo, sigue guardando las mismas características a nivel afloramiento. Este cuerpo presenta una ligera vesicularidad (Figura 13I) y abundantes huecos relictos de minerales preexistentes; presenta una textura porfídica de $Pl > Px > Anf > Olv > OxFe-Ti$ en una matriz microcristalina. Este dique presenta alteración argílica y en menor proporción propilítica con epidota y calcita.
- (7) Manto dacítico. Aflora concordantemente entre el vulcanismo explosivo y el depósito detrítico de color rojizo (Figura 13E). En superficie de intemperismo presenta un color café rojizo y en superficie fresca un color gris claro. Tiene una composición dacítica y presenta una textura porfídica de fenocristales de $FA > Anf > OxFe-Ti$.

La columna estratigráfica del área del Cerro Libertad se encuentra en la Figura 14, el mapa geológico en la Figura 15 y las secciones geológicas en la Figura 16.

CAPITULO 3 GEOLOGÍA DEL VULCANISMO CRETÁCICO TARDÍO DE LAS REGIONES DE ESTUDIO

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”



Figura 13.- Fotografías de afloramientos de las rocas que componen el Complejo volcánico Libertad. **A)** Cuerpo de andesita, donde las líneas amarillas muestran una estructura sigmoide; **B)** Brecha andesítica con clastos de composición andesítica a dacítica; **C)** Dique de composición basáltica fuertemente fracturado; **D)** Depósito detrítico color gris; **E)** Imagen panorámica donde se aprecia el contacto entre las siguientes unidades del complejo volcánico Libertad: 1.- depósito detrítico de color rojizo, 2.- manto dacítico y 3.- vulcanismo explosivo; **F)** Depósito detrítico estratificado; **G)** Unidad superior del complejo volcánico Libertad correspondiente al depósito epiclástico-tobáceo; **H)** Conglomerado polimíctico, moderadamente consolidado, correspondiente al depósito epiclástico-tobáceo; **I)** Dique de composición basáltica correspondiente al dique basáltico 2.

CAPITULO 3 GEOLOGÍA DEL VULCANISMO CRETÁCICO TARDÍO DE LAS REGIONES DE ESTUDIO

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

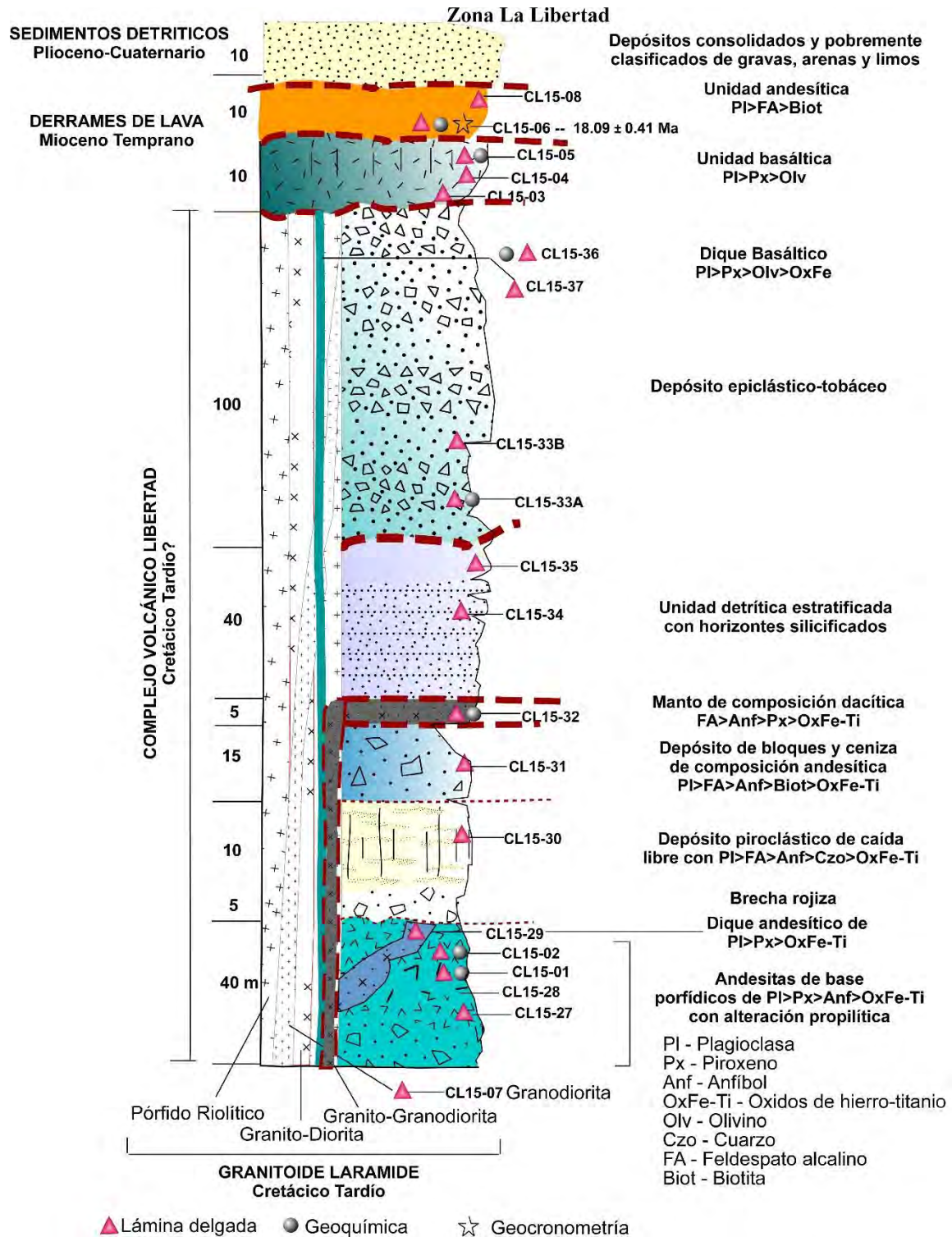


Figura 14.- Columna estratigráfica del complejo volcánico Libertad con la posición de las muestras estudiadas.

CAPITULO 3 GEOLOGÍA DEL VULCANISMO CRETÁCICO TARDÍO DE LAS REGIONES DE ESTUDIO

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

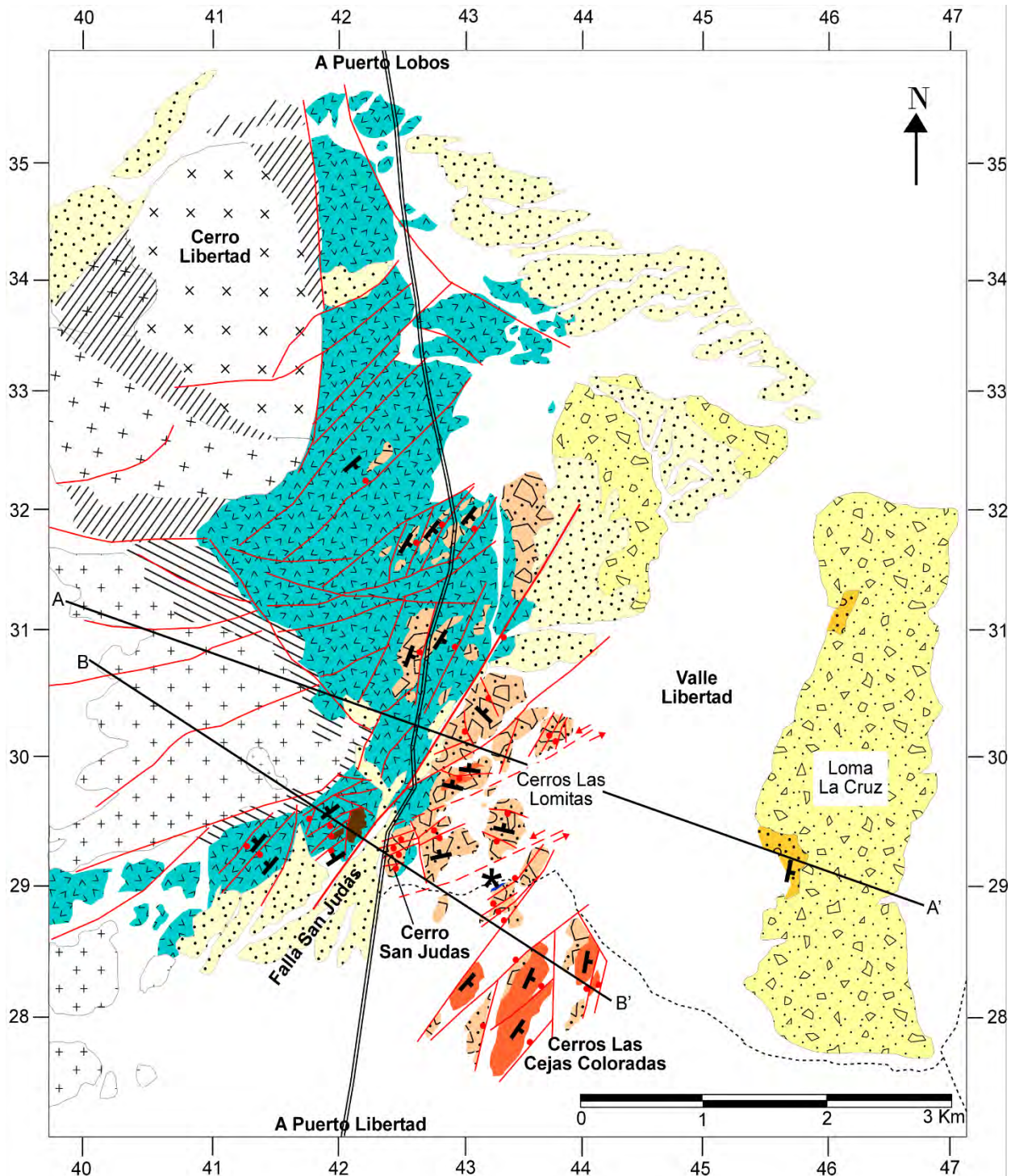


Figura 15.- Mapa geológico de la región de Cerro Libertad, Puerto Libertad, Sonora. La leyenda y explicación, además de la simbología, son las mismas que la **Figura 16**.

CAPITULO 3 GEOLOGÍA DEL VULCANISMO CRETÁCICO TARDÍO DE LAS REGIONES DE ESTUDIO

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

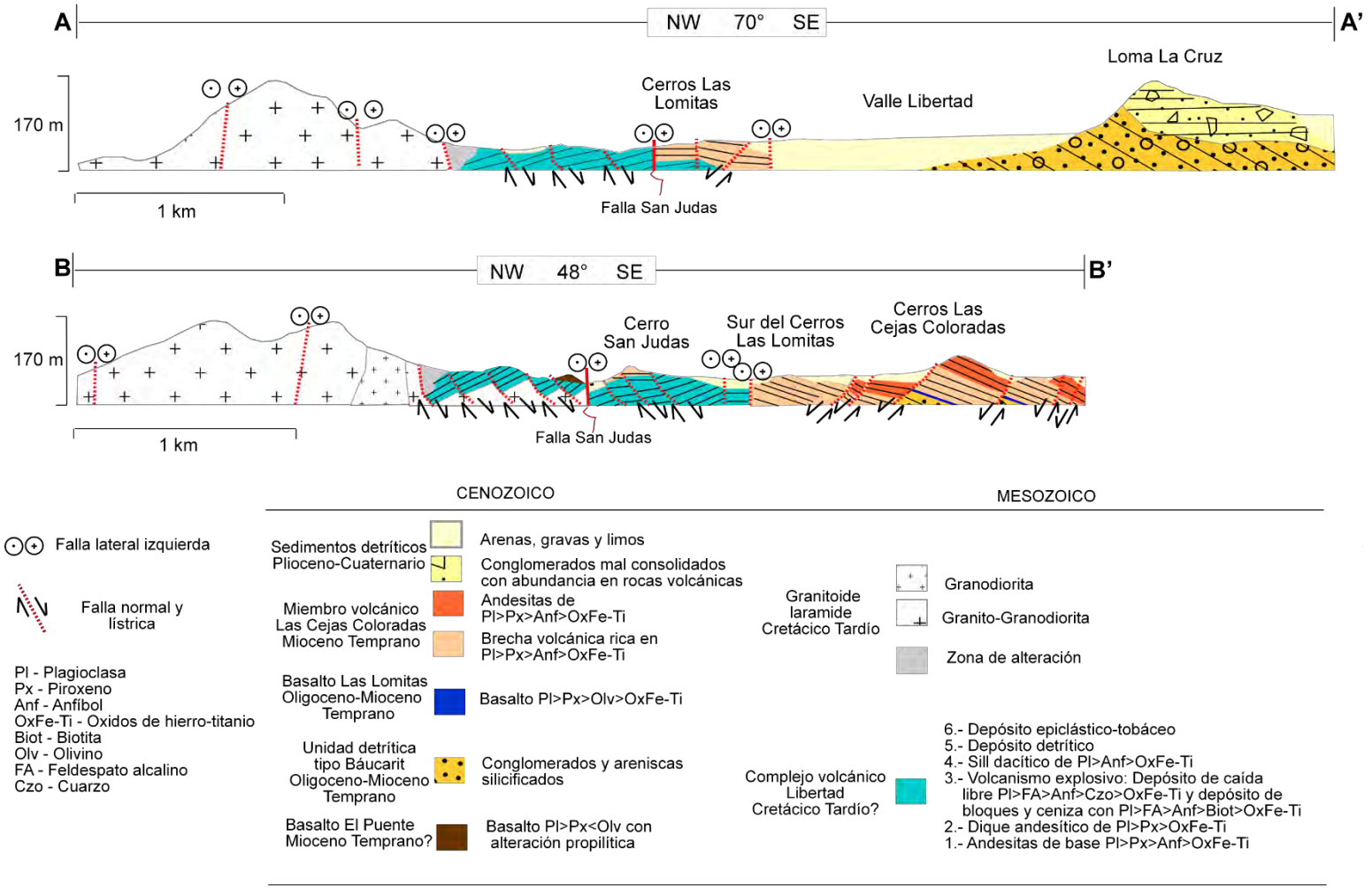


Figura 16.- Secciones geológicas del área del Cerro Libertad, la escala vertical se encuentra un tanto exagerada con el fin de tener una mejor visualización de la sección. La explicación es la misma del mapa geológico.

3.3 Geología de la Sierra Los Cerros Colorados

La geología de la Sierra Los Cerros Colorados fue descrita por [Gómez-Valencia \(2014\)](#). Las rocas más antiguas de la región dicha autora las nombró basamento indiferenciado y Granitoide laramídico. En este estudio las rocas volcánicas del Cretácico Tardío fueron divididas en cuatro unidades, por sus características petrológicas y cronológicas, dando lugar así a la siguiente secuencia: 1) andesítica porfídica, 2) andesítica afanítica, 3) andesítica porfídica de feldespatos, 4) andesítica glomeroporfídica con anfíbol.

3.3.1 Andesita porfídica

Aflora en la porción centro-este de la Sierra Los Cerros Colorados y se encuentra en forma de lomeríos bajos fuertemente fracturada y localmente está en contacto con el granito laramídico del Cretácico Tardío ([Figura 17A](#)). El afloramiento es de color gris verdoso en superficie fresca y café rojizo en superficie de intemperismo. Está afectado por oxidación y alteración hidrotermal, reflejada como alteración argílica con presencia de arcillas y silicificación. La composición es andesítica con textura porfídica de Pl-FA-OxFe-Ti, en una matriz microcristalina de color crema ([Figura 17B](#)).

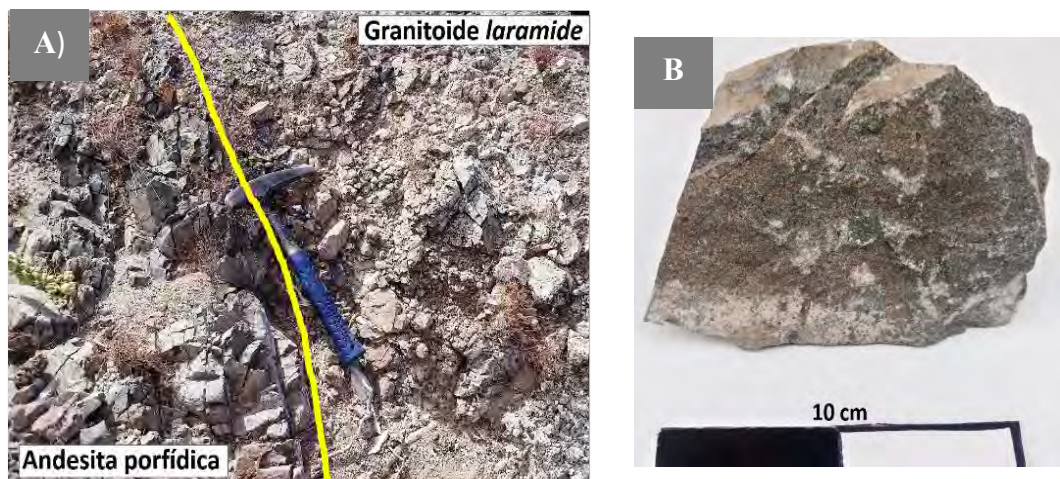


Figura 17.- A) Contacto entre la andesita porfídica y el granitoide laramídico; B) Detalle de la muestra tomada en la unidad de andesita porfídica.

3.3.2 Conglomerado Cretácico Tardío

En la parte noreste de la Sierra Los Cerros Colorados aflora un conglomerado con morfología de lomerío bajo, con alto fracturamiento (Figura 18A); el espesor es de aproximadamente 5 m. Este conglomerado se encuentra después del primer afloramiento nombrado andesita porfídica y se clasifica como un conglomerado polimíctico, moderadamente clasificado con clastos de cuarcita y andesita, sostenido por matriz (Figura 18B). Se piensa que este conglomerado puede ser de edad Cretácico Tardío ya que los clastos de andesita que contiene son similares a las unidades volcánicas en estudio.

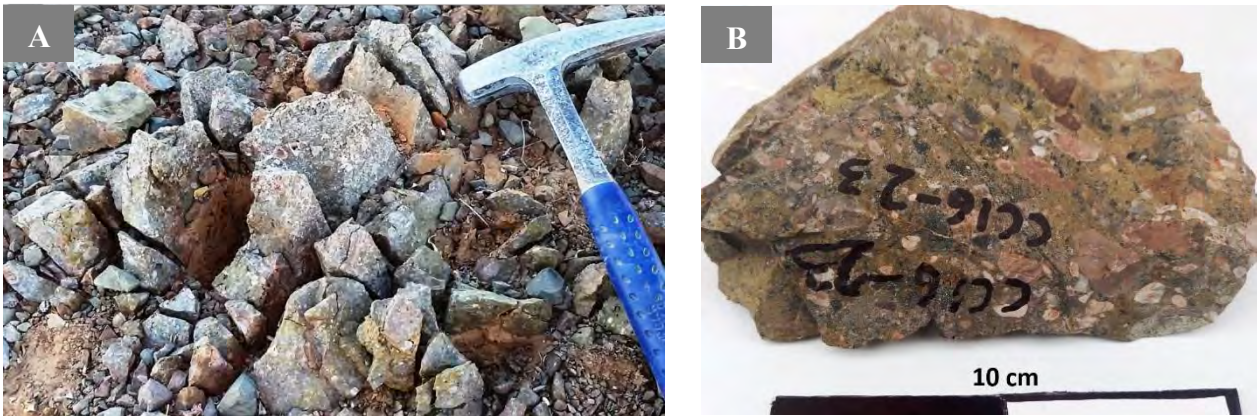


Figura 18.- A) Afloramiento de conglomerado del Cretácico Tardío (?) Afectado por fracturamiento intenso; B) Detalle del conglomerado, en donde se pueden ver los clastos de andesita y cuarcita.

3.3.3 Andesita porfídica de plagioclasa

Después del conglomerado aflora un derrame andesítico con morfología de lomerío bajo, con afectación por fracturamiento de alto grado. En superficie fresca presenta un color café con tono rosado y en superficie de intemperismo tiene un color café rojizo; esta unidad se encuentra muy silicificada (Figura 19); y se clasifica como una andesita porfídica de Pl-FA-OxFe-Ti en una matriz vítrea a microcristalina.

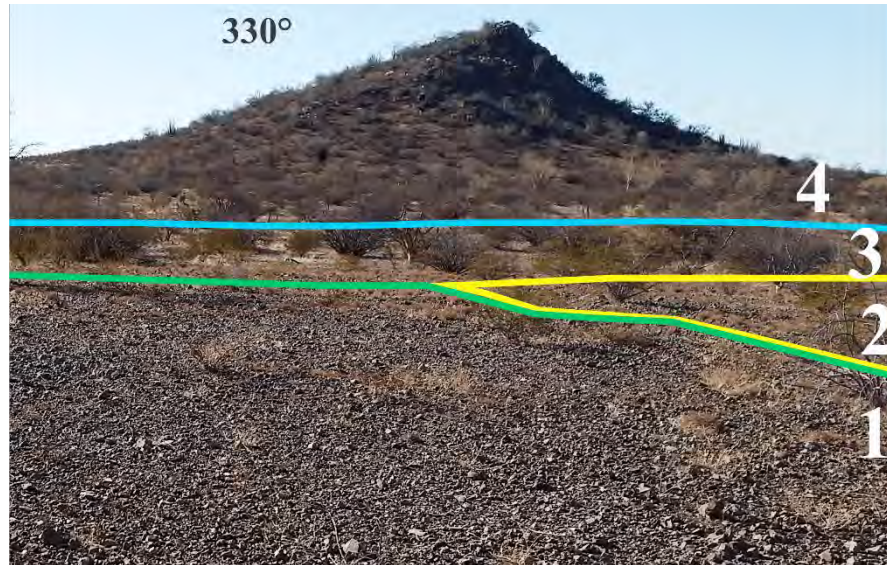


Figura 19.- Foto panorámica en donde se muestra: **1)** afloramiento muy intemperizado de andesita porfídica de plagioclasa; **2)** conglomerado del Cretácico Tardío?; **3)** andesita porfídica y **4)** vulcanismo del Neógeno

3.3.4 Andesita porfídica de feldespatos

Esta roca aflora en parches como lomeríos bajos, presentando un fracturamiento intenso (**Figura 20A**); el afloramiento presenta un color café amarillento en superficie de intemperismo y un color gris rojizo en superficie fresca (**Figura 20B**). Esta roca se clasifica como una andesita con textura porfídica a glomeroporfídica de FA-Pl-OxFe-Ti en una matriz microcristalina a vítrea, afectada por alteración filica y argílica.



Figura 20.- **A)** Unidad de andesita porfídica de feldespatos, en la imagen se puede apreciar el alto grado de fracturamiento que afecta a esta unidad; **B)** Detalle de la muestra de andesita con feldespatos alcalinos.

3.3.5 Andesita glomeroporfídica

Aflora en la porción centro-este de la Sierra Los Cerros Colorados y presenta morfología de lomeríos bajos; en superficie de intemperismo muestra un color naranja grisáceo y en superficie fresca, un color gris verdoso. La roca se encuentra afectada por un fracturamiento intenso (**Figura 21A**). Se clasifica como una andesita glomeroporfídica de Pl-FA-Anf-Biot, en donde destaca la presencia de anfíbol y biotita en una matriz vítrea a microcristalina de color gris (**Figura 21B**). Esta unidad se encuentra muy silicificada y además presenta alteración argílica, filica y en menor, propilítica.

Esta roca fue fechada mediante el método de U-Pb en circones produciendo una edad de 80.89 ± 0.42 Ma (**Figuras 22 y 23**), por lo que se puede asegurar que pertenece al Cretácico Tardío (Campaniano).



Figura 21.- A) Afloramiento muy intemperizado de andesita glomeroporfídica. El fracturamiento intenso facilita su destrucción y B) Detalle de la andesita glomeroporfídica silicificada.

CAPITULO 3 GEOLOGÍA DEL VULCANISMO CRETÁCICO TARDÍO DE LAS REGIONES DE ESTUDIO

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

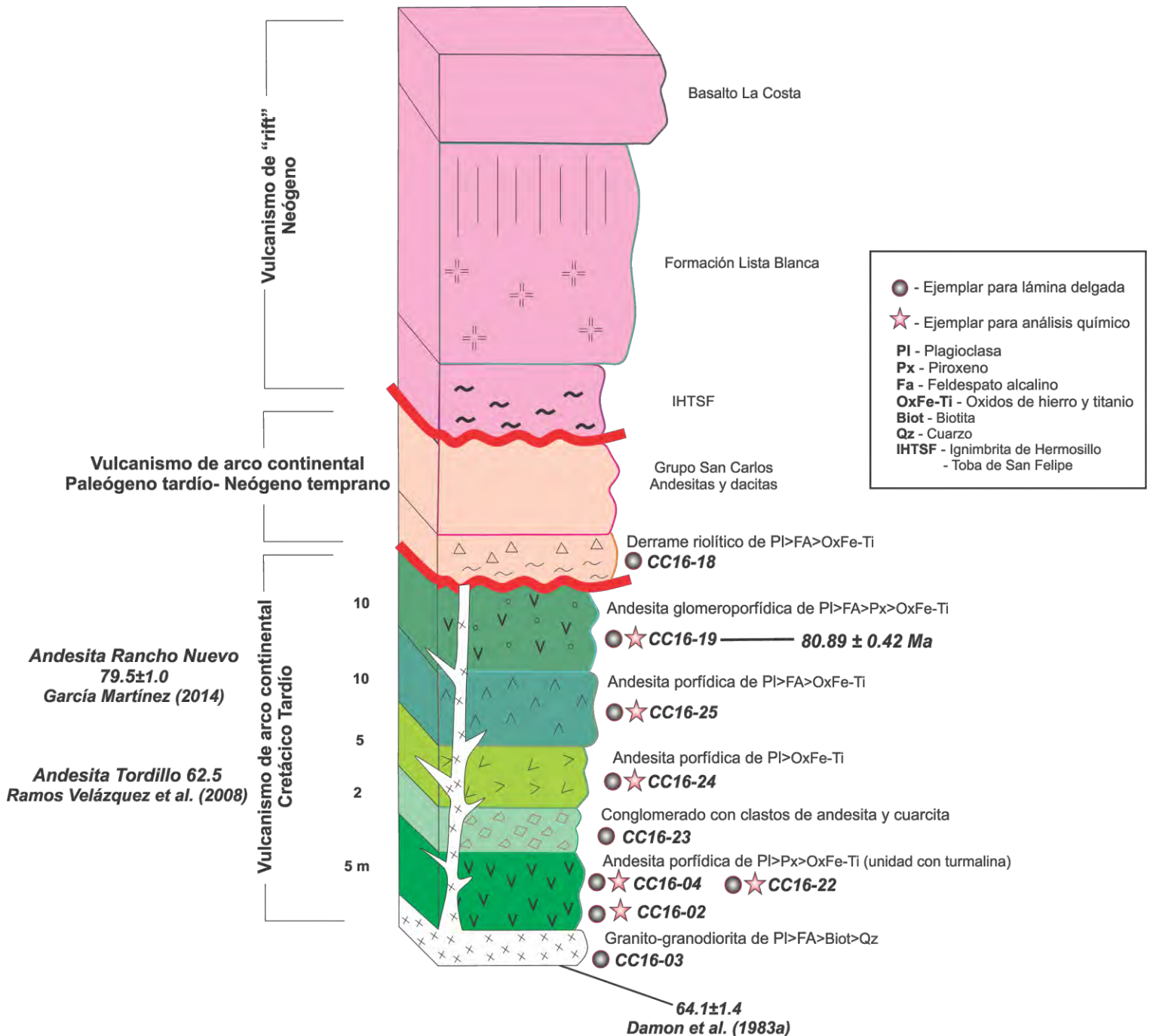


Figura 22.- Columna estratigráfica de la Sierra los Cerros Colorados con la ubicación de las muestras estudiadas.

CAPITULO 3 GEOLOGÍA DEL VULCANISMO CRETÁCICO TARDÍO DE LAS REGIONES DE ESTUDIO

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

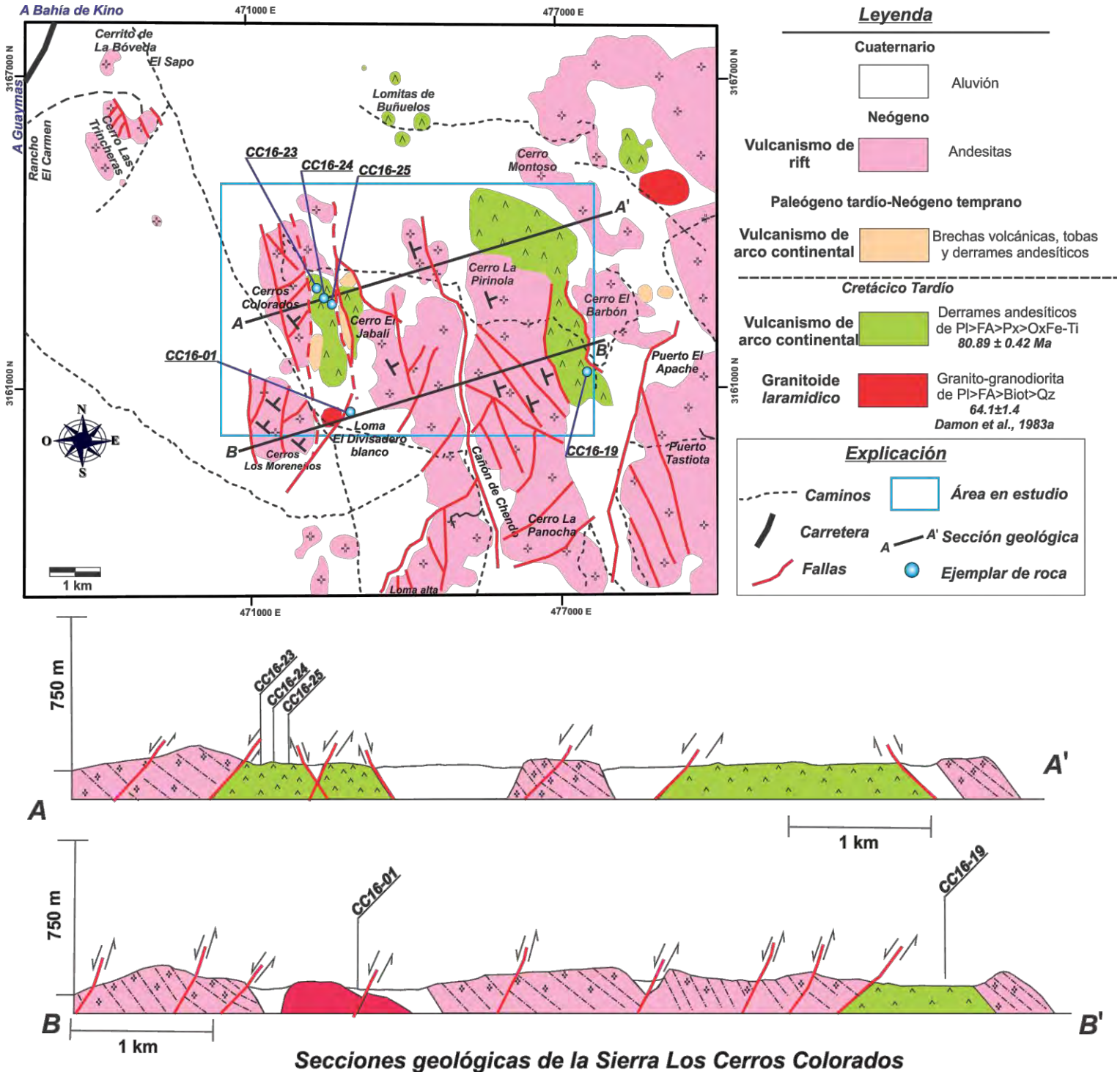


Figura 23.- Mapa geol3gico de la Sierra Los Cerros Colorados (Modificado de G3mez-Valencia, 2014) y secciones geol3gicas. La escala vertical esta exagerada con el fin de obtener una mejor visualizaci3n de la secci3n.

IV PETROGRAFÍA DEL VULCANISMO CRETÁCICO TARDÍO

De acuerdo al trabajo de campo es complicado asignar una clara relación estratigráfica en cuanto al vulcanismo del Cretácico Tardío en las regiones de estudio, esto debido a la naturaleza de los afloramientos litológicos, donde la mayoría tiene morfologías en lomeríos bajos muy intemperizados, además de encontrarse afectados por un intenso fracturamiento y por diferentes grados de alteración. Por lo anterior, se procedió a realizar un estudio petrográfico de estas rocas volcánicas con el fin de obtener grupos petrológicos que identifiquen la relación que guardan estos magmas en las tres áreas de estudio incluidas en este trabajo de tesis.

De esta manera, se seleccionaron 25 muestras representativas de un total de 30 ejemplares de roca recolectados, de las cuales se realizaron láminas delgadas; del total de las láminas, 13 pertenecen a la región de Puerto Libertad, cuatro a la Sierra El Chanate y nueve a la Sierra Los Cerros Colorados. El análisis petrográfico se llevó a cabo utilizando un microscopio marca LEICA del Laboratorio de Petrografía del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora.

Con las asociaciones mineralógicas y relaciones texturales identificadas bajo el microscopio sumadas a las descripciones de campo, se identificaron tres grupos petrológicos que se repiten en las tres localidades de estudio (**Tabla 1**). Estos grupos petrológicos muestran las diferencias más importantes reconocidas en el estudio petrográfico y muestran el orden de la estratigrafía volcánica de las tres localidades en estudio de acuerdo al número asignado. Al grupo 1 de base se le asignó el color verde, el grupo intermedio 2 tiene un color amarillo y para la cima el grupo 3 es de color gris. Las descripciones de todas las láminas delgadas se encuentran en los anexos.

Tabla 1.- Análisis petrográfico de rocas volcánicas del Cretácico Tardío de las áreas en estudio. Las abreviaturas corresponden a: **Pl** plagioclasa, **FA** feldespato alcalino, **Anf** anfíbol, **Czo** cuarzo, **Zr** cirión y **Op** opacos.

	CLAVE	Roca	Facies	Textura	Fenocristales	Mineral Abundante	Glómeros	Tamaño de grano	Matriz	%Opacos	Accesorios
Sierra El Chanate	SECH16-02	Andesita	Superior	Porfídica	FA>Pl>Anf>Biot	FA y Anf	Pl>FA	Grueso	Microcristalina de Pl	5%	Zr
	SECH16-03A	Andesita	Intermedia	Sostenida	Pl>FA>Anf	FA y Pl	-----	Grueso	Vítrea	2%	-----
	SECH16-03C	Andesita	Intermedia	Porfídica	Pl>FA>Anf	FA y Pl	Pl>Pl>FA	Medio	Microcristalina de Pl	1%	-----
	SECH16-03	Andesita	Fluidal basal	Traquítica	Pl>FA	Pl	Pl	Fino	Microcristalina de Pl	5%	-----
Puerto Libertad	CL15-33A	Andesita	Epiclástico	Porfírica	FA>Pl>Anf>Biot	FA y Anf	Pl>FA	Grueso	Vítrea a microcristalina	2%	Zr
	CL15-33B	Andesita	Epiclástico	Porfírica	FA>Pl>Anf>Biot	FA y Anf	Pl>FA	Grueso	Vítrea a microcristalina	5%	Zr
	CL15-26	Andesita	Brecha	Porfídica	Pl>FA>Anf	Pl	-----	Medio	Vítrea a microcristalina	1%	Op
	CL15-27	Andesita	Intermedia	Traquítica	Pl>Anf>FA	Pl y Anf	-----	Medio	Vítrea a microcristalina	3%	-----
	CL15-28	Andesita	Intermedia	Traquítica	Pl>FA>Anf	Pl y Anf	-----	Medio	Vítrea a microcristalina	2%	-----
	CL15-29A	Andesita	Dique	Traquítica	Pl>FA>Anf	Pl y Anf	Pl	Medio	Microcristalina de Pl	10%	-----
	CL15-29B	Andesita	Dique	Traquítica	Pl>FA>Anf	Pl y Anf	Pl	Medio	Microcristalina de Pl	1%	-----
	CL15-30	Andesita	Piroclástica	Porfídica	-----	Pl y FA	-----	Grueso	Ceniza	1%	Op y Zr
	CL15-31	Andesita	Brecha	Criptocristalina	Pl>FA>Anf>Czo	Pl y Czo	-----	Medio	Vítrea a microcristalina	1%	Op
	CL15-32	Dacita	Sill	Traquítica	Pl>FA>Anf	Pl y Anf	-----	Medio	Microcristalina de Pl	5%	-----
	CL15-01	Andesita	Fluidal basal	Traquítica	Pl>FA	Pl	Pl	Fino	Microcristalina de Pl	5%	-----
CL15-02	Andesita	Fluidal basal	Traquítica	Pl>FA	Pl	Pl	Fino	Microcristalina de Pl	5%	-----	
Sierra Los Cerros Colorados	CC16-24	Andesita	Intermedio	Porfírica	FA>Pl>Anf>Biot	FA y Anf	Pl>FA	Grueso	Vítrea a microcristalina	1%	Op
	CC16-19	Andesita	Superior	Porfírica	FA>Pl>Anf>Biot	FA y Anf	Pl>FA	Grueso	Microcristalina de Pl	1%	Op y Zr
	CC16-04	Andesita	Intermedio	Traquítica	Pl>FA>Anf	Pl y FA	Pl	Fino	Microcristalina de Pl	5%	-----
	CC16-23	Conglomerado	Intermedio	Sostenida	-----	Pl y FA	-----	Grueso	Microcristalina	1%	Op y Zr
	CC16-03	Granodiorita	Contacto	Holocristalina	FA>Pl>Czo>	FA y Czo	Pl	Medio	Microcristalina de Pl	-----	-----
	CC16-01	Andesita	Fluidal basal	Traquítica	Pl>FA	Pl	Pl	Fino	Microcristalina de Pl	5%	-----
	CC16-06	Andesita	Fluidal basal	Traquítica	Pl>FA	Pl	Pl	Fino	Microcristalina de Pl	5%	-----
	CC16-25	Andesita	Fluidal basal	Traquítica	Pl>FA	Pl	Pl	Fino	Microcristalina de Pl	3%	-----
	CC16-22	Dacita?	Fluidal basal	Alteración	Pl>FA	Pl	-----	Fino	Microcristalina	1%	-----

Grupo petrológico 1

Grupo petrológico 2

Grupo petrológico 3

Las características que distinguen a cada grupo petrológico se describen a continuación:

Grupo petrológico 1

- (1) Textura fluidal traquítica, la cual se caracteriza por tener un arreglo subparalelo de microcristales alineados en la matriz de la roca (MacKenzie et al., 1982).
- (2) Por la asociación y porcentajes relativos fenocristales la cual consta principalmente de $Pl > FA$.

Grupo petrológico 2

- (1) Se caracteriza por la presencia de anfíbol y de biotita.
- (2) Cambio en la naturaleza del vulcanismo y depósito, indicado por la intercalación de conglomerados, brechas y unidades epiclásticas tóbaceas.

Grupo petrológico 3

- (1) Aumento en el tamaño de los cristales.
- (2) Textura porfídica, la cual es caracterizada por tener grandes fenocristales rodeados por una matriz de grano fino en la matriz (MacKenzie et al., 1982).
- (3) Asociación mineralógica la cual consiste de $Fa > Pl > Anf > Biot$.

Estos grupos petrológicos muestran las diferencias petrográficas más importantes definen el orden de la estratigrafía volcánica de las tres localidades en estudio. A continuación, se muestra el resultado del análisis petrográfico; una característica importante es que casi todas las muestras se clasifican como andesita. Los minerales identificados se representan mediante las siguientes abreviaturas: Pl.- Plagioclasa; FA. - Feldespato Alcalino; Anf. - Anfíbol; Czo. - Cuarzo; Biot. - Biotita; y OxFe-Ti.- Óxidos de hierro-titanio.

4.1 Petrografía de la Sierra El Chanate

4.1.1 Grupo petrológico 1

Este grupo pertenece al vulcanismo que aflora hacia la parte noreste del núcleo de la Sierra El Chanate y se caracteriza por derrames volcánicos de composición andesítica de la Formación Anita (Jacques-Ayala 1983). Estos derrames volcánicos están afectados por un fracturamiento intenso. Bajo el microscopio esta roca presenta una textura traquítica fluidal en una matriz microcristalina de plagioclasa; su asociación mineralógica principal es de Pl>Fa y está afectada por alteración argílica (arcillas) y filica moderada (cuarzo-sericita). Cabe mencionar que esta roca concentra un gran porcentaje de minerales opacos, alrededor del 5% del total de la roca (muestra **SECH16-03**, Figura 24A).

4.1.2 Grupo petrológico 2

Este grupo está representado por una serie de brechas volcánicas de composición andesítica y conglomerados. Se caracterizan por tener clastos de la unidad inferior. La muestra **SECH16-03** pertenece a una brecha que contiene una asociación mineralógica que consiste de Pl>FA>Anf. Una de las características de esta unidad, es que comienza a disminuir el porcentaje de minerales opacos y la mayoría de los anfíboles aparecen como pseudomorfos, con minerales opacos en sus bordes. En el caso del conglomerado se procedió a analizar un clasto, el cual está representado por la muestra **SECH16-03C** (Figura 24B), se trata de una andesita con textura porfirítica, ligeramente traquítica, con una asociación mineralógica de Pl>FA>Anf; además contiene pseudomorfos de anfíbol los cuales concentran minerales opacos en sus bordes.

4.1.3 Grupo petrológico 3

Las rocas de este grupo se derivan de derrames volcánicos andesíticos que afloran como lomeríos bajos muy fracturados en la porción noreste de la Sierra El Chanate y está

representado por la muestra **SECH16-02** (**Figura 24C**). Dicha muestra se caracteriza por presentar texturas porfídicas con una asociación mineral principal de $Fa > Pl > Anf > Biot$, la cual está inmersa en una matriz microcristalina formada por plagioclasas. En este grupo petrológico los fenocristales presentan un tamaño relativamente mayor de hasta 4 mm, además de que contienen un mayor porcentaje de biotita. La alteración que afecta a este cuerpo de roca es de tipo filica principalmente en la matriz, lo que hace que esté silicificada. También hay alteración argílica, pero solo afecta a fenocristales de plagioclasa y feldespato alcalino. En estas rocas el anfíbol no aparece como pseudomorfo, sin embargo, tiende a concentrar minerales opacos en sus bordes. Minerales accesorios en estas rocas son el circón y minerales opacos.

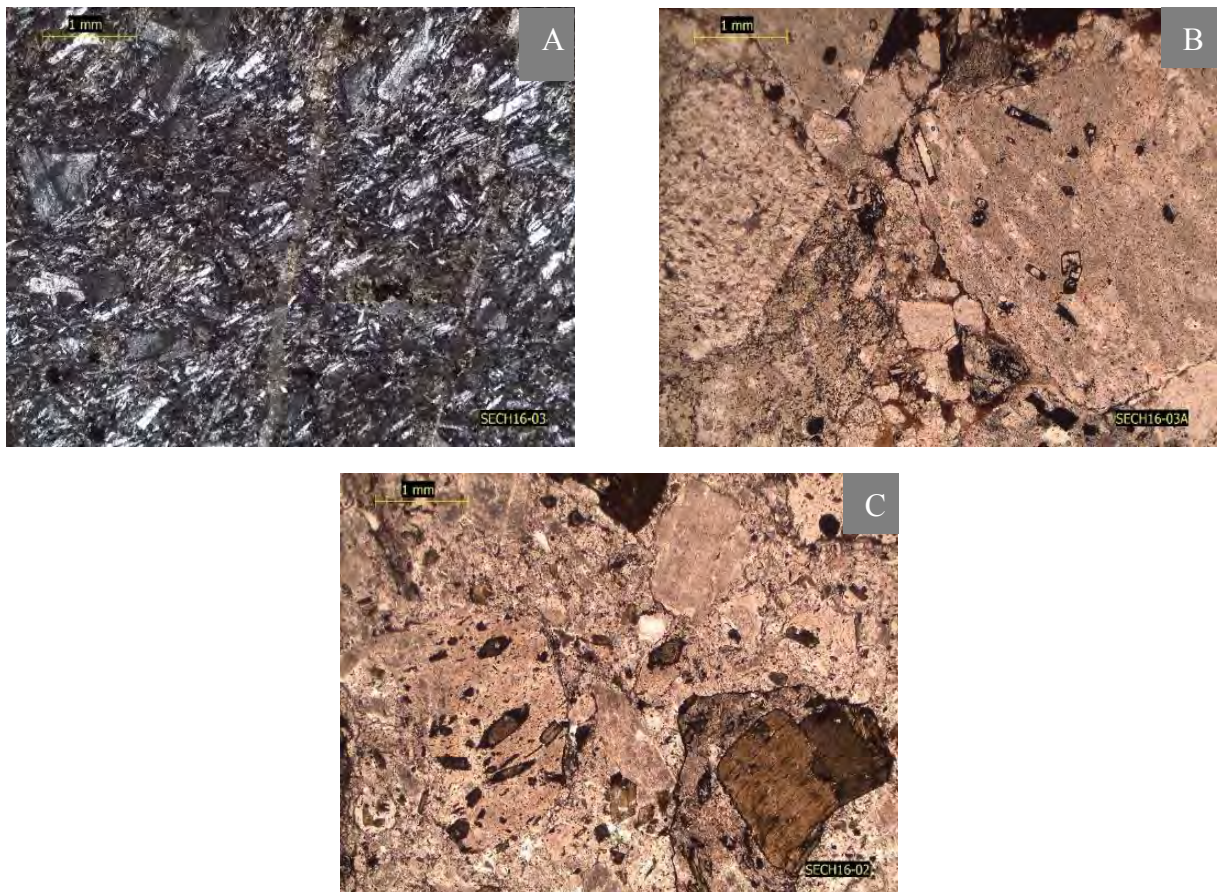


Figura 24.-Fotomicrografías representativas de los grupos petrológicos de la Sierra El Chanate. **A)** Andesita porfídica con fenocristales de plagioclasa y textura fluidal, **B)** Conglomerado polimíctico compuesto de clastos de composición andesítica, y **C)** Andesita con presencia de anfíbol y biotita.

4.2 Región Puerto Libertad

4.2.1 Grupo petrológico 1

Las rocas de este grupo petrológico son derrames volcánicos muy intemperizados que afloran como lomeríos bajos; dos muestras características de este grupo petrológico son **CL15-01** y **CL15-02**, que además están afectadas además por dos etapas de alteración. Petrográficamente se trata de rocas con textura fluidal de tipo traquítica en una matriz microcristalina de plagioclasa (**Figura 25A**). La principal asociación mineralógica es $Pl > FA$. En este grupo la alteración argílica y filica afecta principalmente a la matriz en comparación con los fenocristales de feldespato alcalino y plagioclasa, los cuales están afectados sólo por alteración argílica moderada, por lo cual se distinguen mejor bajo el microscopio. Cabe resaltar el gran porcentaje de minerales opacos, alrededor del 5% del total de la roca.

4.2.2 Grupo petrológico 2

En la localidad de Puerto Libertad este grupo petrológico se caracteriza por una serie de brechas volcánicas, depósitos de bloques y ceniza, diques, mantos (“sills”) y derrames volcánicos. Algunas de las muestras representativas son: **CL15-26**, **CL15-27**, **CL15-28**, **CL15-29A**, **CL15-29B**, **CL15-30**, **CL15-31** y **CL15-32**. Este grupo se caracteriza principalmente por la presencia de anfíbol. La secuencia inicia con una brecha volcánica (**CL15-26**) cuyos clastos predominantes son de andesita. Dicha andesita, exhibe una textura porfídica con una asociación mineralógica de $Pl > FA > Anf$, en una matriz que va de vítrea a microcristalina de plagioclasa. La alteración que afecta a este tipo de roca es de tipo argílica y filica. Sobreyaciendo a estas brechas, se encuentran derrames andesíticos (**CL15-27**, **CL15-28**) con texturas ligeramente traquíticas y porfídicas, con una asociación mineralógica de $Pl > Anf > FA$ en una matriz microcristalina de plagioclasa. En estos derrames se nota la abundancia de fenocristales de anfíbol y feldespato alcalino, sin embargo, algunos de los minerales de anfíbol aparecen a manera de pseudomorfos. Estos derrames son cortados por un dique andesítico (**CL15-29A**, **CL15-29B**), el cual exhibe una textura fluidal traquítica con

fenocristales de Pl>FA>Anf, en una matriz microcristalina de plagioclasa. En este dique la mayoría de los anfíboles están como pseudomorfos y reemplazados totalmente por minerales opacos. Sin embargo, la matriz de esta roca también se ve afectada por alteración filica y alteración argílica moderada, principalmente en los feldespatos alcalinos. Cubriendo a estas unidades se encuentra un depósito piroclástico (**CL15-30**, **CL15-31**) con textura porfídica el cual contiene fragmentos líticos de andesita, dacita, arenisca, perlita y escaso “lapilli” inmerso en una matriz de ceniza con cristales de Pl>FA. En esta unidad el porcentaje de minerales opacos disminuye al 1% y las alteraciones que afectan a este tipo de depósito son filica y argílica. Concordante en esta unidad se encuentra un manto (**CL15-32**) de composición andesítica, con una textura ligeramente traquítica en una matriz vítrea a microcristalina de Pl>Czo. Presenta pseudomorfos de anfíbol los cuales concentran minerales opacos en sus bordes. Este manto está afectado por una alteración filica y silicificación tan intensas que han provocado que la roca prácticamente pierda su textura original (**Figura 25B**).

4.2.3 Grupo petrológico 3

Este grupo es un depósito epiclástico del cual se seleccionó un clasto de los más abundantes y corresponde a la muestra **CL15-33A**, mientras que la matriz corresponde a la muestra **CL15-33B**. El resultado del análisis petrográfico muestra que estas rocas tienen una textura porfídica con grandes fenocristales de FA>Pl>Anf>Biot, inmersos en una matriz microcristalina de plagioclasa. Se puede observar que la alteración que más afecta a este depósito es la de tipo filica moderada y afecta principalmente a la matriz. Esto hace que las rocas se encuentren silicificadas. Algunos de los fenocristales de anfíbol aparecen como pseudomorfos y acumulan minerales opacos en sus bordes (**Figura 25C**).

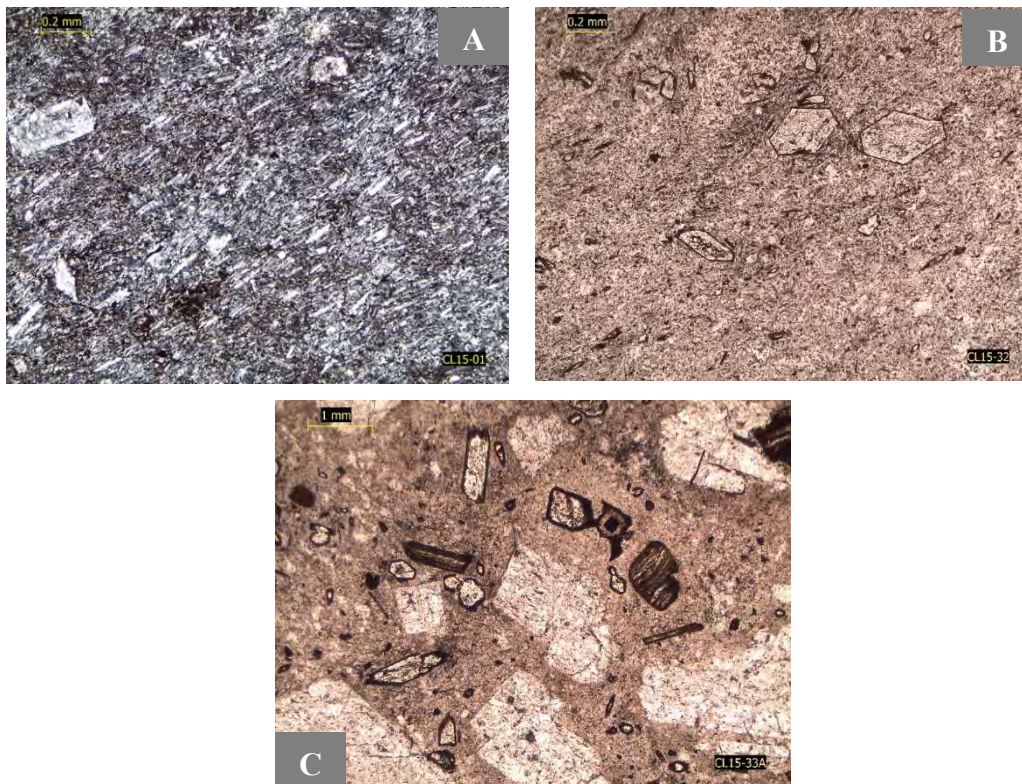


Figura 25.-Fotomicrografías representativas de los grupos petrológicos del Cerro Libertad. **A)** Andesita porfídica con fenocristales de plagioclasa y textura fluidal **B)** Manto dacítico con presencia de anfíbol y **C)** Andesita porfídica con presencia de anfíbol y biotita.

4.3 Sierra Los Cerros Colorados

4.3.1 Grupo petrológico 1

Este grupo está formado por una serie de derrames volcánicos que afloran en el área central de la Sierra Los Cerros Colorados, los cuales están afectados por un intenso fracturamiento y principalmente por dos estilos de alteración. Las muestras son: **CC16-01**, **CC16-06**, **CC16-25** y **CC16-22**. Se caracterizan petrográficamente por tener texturas traquíticas con fenocristales de $Pl > Fa$ en una matriz microcristalina de plagioclasa. Estos derrames se destacan por el gran contenido de minerales opacos alrededor del 5% del volumen total de la roca. Presentan una alteración filica intensa principalmente en la matriz, pero en algunos casos penetrativa, por lo que las rocas de este grupo tienen una importante

silicificación. Por otra parte, los fenocristales solo están afectados por alteración argílica, a diferencia de la matriz, éstos se encuentran mejor preservados (**Figura 26A**).

4.3.2 Grupo petrológico 2

Las rocas de este grupo sobreyacen a los derrames volcánicos del grupo 1; éstas consisten de derrames volcánicos y un conglomerado. La secuencia comienza con una roca de textura traquítica con fenocristales de $Pl > FA > Anf$, en una matriz microcristalina de plagioclasa, la cual está representada por la muestra **CC16-04** (**Figura 26B**). La matriz de esta roca está afectada por alteración filica moderada, en cambio los fenocristales de feldespato alcalino presentan una alteración selectiva de tipo argílica. Sobreyaciendo a estas rocas se encuentra un conglomerado (muestra **CC16-23**) sostenido por clastos de andesitas y arenisca de cuarzo. En este caso el cementante contiene abundantes cristales de epidota secundarios producto del hidrotermalismo que afecta al conglomerado. Además, contiene cristales de feldespato alcalino afectados por alteración argílica y cristales de anfíbol alterados a clorita.

4.3.3 Grupo petrológico 3

Este grupo está formado por derrames volcánicos los cuales están representados por las muestras **CC16-24** y **CC16-19**. Petrográficamente exhiben texturas porfídicas con fenocristales de $FA > Pl > Anf > Biot$, inmersos en una matriz microcristalina de plagioclasa. La matriz de estas rocas está afectada principalmente por alteración filica moderada a intensa y propilítica (clorita-epidota-calcita) moderada. Por otra parte, los fenocristales de plagioclasa y feldespato alcalino presentan alteración argílica moderada. En cambio, los fenocristales de anfíbol aparecen mayormente como pseudomorfos. Este grupo petrológico contiene minerales accesorios como circón y opacos (**Figura 26C**).

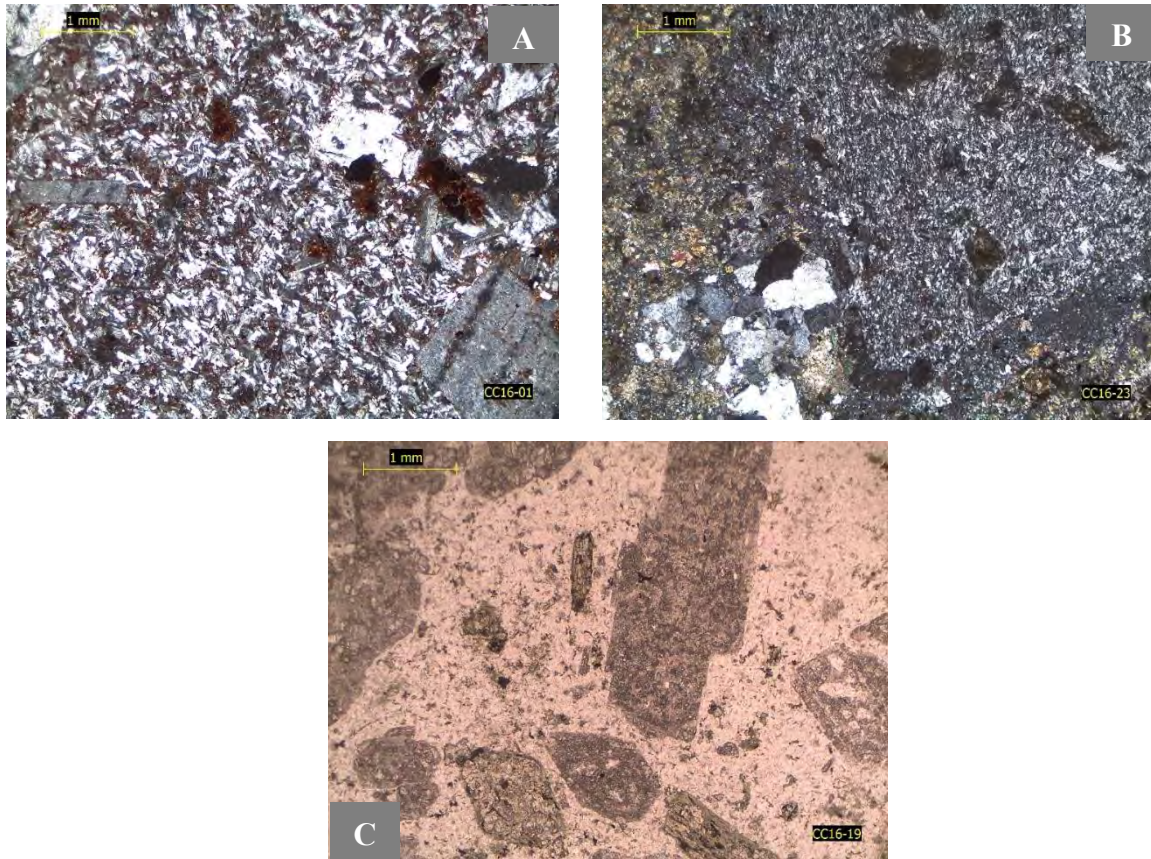


Figura 26.-Fotomicrografías de los grupos petrológicos de la Sierra Los Cerros Colorados. **A)** Andesita porfídica con fenocristales de plagioclasa y textura fluidal **B)** Conglomerado polimíctico con clastos de cuarcita y andesita y **C)** Andesita porfídica con anfíbol y biotita.

Por medio del análisis realizado en el estudio petrográfico realizado en las tres localidades de estudio, se pueden definir los siguientes puntos mediante el establecimiento de grupos petrológicos:

- (1) Se puede definir un patrón de afinidades petrográficas en las regiones involucradas.
- (2) Se propone la asignación de tres unidades volcánicas espacio-temporales presentes en las tres regiones de estudio, esto mediante las características principales que se definieron en cada grupo petrológico. Las unidades volcánicas propuestas quedarían de la siguiente manera: A) Unidad volcánica inferior con plagioclasa y

feldespato; B) Unidad volcánica intermedia con la presencia de anfíbol y C) Unidad volcánica superior con anfíbol y biotita.

- (3) Existe una mayor abundancia en el contenido de minerales opacos y de óxidos de hierro y titanio en la unidad volcánica inferior, alrededor del 5%.
- (4) Existe un aumento en el tamaño de los fenocristales desde la base hasta la cima, en la base existen fenocristales de grano fino a medio (1 a 2 milímetros), y a medida que se asciende en la sección el tamaño de los fenocristales aumenta de grano medio a grueso (3 a 5 milímetros).
- (5) El grado y estilo de alteración juega un papel importante en la naturaleza de los afloramientos; por lo que por el momento se manejan tres posibilidades: A) desestabilización de minerales provocado por sepultamiento y exhumación de los afloramientos; B) Metamorfismo de contacto-hidrotermal y C) La combinación de ambos.

Una observación importante de este trabajo, es que la alteración está presente en las tres regiones de estudio, las cuales están separadas por cientos de kilómetros; dicha extensión sugiere que esta alteración es de escala regional. Las asociaciones de alteración vistas en la petrografía son minerales hidratados, por lo que necesitan de algún proceso que genere algún fluido para que se formen estos minerales.

Esto se lograría bajo el siguiente proceso:

- 1) Las rocas volcánicas y vulcanosedimentarias del Cretácico se depositaron hasta formar una gran pila de varios kilómetros de espesor.
- 2) La potente columna de rocas con el paso del tiempo doblaría la corteza y por consiguiente se doblarían las isotermas.
- 3) Después de algún tiempo las isotermas se reajustan y calientan a las rocas volcánicas y vulcanosedimentarias dando origen al metamorfismo de bajo grado.
- 4) Por último, el aumento de presión y temperatura provoca la liberación de fluidos metamórficos que generan a los minerales hidratados.

Este proceso es el que mejor explica el origen de la alteración. De esta manera sugerimos que la alteración en las tres regiones de estudio, es provocada por un metamorfismo de sepultamiento de escala regional sin deformación.

V ESTUDIO GEOQUÍMICO DE LAS UNIDADES VOLCÁNICAS EN LAS REGIONES DE ESTUDIO

Se llevó a cabo un estudio geoquímico de roca total para elementos mayores, trazas y tierras raras se hizo en 14 muestras de las unidades volcánicas del Cretácico Tardío que fueron identificadas en las tres regiones de estudio. Las muestras se seleccionaron a partir del interés específico para determinar su clasificación, características y correlación con las unidades volcánicas estudiadas, así como para corroborar los resultados proporcionados por la petrografía. La metodología de preparación de muestras y analítica se encuentra en la sección de anexos.

5.1 Resultados.

Las muestras seleccionadas para análisis provienen de la Sierra El Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados. Los resultados de los análisis de roca por elementos mayores presentados como óxidos (% peso) el cálculo de la norma CIPW y elementos traza se encuentran en la [Tabla 2](#).

5.2 Evaluación de la alteración

Mediante el estudio geológico y petrográfico del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de estudio, se sabe que estas rocas presentan un grado de alteración moderado a intenso, además de un alto fracturamiento por lo que es esencial hacer una evaluación de la alteración con el fin de corroborar que los datos geoquímicos obtenidos son confiables. En general la interpretación de rocas volcánicas alteradas, no siempre es fácil. El aumento de SiO₂ en los magmas disminuye la tasa de alteración, esto quiere decir que las rocas máficas son más propensas a sufrir alteración ([Gifkings et al., 2015](#)). Para esto es necesario mencionar dos conceptos de alteración que pueden afectar la naturaleza de una roca:

- (1) La alteración hidrotermal genera cambios significativos en la composición y mineralogía de una roca; es de intensidad variable (de baja a intensa) y en ocasiones cuando la alteración es intensa puede borrar las texturas primarias.
- (2) La diagénesis se produce en respuesta de los cambios de presión y temperatura durante el sepultamiento, dan lugar a rocas débilmente alteradas que preservan sus texturas volcánicas.

La evaluación de las rocas volcánicas se consiguió mediante la identificación de los índices de alteración formulados por [Ishikawa et al. \(1976\)](#) y [Large et al. \(2001b\)](#).

- a) AI - Índice de Ishikawa, ejemplo clásico de depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos en Japón.

$$AI = 100 * (K_2O + MgO) / (K_2O + MgO + CaO + Na_2O)$$

- b) CCPI – Desarrollado por [Large et al. \(2001b\)](#) para representar los componentes durante la alteración de clorita y sericita.

$$CCPI = 100 * (Fe_2O_3 + MgO) / (Fe_2O_3 + MgO + K_2O + Na_2O)$$

Estos índices se utilizaron para crear cuadrángulos de alteración, los cuales varían para cada distrito y de acuerdo con la diversidad de las composiciones primarias. De esta manera, se construyó un cuadrángulo de alteración exclusiva para las rocas volcánicas de composición intermedia del Cretácico Tardío en el estado de Sonora ([Figura 27A](#)). En el eje X se localiza el índice AI y en el eje Y el índice CCPI. La línea punteada de estos diagramas separa dos campos de alteración, de la línea punteada hacia arriba se encuentra el campo de alteración hidrotermal y de la línea punteada hacia abajo se encuentra el campo de la diagénesis ([Gifkings et al., 2015](#)).

Como apoyo para el estudio petrográfico se graficaron las rocas volcánicas de la recopilación de datos y de las áreas de estudio; con el fin de observar los efectos producidos en la geoquímica por alteración.

CAPITULO 5 ESTUDIO GEOQUÍMICO DE LAS UNIDADES VOLCÁNICAS EN LAS REGIONES DE ESTUDIO

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

Tabla 2.- Geoquímica de los elementos mayores, traza y minerales normativos de las rocas representativas del vulcanismo del Cretácico Tardío en las regiones de estudio. La abreviatura mostrada en la tabla corresponde a: **A** andesita; **D** dacita

Localidad	Sierra El Chanate			Cerro Libertad					Cerros Colorados					
	SECH16-03	SECH16-03C	SECH16-02	CL15-01	CL15-02	CL15-32	CL15-33A	CL15-06	CC16-01	CC16-22	CC16-25	CC16-04	CC16-24	CC16-19
Muestra														
Mayores %														
Roca	D	A	A	A	A	A	A	D	A	A	A	A	A	A
SiO ₂	53.94	69.05	65.05	55.382	56.198	66.469	64.754	65.885	66.41	59.94	67.85	59.28	70.69	64.85
TiO ₂	1.16	0.255	0.759	0.867	0.877	0.557	0.586	0.55	0.972	0.928	0.825	1.019	0.422	0.552
Al ₂ O ₃	18.3	15.14	15.07	18.477	18.729	15.453	15.882	14.322	14.18	16.4	13.87	16.82	14.91	15.79
Fe ₂ O ₃	6.6	2.7	4.36	5.913	5.565	3.383	3.76	4.088	4.87	6.09	4.37	5.47	2.7	4.54
MnO	0.171	0.063	0.052	0.065	0.064	0.026	0.061	0.034	0.09	0.151	0.078	0.073	0.039	0.129
MgO	1.93	0.448	1.75	2.966	2.024	4.39	1.535	1.139	1.1	3.216	1.118	2.63	0.89	1.819
CaO	4.89	2.46	2.95	5.41	7.063	1.146	2.842	2.876	1.99	4.98	1.61	3.12	3.07	3.58
Na ₂ O	7.9	5.84	5.14	4.351	3.832	2.475	4.553	3.59	4.12	3.2	3.45	5.39	1.94	3.72
K ₂ O	0.19	1.11	3.16	1.314	1.856	0.363	2.177	2.315	4.53	2.54	4.6	2.92	2.94	3.04
P ₂ O ₅	0.506	0.138	0.265	0.368	0.375	0.238	0.245	0.221	0.221	0.195	0.193	0.358	0.075	0.128
BaO				0.107	3.3	0.039	0.197	0.471						
PXC	4.39	2.76	1.4	4.78	0.12	5.46	3.41	4.51	1.48	2.34	2.02	2.88	2.3	1.81
Suma	99.97	99.96	99.95	99.893	99.883	99.96	99.805	99.53	99.96	99.98	99.98	99.96	99.97	99.95
Trazas (PPM)														
Rb	5	26	46	23	36	4	54	42	166	89	167	59	113	93
Sr	516	650	1359	1003	1143	584	1042	530	331	665	274	1421	358	327
Ba	305	679	2017	985	1112	399	1751	4306	1013	1491	1010	1297	1018	1057
Y	20	12	13	20	21	10	13	12	43	25	45	20	32	21
Zr	179	137	210	239	254	180	191	171	294	204	320	273	297	122
Nb	14	9	<1	8	9	7	6	10	13	8	15	<1	10	9
V	131	45	91	96	101	102	57	58	80	157	69	116	27	74

CAPITULO 5 ESTUDIO GEOQUÍMICO DE LAS UNIDADES VOLCÁNICAS EN LAS REGIONES DE ESTUDIO

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

Cr	8	22	40	8	13	49	17	31	19	96	<2	5	2	7
Co	16	5	13	22	22	16	12	13	11	19	9	14	5	11
Ni	13	15	28	8	6	23	15	20	9	27	9	19	8	9
Cu	11	9	32	5	12	35	8	11	8	7	7	17	4	3
Zn	80	22	45	85	75	81	63	32	62	125	62	60	35	112
Th	3	5	4	3	3	4	5	6	10	13	10	5	17	17
Pb	14	9	18	11	13	2	20	15	18	22	17	9	9	16
Minerales normativos														
%AN	17.93	17.74	15.82	38.45	45.20	15.67	23.45	28.46	15.61	44.32	17.77	21.30	45.73	33.65
Q	0.00	24.00	14.54	8.57	9.33	41.99	21.31	28.15	18.93	14.84	24.42	6.20	39.34	19.70
or	1.15	6.71	18.91	8.14	11.41	2.27	13.34	14.57	27.44	15.51	28.16	17.62	18.24	18.46
ab	65.13	53.77	46.74	40.98	35.79	23.80	42.44	34.41	37.89	29.73	32.06	49.37	18.33	34.30
an	14.23	11.60	8.79	25.60	29.52	4.42	13.00	13.69	7.01	23.67	6.93	13.36	15.44	17.40
ne	4.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C	0.00	0.21	0.00	1.08	0.00	11.07	1.65	1.42	0.00	0.00	0.86	0.00	3.59	0.19
di	5.77	0.00	3.40	0.00	3.46	0.00	0.00	0.00	1.33	0.45	0.00	0.02	0.00	0.00
hy	0.00	1.27	3.62	11.03	5.81	12.96	4.66	4.24	2.92	11.46	3.48	8.57	2.58	6.73
wo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ol	3.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ac	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
mt	2.77	1.72	2.37	2.52	2.58	1.98	2.21	2.22	2.63	2.59	2.48	2.64	0.95	2.17
il	1.65	0.36	1.07	1.27	1.27	0.83	0.85	0.82	1.39	1.34	1.19	1.45	0.61	0.79
hem	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.74	0.00
ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ap	1.08	0.29	0.56	0.81	0.82	0.53	0.52	0.49	0.46	0.42	0.42	0.77	0.17	0.27

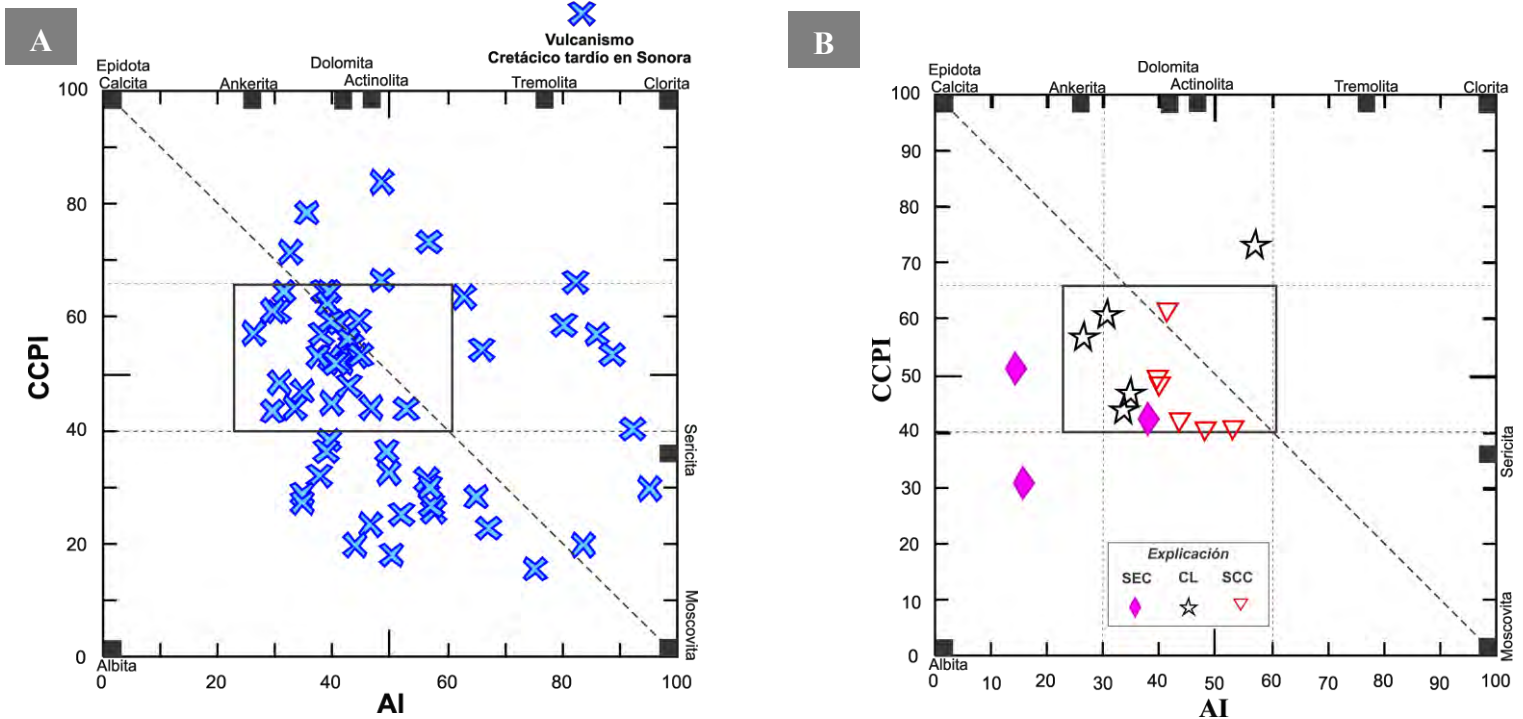


Figura 27.- Construcción de una caja con muestra de menor alteración. **A)** Caja de menor alteración para rocas volcánicas intermedias del Cretácico Tardío reportadas en Sonora. **B)** Caja de menor alteración para las regiones de estudio. **SEC** Sierra El Chanate; **CL** Cerro Libertad; **SCC** Sierra Los Cerros Colorados.

Una vez obtenido el cuadrángulo de menor alteración por medio de los datos de la literatura, se graficaron las muestras en estudio, donde la mayoría se localizan en el cuadrángulo de menor alteración (**Figura 27B**); esto no quiere decir que las muestras se encuentran libres de alteración, pero hasta cierto punto pueden ser confiables para el estudio geoquímico. De igual manera destacan las muestras que se salen de los límites del cuadrángulo de menor alteración; la muestra que se desliza de la línea punteada hacia arriba está afectada por alteración hidrotermal y las dos que se desplazan de la línea punteada hacia abajo presentan cierto grado de diagénesis (**Figura 27 A y B**).

De esta manera se pudieron verificar las tendencias de alteración que afectan a las rocas volcánicas en estudio, estos diagramas ayudan a confirmar las asociaciones de alteración definidas en el estudio petrográfico. Los diagramas sugieren que las rocas volcánicas del

Cretácico Tardío pertenecientes a la literatura muestras tendencias de componentes de alteración hidrotermal (Figura 28A).

Sin embargo, para las rocas volcánicas de las áreas de estudio se puede observar que una muestra perteneciente al área del Cerro Libertad presenta una tendencia de alteración con la formación de clorita-pirita-sericita (Figura 28B). Por el contrario, dos muestras de la Sierra El Chanate reflejan tendencias de alteración por diagénesis (Figura 28B). Por otro lado, fácilmente puede observarse que las muestras intensamente alteradas tienden a salir de la caja de menor alteración.

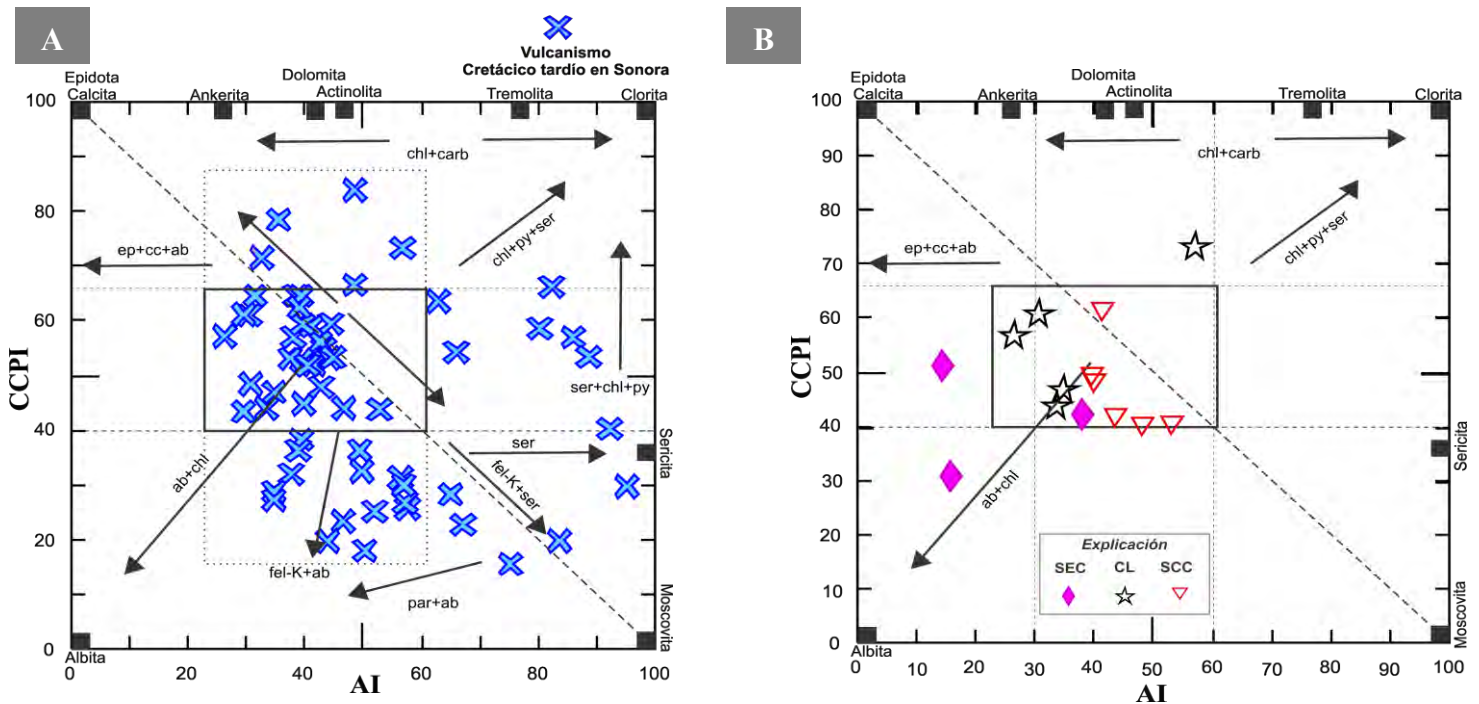


Figura 28.- Tendencias de alteración hidrotermal y diagenética. **A)** Tendencias de alteración del vulcanismo Cretácico Tardío en Sonora. **B)** Tendencias de alteración para las áreas de estudio. **SEC** Sierra El Chanate; **CL** Cerro Libertad; **SCC** Sierra Los Cerros Colorados.

Para verificar el grado de alteración que afecta a las rocas estudiadas, se construyó un segundo diagrama, el cual fue propuesto por Barrett y McLean, (1994a). Este diagrama representa la pérdida o ganancia de sodio en la alteración, ya que muchos estudios utilizan el agotamiento de este elemento como una guía de alteración. En este diagrama se graficaron las

rocas volcánicas reportadas del Cretácico Tardío para obtener la caja de menor alteración (Figura 29A). Una vez obtenida la caja, se graficaron las rocas de las regiones de estudio para verificar su grado de alteración (Figura 29B).

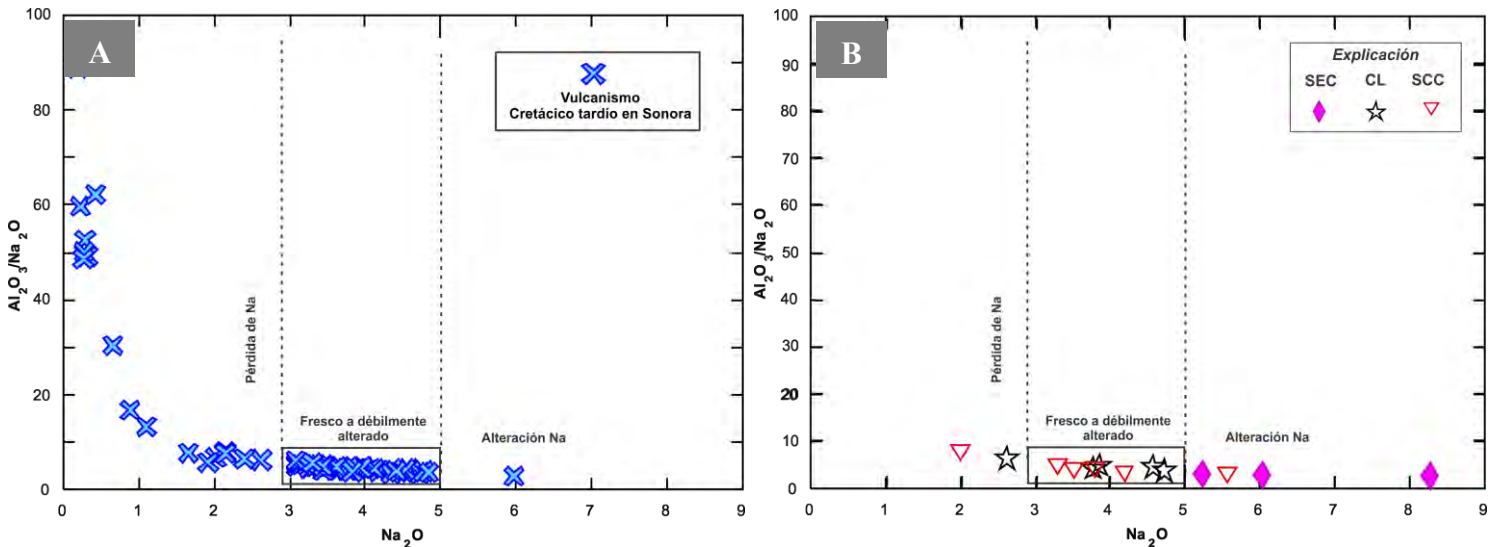


Figura 29.- Diagrama de alteración por pérdida o ganancia de sodio. **A)** Construcción de la caja de menor alteración para rocas del Cretácico Tardío en Sonora. **B)** Diagrama por pérdida o ganancia de sodio para las rocas en estudio. **SEC** Sierra El Chanate; **CL** Cerro Libertad; **SCC** Sierra Los Cerros Colorados.

Por un lado, las muestras reportadas en la literatura muestran principalmente una pérdida de sodio, al igual que dos muestras estudiadas, una de la Sierra Los Cerros Colorados y, otra del Cerro Libertad. Esto se atribuye a una alteración hidrotermal que afecta a las plagioclasas y lixivía al sodio. Por otra parte cuatro muestras estudiadas, tres de la Sierra El Chanate y una de la Sierra Los Cerros Colorados, presentan incremento de sodio debido a la alteración a albita, lo cual refleja los efectos del sepultamiento de escala regional para estas rocas (Figura 29B).

5.3 Movilidad de los elementos

Los estudios sobre la movilidad de elementos durante la alteración y el metamorfismo regional revelan que diferentes elementos tienen diferentes grados de movilidad (Winchester y Floyd, 1976). Los elementos mayores se utilizan para clasificar las rocas volcánicas en términos petrogenéticos y de configuración tectónica. Sin embargo, el mismo método no es aplicable para rocas alteradas por lo que muchos de los elementos mayores (Si, Fe, Mg, Ca, Na y K) son relativamente móviles durante la alteración. Varios elementos son químicamente inmóviles durante la mayoría de los tipos de alteración y pueden ser utilizados de manera confiable. Durante la alteración Ti, Zr, Nb e Y son relativamente inmóviles. También han sido documentados otros elementos inmóviles incluso en zonas hidrotermales más intensas: Al, Lu, Yb, Hf, Ta y Th. El Ti y Zr son los elementos más confiables de los inmóviles (Gifkins et al., 2005). Es importante evaluar los efectos de la alteración en las muestras analizadas y así elegir las más confiables antes de interpretar los resultados analíticos. Para analizar la movilidad de los elementos durante la alteración hidrotermal y el metamorfismo regional es importante estudiar la correlación entre los elementos de interés y un elemento inmóvil como el Zr (Basta et al., 2011; Polat et al., 2007). En los diagramas de Zr vs. MgO, Al₂O₃, CaO, Fe₂O₃, K₂O y TiO₂ (Figura 30), para los datos recabados en la literatura de rocas volcánicas del Cretácico Tardío en Sonora, se identificó que ciertas muestras mantienen una correlación sistemática consistente con una movilidad relativamente baja de elementos mayores, de esta manera las muestras que no mantenían correlación se eliminaron de los gráficos. De igual forma para las muestras recabadas en la literatura se graficó Zr vs. Nb, Ba, Rb, La, Co, V, Yb y Ni (Figura 31) para identificar las muestras que presentan menor movilidad de elementos traza. De la misma manera, se evaluó la movilidad de elementos mayores y elementos traza, para las muestras analizadas en este estudio (Figuras 32 y 33). Las muestras que presentaron mayor movilidad fueron eliminadas de los gráficos, manteniendo así las que presentan cierta correlación. De este modo se eligieron las muestras que presentan menos movilidad para utilizarlas en el estudio geoquímico de las regiones en estudio.

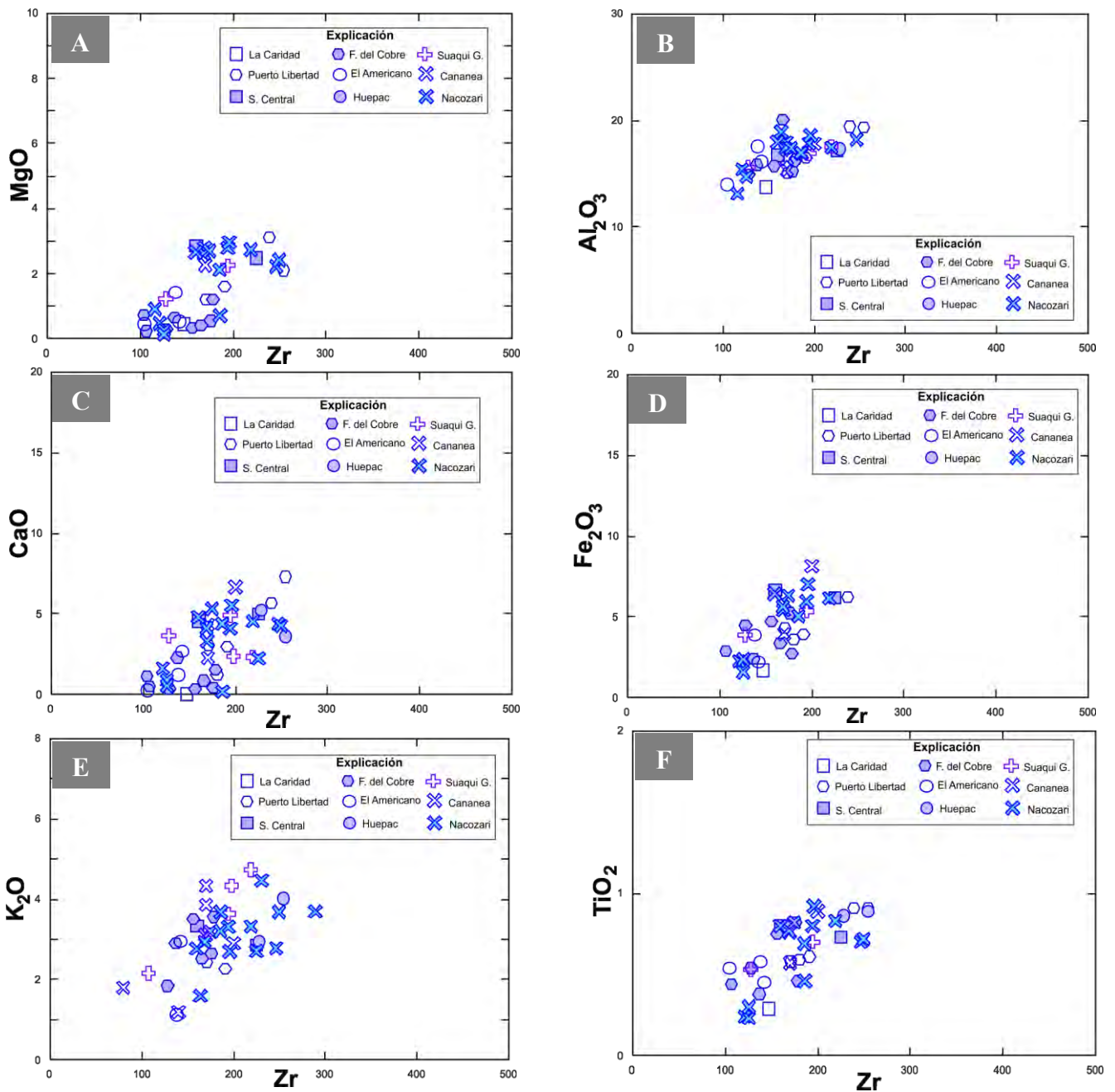


Figura 30.- (A-F) Diagramas de variación de elementos mayores seleccionados vs. circonio. El diagrama de Zr vs. Na₂O no mostró correlación, lo que sugiere que se comportó de manera móvil durante la alteración, por lo que no se incluyó en la figura. Los datos graficados pertenecen a la literatura recabada.

CAPITULO 5 ESTUDIO GEOQUÍMICO DE LAS UNIDADES VOLCÁNICAS EN LAS REGIONES DE ESTUDIO
García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

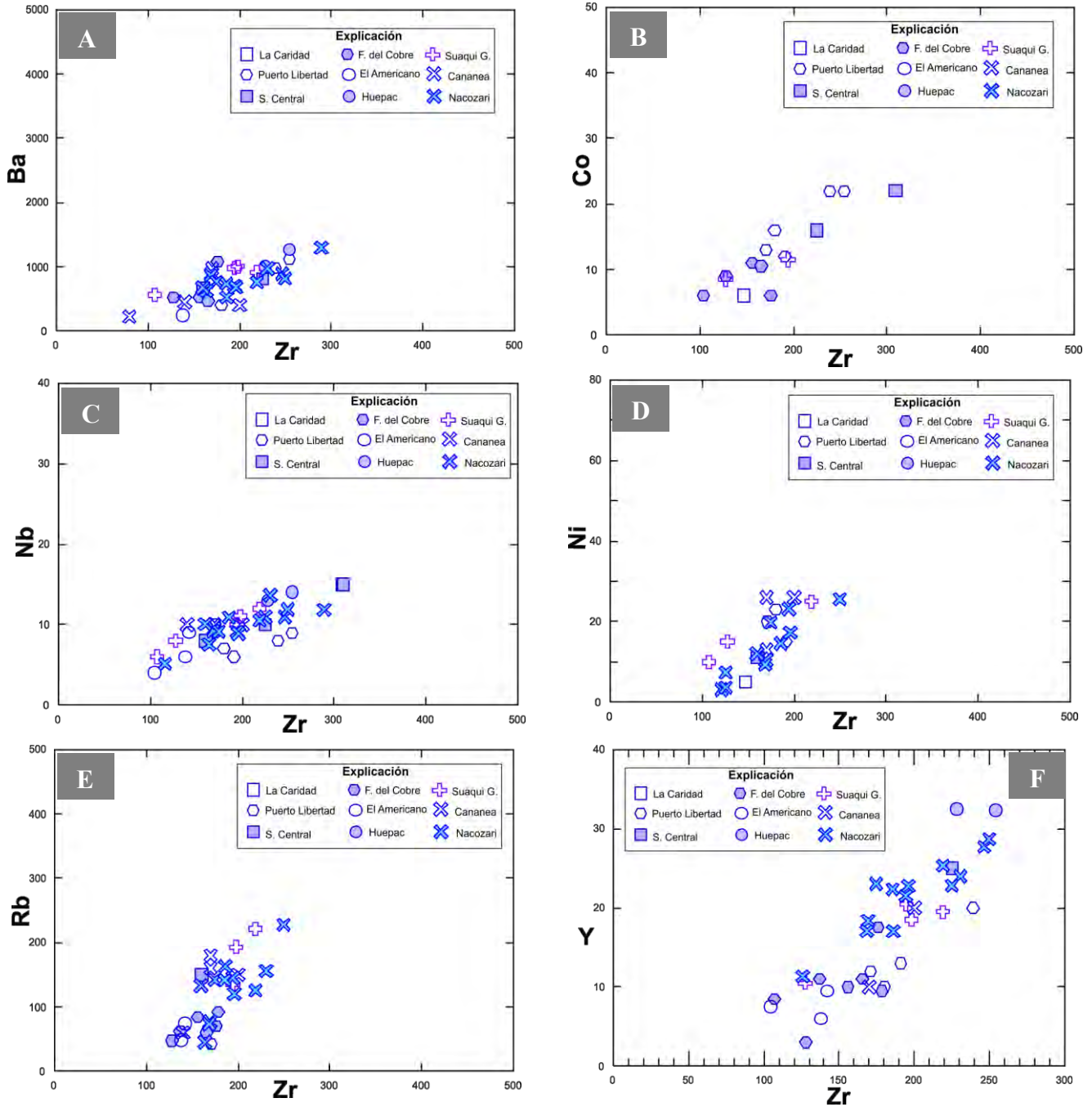


Figura 31.- (A-F) Diagramas de variación de elementos traza seleccionados vs. circonio. Los datos graficados pertenecen a la literatura recabada.

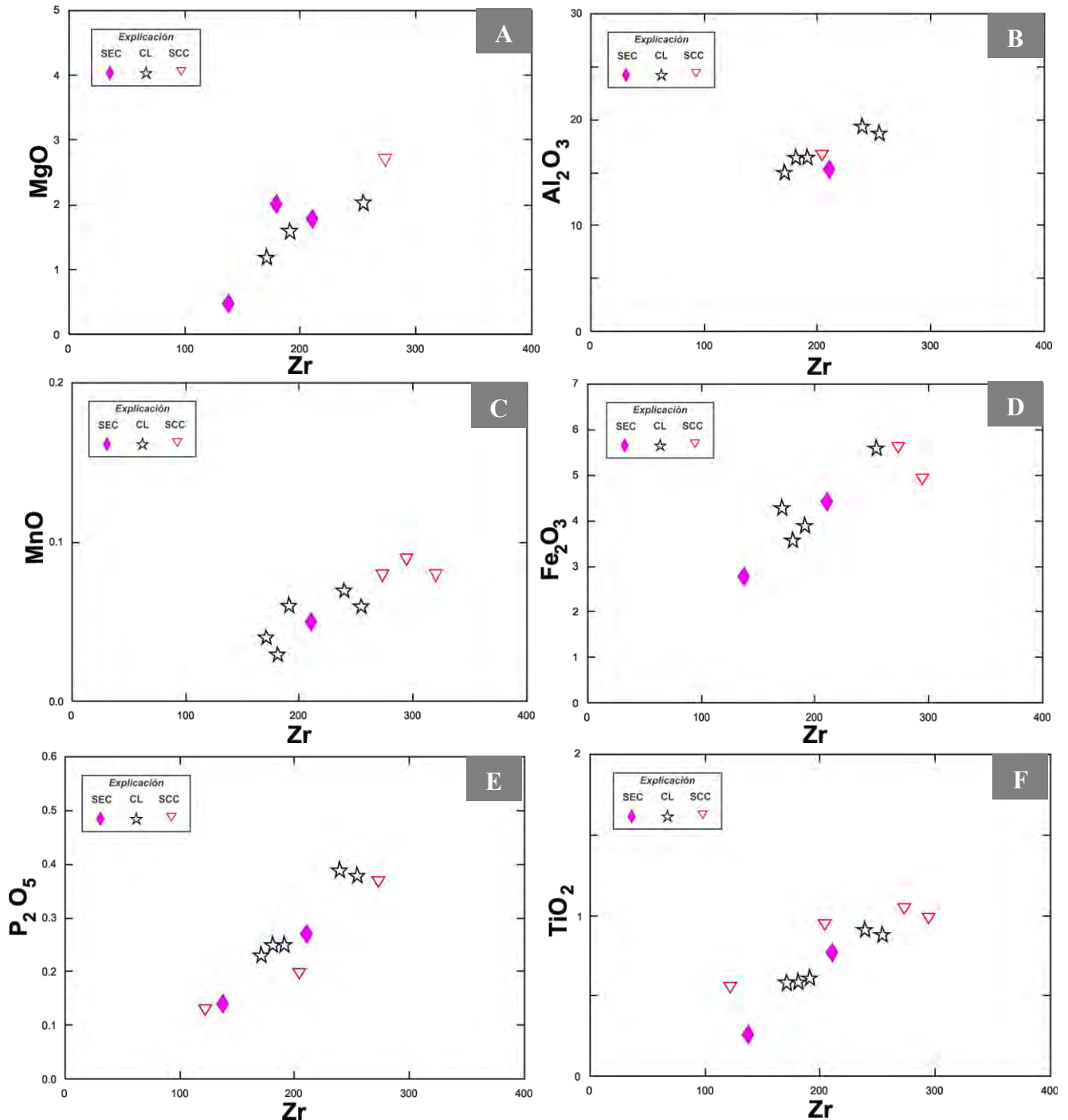


Figura 32.- (A-F) Diagramas de variación de elementos mayores seleccionados vs. circonio. El diagrama de Zr vs. Na₂O no mostró correlación lo que sugiere que se comportó de manera móvil durante la alteración, por lo que no se incluyó en la figura. Los datos graficados pertenecen a las áreas de estudio de esta investigación. **SEC** Sierra El Chanate; **CL** Cerro Libertad; **SCC** Sierra Los Cerros Colorados.

CAPITULO 5 ESTUDIO GEOQUÍMICO DE LAS UNIDADES VOLCÁNICAS EN LAS REGIONES DE ESTUDIO
 García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

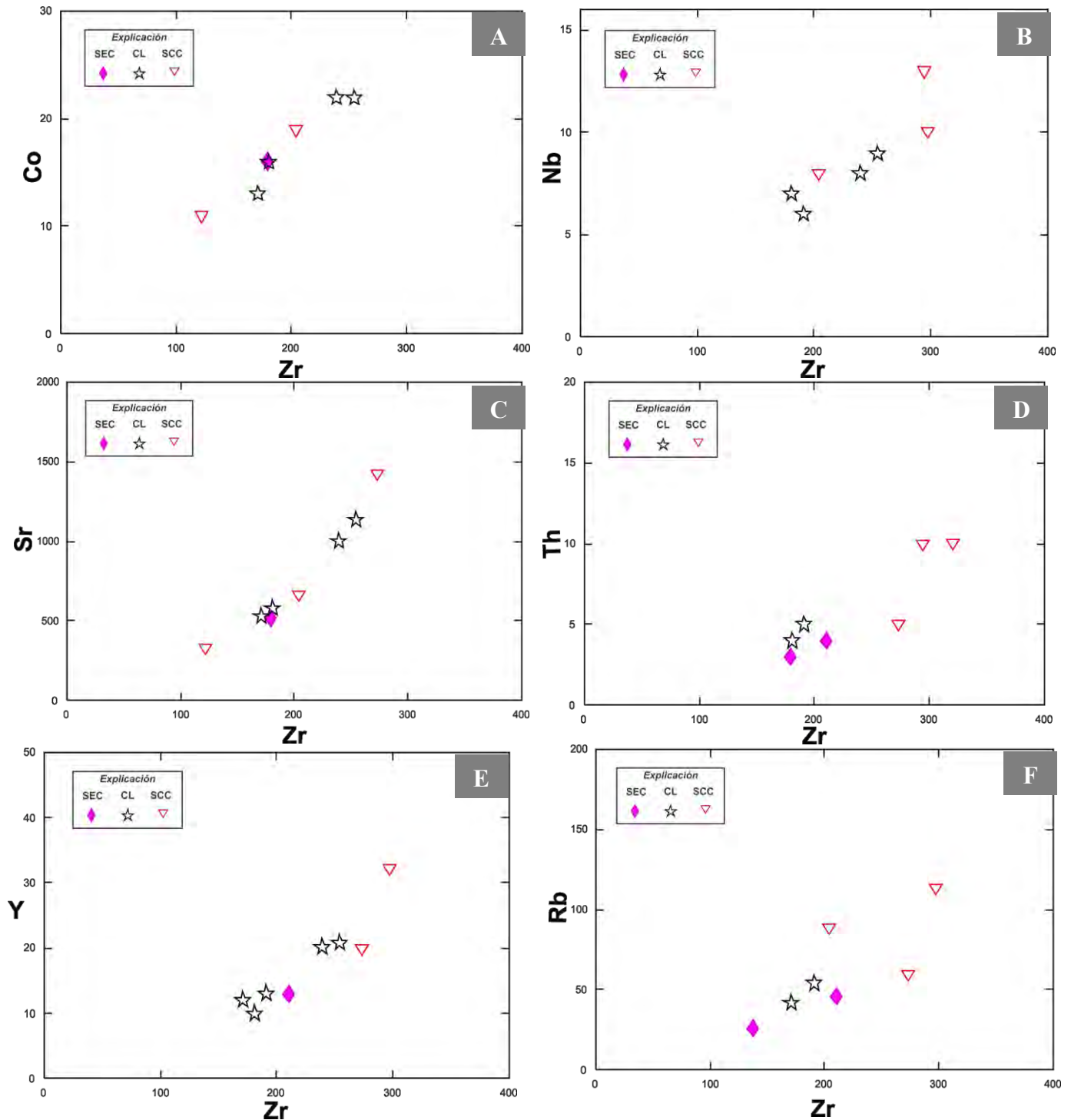


Figura 33.- (A-F) Diagramas de variación de elementos traza seleccionados vs. circonio. Los datos graficados pertenecen a las áreas de estudio de esta investigación. SEC Sierra El Chanate; CL Cerro Libertad; SCC Sierra Los Cerros Colorados.

Por último, para observar geoquímicamente las muestras que contienen un menor grado de alteración; se graficaron mediante el diagrama propuesto por Barrett y McLean (1994a) en donde las rocas que son menos alteradas se representan con puntos negros y así mismo definen una curva de fraccionamiento magmático (Figura 34).

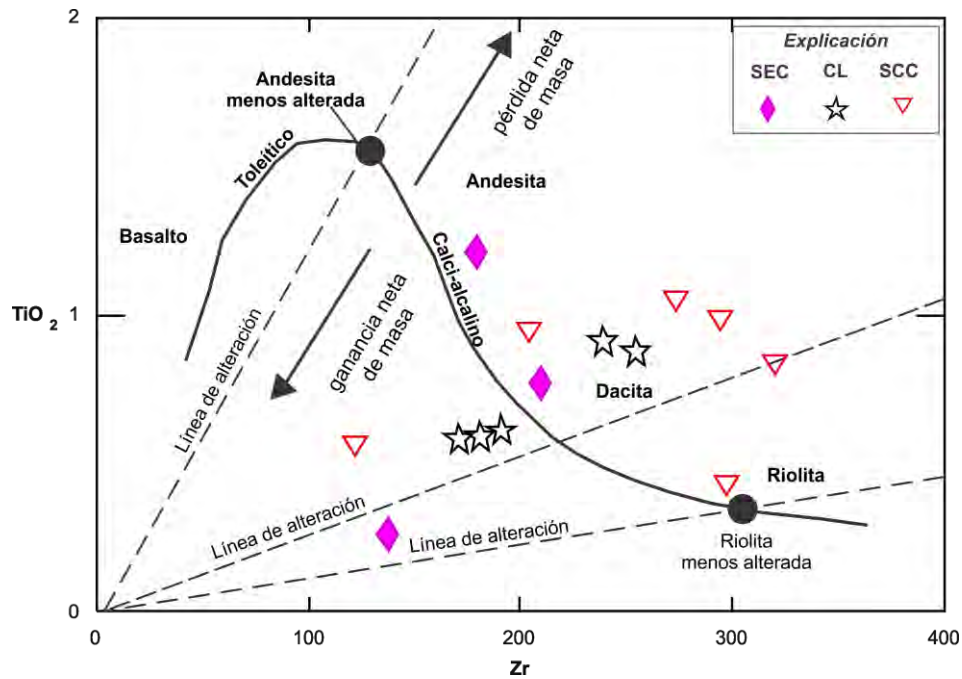


Figura 34.- Diagrama de inmóviles durante la alteración (Barrett y McLean, 1994a). SEC Sierra El Chanate; CL Cerro Libertad; SCC Sierra Los Cerros Colorados.

Las muestras que quedan por debajo de la curva de fraccionamiento presentan ganancia neta de masa debido a que reflejan alteración de sodio; por el contrario, las muestras por arriba de la curva de fraccionamiento presentan pérdidas netas de masa debido a lixiviación. De esta manera, y con base en los diagramas de alteración y movilidad de los elementos se identificaron las muestras: SECH16-02, CL15-01, CL15-33A, CL15-06, CC16-22 y CC16-24 como las más confiables para trabajar en el estudio geoquímico.

5.4 Características geoquímicas del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de estudio a partir de elementos traza y de tierras raras.

El cálculo de la norma CIPW (Tabla 3) de los análisis geoquímicos en estos grupos petrológicos muestran abundancia en cuarzo normativo, lo que refleja saturación en sílice. Sin embargo, de acuerdo al estudio petrográfico, en conjunto con la evaluación de la alteración, esta abundancia de cuarzo corresponde a la silicificación que presentan estas muestras. Este cálculo de minerales virtuales también refleja que las muestras correspondientes al vulcanismo del Cretácico Tardío se encuentran afectadas por cierto grado de alteración. Además, la marcada presencia de magnetita, ilmenita y hematita sugiere un gran contenido de minerales opacos lo cual es congruente con la mineralogía vista en el estudio petrográfico.

5.4.1 Clasificación

Debido a la casi omnipresente alteración de las rocas volcánicas estudiadas, es útil utilizar diagramas de elementos inmóviles para reemplazar los diagramas convencionales para la clasificación y el manejo de datos. En la actualidad, se puede usar al menos un diagrama Zr/TiO_2 vs. Nb/Y (Winchester y Floyd, 1976) para reemplazar el diagrama de sílice vs. álcalis totales (TAS). Sin embargo, no existe un elemento inmóvil equivalente para el diagrama de Peccerillo & Taylor (1976) K_2O vs. SiO_2 que se utiliza para clasificar las lavas de arco volcánico. Para lograr esto, un elemento inmóvil debe replicar la incompatibilidad del K_2O en donde el Th es el más indicado. El elemento inmóvil para SiO_2 debe replicar su cambio constante de composiciones básicas a ácidas, ningún elemento o relaciones de elementos compatibles logran esto. Sin embargo, el elemento ligeramente compatible Co proporciona una buena aproximación y tiene algunas ventajas sobre Zr/TiO_2 , siendo menos afectada por la acumulación de óxido de Fe-Ti y la cristalización de circonio (Hastie et al., 2007). Los datos analizados por Hastie et al., (2007), demuestran que el diagrama Th vs. Co (Figura 35) puede ser utilizado con un 80% de probabilidad de éxito para clasificar rocas volcánicas; aun así, al igual que con otros diagramas los límites de clasificación no son absolutos. De esta manera el

diagrama Th vs. Co proporciona una proyección potencialmente útil para clasificar lavas alteradas de arco volcánico. Por lo que este diagrama sugiere que las rocas en estudio se clasifican como andesitas, una muestra de la Sierra los Cerros Colorados se clasifica como traquita y algunas muestras de las áreas de estudio quedan cerca del límite de clasificación dacita-riolita-latita-traquita.

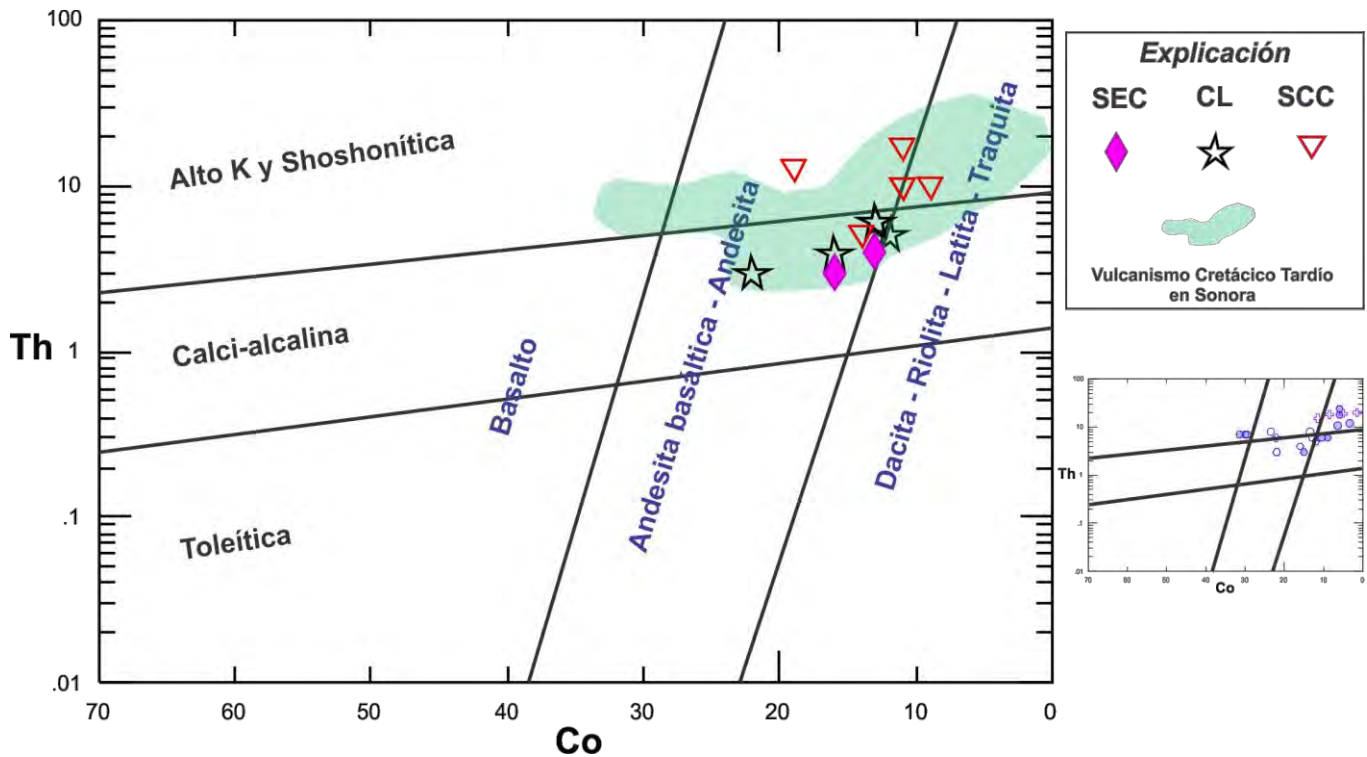


Figura 35.- Diagrama de discriminación Th vs. Co (Hastie et al., 2007). SEC Sierra El Chanate; CL Cerro Libertad; SCC Sierra Los Cerros Colorados. En el diagrama de la derecha se encuentran graficadas las rocas volcánicas del Cretácico Tardío en Sonora.

Para tratar de dar más precisión a la clasificación de estas rocas se utilizó el diagrama de Zr/TiO_2 vs. Nb/Y (Winchester y Floyd, 1976; Figura 36), en donde se eliminaron las muestras que presentan mayor movilidad en los elementos involucrados en el diagrama y se dejaron las que presentan menos movilidad. Mediante este diagrama se precisa aún más en la clasificación de estas rocas en donde sí se puede diferenciar entre andesita basáltica y andesita, por lo que las rocas de las áreas de estudio se clasifican como andesitas, algunas en los límites

de dacita. Sin embargo, en este diagrama dos muestras del Cerro Libertad se clasifican como dacitas (Figura 36).

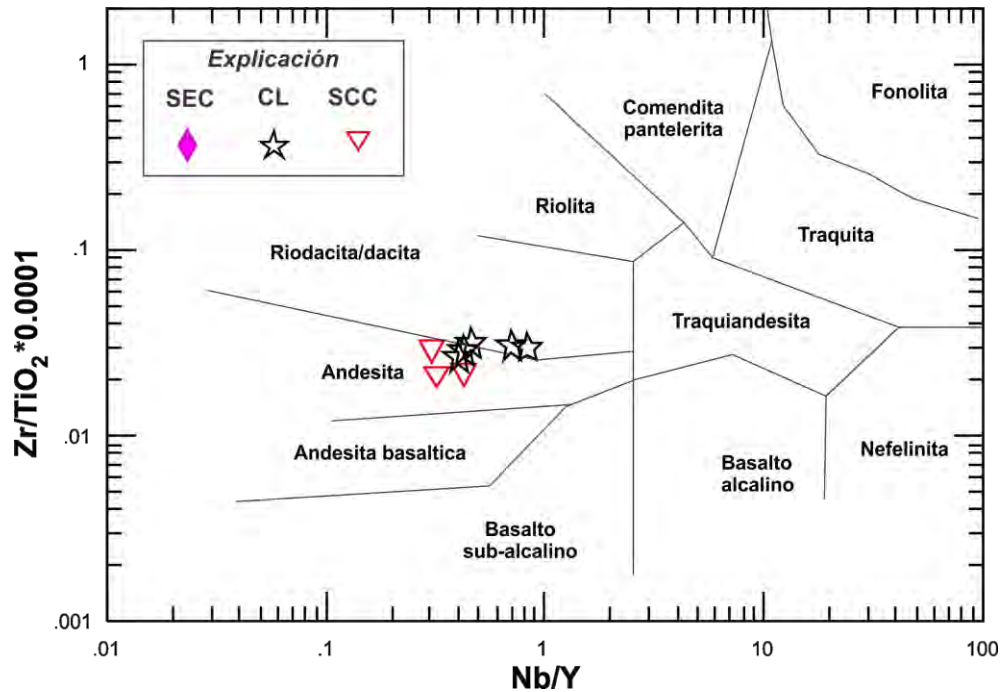


Figura 36.- Diagrama de clasificación de Winchester y Floyd (1976) aplicado a las rocas volcánicas en estudio. SEC Sierra El Chanate; CL Cerro Libertad; SCC Sierra Los Cerros Colorados.

5.4.2 Afinidad magmática

Para comprobar la afinidad magmática del vulcanismo del Cretácico Tardío en Sonora, así como en las regiones de estudio se utilizó el diagrama de elementos inmóviles Y vs. Zr (Figura 37) propuesto por Barret y McLean (1994), en donde los cocientes de Y/Zr producen tendencias lineales que varían según la afinidad magmática. Este diagrama está diseñado para utilizarlo en rocas volcánicas alteradas hidrotermalmente, aún así, para utilizar este diagrama se eliminaron las muestras que presentan mayor movilidad en Y. De esta manera se puede comprobar que los datos de las rocas analizadas en la literatura, así como las de las regiones en estudio pertenecen a una serie magmática calci-alcalina (Figura 37).

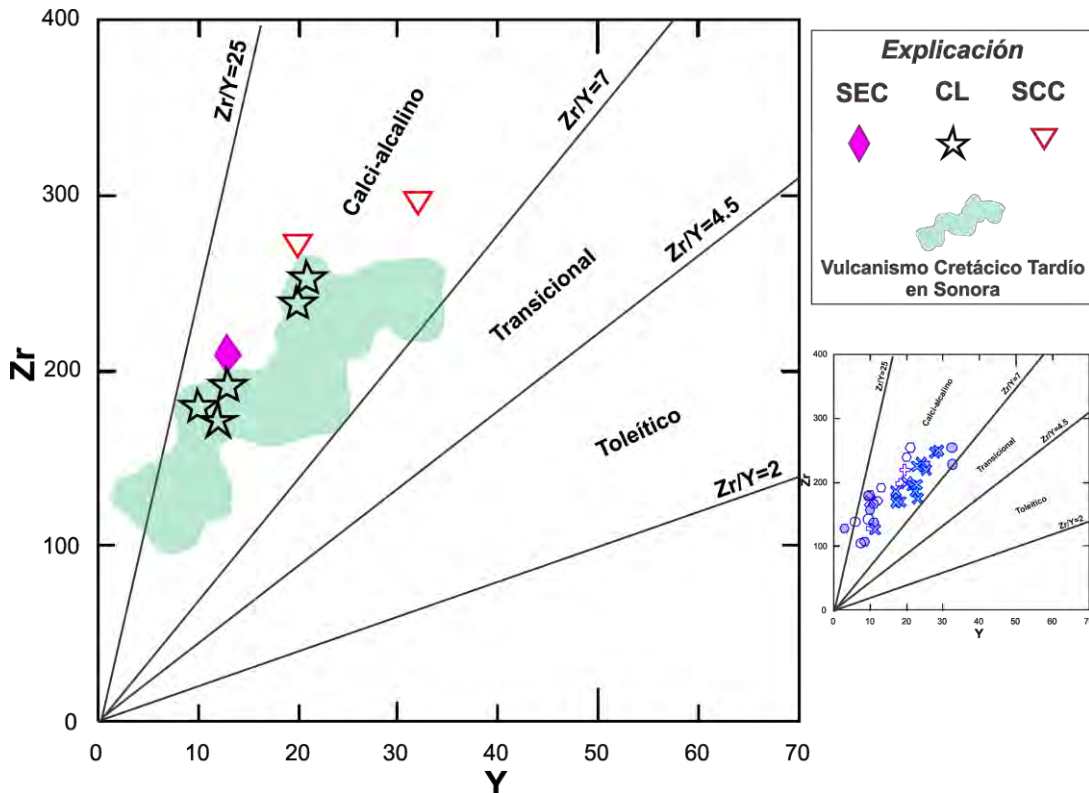


Figura 37.- Diagrama esquemático Y vs. Zr propuesto por Barret y McLean (1994), utilizado para la determinación de afinidades magmáticas en rocas volcánicas alteradas. SEC Sierra El Chanate, CL Cerro Libertad, SCC Sierra Los Cerros Colorados.

Se ha reportado la presencia de magmatismo adakítico (Gómez-Valencia, 2014; Gómez-Valencia et al., 2015) para las rocas del arco volcánico Oligoceno-Mioceno correspondiente a las etapas finales de la subducción de la placa Farallón debajo de la placa Norteamericana en Sonora. De esta manera, para saber si las unidades magmáticas cretácicas son francamente calci-alcalinas o presentan pulsos magmáticos adakíticos, se parte de esta información y también de acuerdo a los trabajos propuestos por Defant y Drummond (1990) y Martin et al., (2005). Por lo que las muestras de la literatura, así como las analizadas en este estudio se graficaron en las Figuras 38 A y B. La mayoría de las muestras estudiadas se encuentran dentro del campo de los magmas calci-alcalinos. Sin embargo, y principalmente en la Figura 38A, algunas de las muestras quedan dentro del campo de las adakititas; esto debido al enriquecimiento de Sr/Y, lo que también refleja la profundidad de fusión e incorporación de la

plagioclasa, ya que este mineral se convierte en inestable por el aumento de presión y consecuentemente se libera Sr.

Por otra parte, en la **Figura 38B** los altos valores de La/Yb definen afinidades adakíticas. Sin embargo, las muestras clasificadas como adakitas quedan cerca del campo en donde se sobreponen las composiciones calci-alcalinas, por lo que probablemente representan una transición entre magmatismo calci-alcálido y magmatismo adakítico.

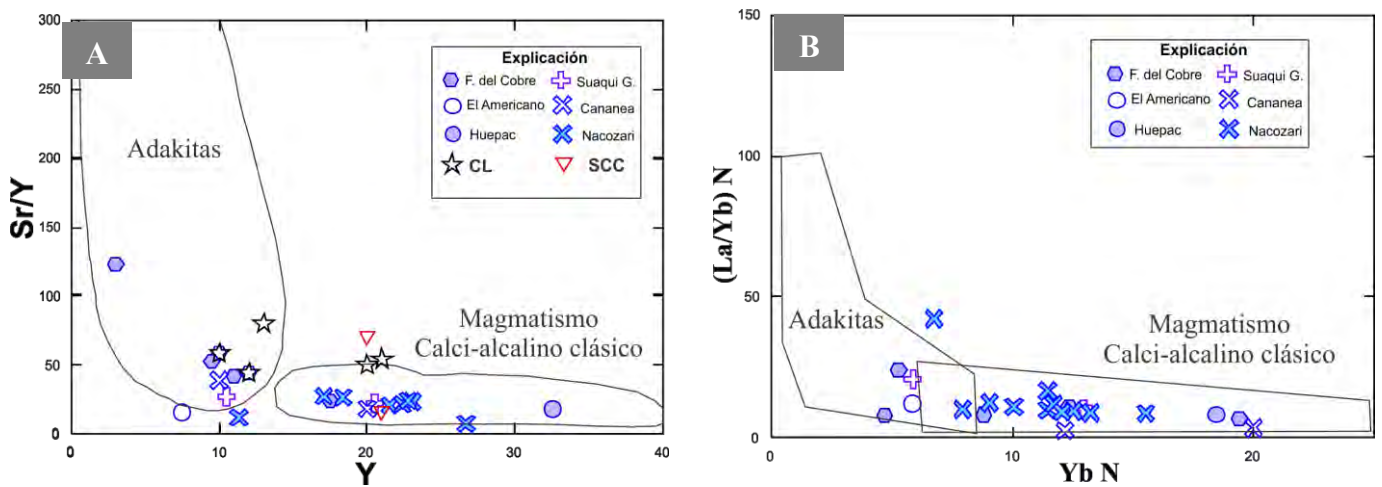


Figura 38.- (A) Diagrama de Y vs. Sr/Y (Defant y Drummond, 1990) y (B) Diagrama Yb N vs. (La/Yb) N (Martin et al., 2005). N denota normalizado a condrita (Sun y McDonough, 1989). CL Cerro Libertad; SCC Sierra Los Cerros Colorados.

Las muestras descritas en los diagramas anteriores, fueron interpretadas en diagramas de multielementos, los elementos fueron ordenados de acuerdo a su nivel de movilidad y compatibilidad con el objeto de observar su comportamiento con respecto a un material de referencia que es el MORB (Pearce, 1983; Figura 39). Se observa que, en general, el patrón de los elementos es relativamente homogéneo en todas las rocas, caracterizado por un enriquecimiento de elementos móviles (Rb y Ba) con respecto a los elementos inmóviles (Y, Zr, Nb y Ta). El enriquecimiento de los LILE con respecto a los HFSE, y las anomalías negativas de Nb-Ta, exhiben un típico patrón de magmatismo de arco volcánico (Best, 2003), asociado a un ambiente de subducción (Wilson, 1989). Es importante destacar que estas rocas, al ser diferenciadas, no evidencian necesariamente características de la fuente sino de los procesos de diferenciación posteriores.

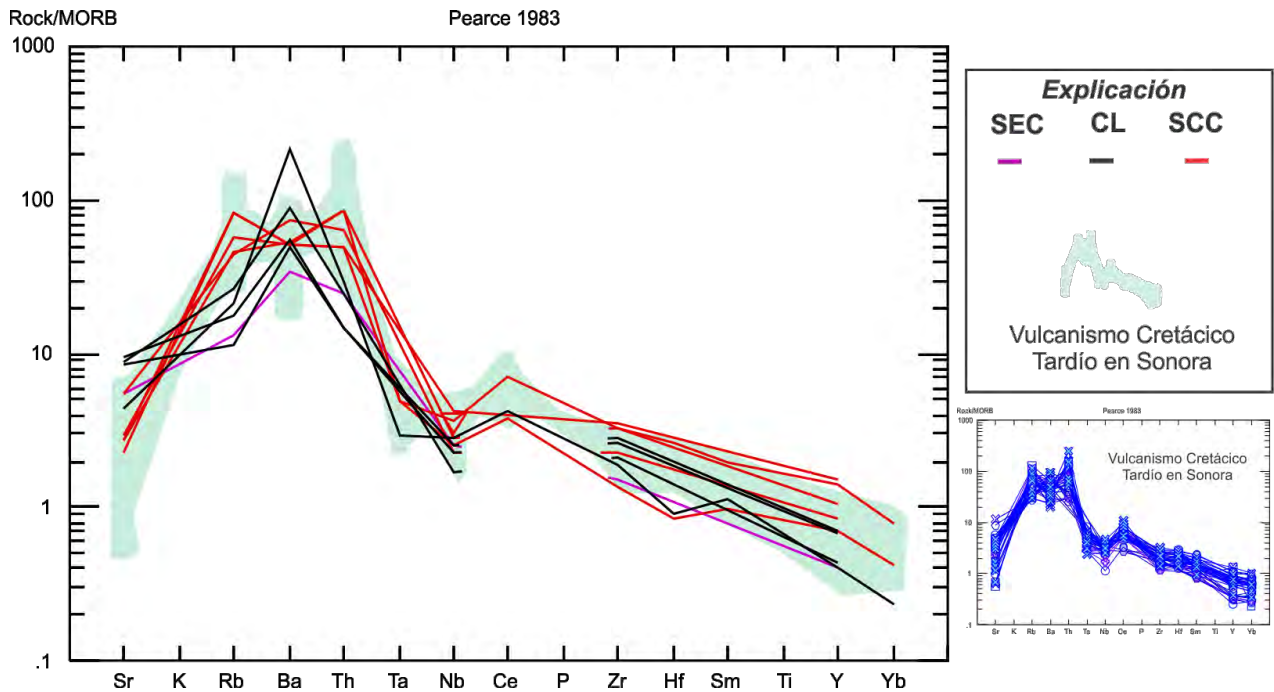


Figura 39.- Diagrama multielementos normalizado a MORB (Pearce, 1983) para las rocas volcánicas Cretácicas en estudio. SEC Sierra El Chanate, CL Cerro Libertad, SCC Sierra Los Cerros Colorados. En el diagrama de la derecha se encuentran graficadas las rocas volcánicas del Cretácico Tardío en Sonora.

5.4.3 Contexto tectónico

Para confirmar el contexto tectónico de las rocas volcánicas en estudio, se analizaron mediante el diagrama Zr vs. Zr/Y (Pearce y Norry, 1979; Figura 40), ya que este diagrama contiene dos campos que reflejan el cambio de arcos de islas (dominados por clinopiroxeno) a arcos de tipo andino (dominados por anfíbol-biotita). Estos métodos pueden aplicarse a lavas alteradas de afinidades desconocidas para proporcionar información adicional sobre su génesis y entorno eruptivo (Pearce y Norry, 1979). Este diagrama las rocas en estudio quedan dentro del campo de rocas volcánicas de arco continental. Sin embargo, por la alta concentración de Zr y por ende el alto valor de Zr/Y algunas muestras se salen de la zona marcada, lo cual es el resultado de la cristalización fraccionada (Pearce y Norry, 1979).

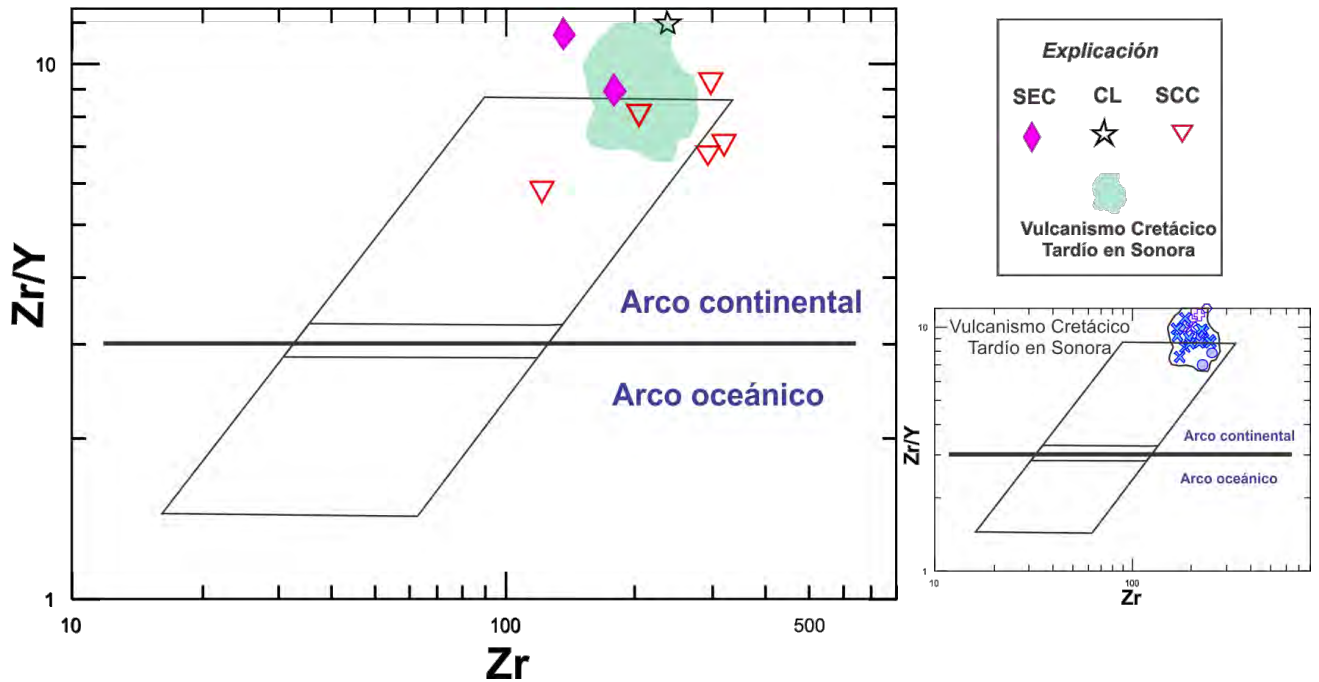


Figura 40.- Diagrama de discriminación Zr vs. Zr/Y para rocas volcánicas (Pearce y Norry, 1979). SEC Sierra El Chanate; CL Cerro Libertad; SCC Sierra Los Cerros Colorados. En el diagrama de la derecha se encuentran graficadas las rocas volcánicas del Cretácico Tardío en Sonora.

Considerando las características de arco continental señaladas en la Figura 40, se utilizó un diagrama discriminante de tendencias magmáticas orogénicas vs. anorogénicas del Paleógeno tardío – Neógeno temprano en Sonora (Gómez-Valencia, 2014), en donde se graficó el elemento traza móvil Sr con respecto a la concentración de TiO₂ y el elemento inmóvil Y (Figura 41). De esta manera el vulcanismo del Cretácico Tardío presenta una tendencia parecida al magmatismo del Paleógeno tardío – Neógeno temprano de Sonora. De igual forma las rocas de las áreas de estudio graficadas en este diagrama corresponden a un enriquecimiento en Sr, lo que sugiere una tendencia regularmente detectada en los magmas orogénicos de arco continental. Esta comparación permite observar que existe una identidad química en las rocas orogénicas del Cretácico Tardío.

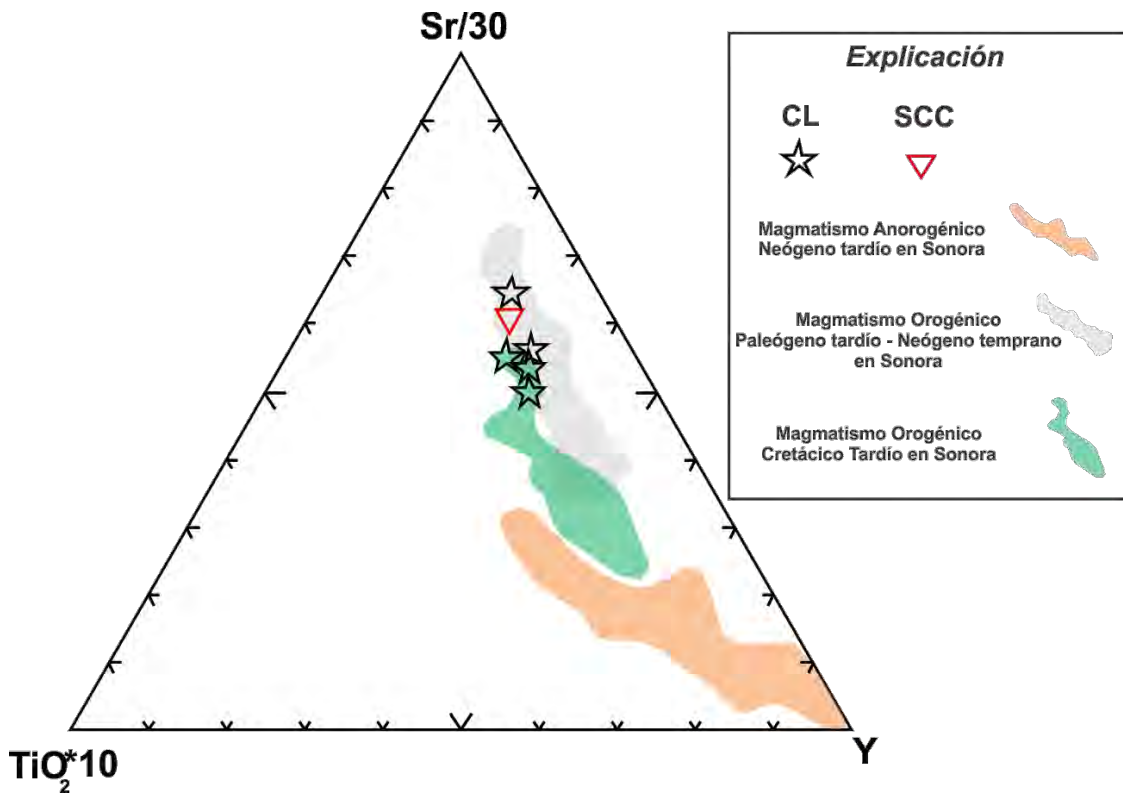


Figura 41.- Diagrama ternario TiO_2 , Sr/30 e Y (modificado de Gómez-Valencia, 2014), que sirve como discriminante entre las dos principales tendencias magmáticas reconocidas para el magmatismo Paleógeno tardío – Neógeno temprano en Sonora, así como también muestra una tendencia orogénica para el vulcanismo Cretácico Tardío de Sonora. CL Cerro Libertad; SCC Sierra Los Cerros Colorados.

5.4.4 Características petrogenéticas

Como una aproximación a los procesos que dieron origen a las rocas volcánicas del Cretácico Tardío en Sonora y en las regiones de estudio, las características mencionadas por los diagramas anteriores sugieren que estas rocas evolucionaron predominantemente por cristalización fraccionada; esta idea es apoyada por el diagrama de Cr vs. Ni (Figura 42), propuesto por Yang et al. (2008) para cristalización fraccionada a partir coeficientes de partición de un magma basáltico y de un magma andesítico. Las tendencias reflejadas sugieren que en el Cretácico la cristalización fraccionada de anfíbol y clinopiroxeno pudo haber sido importante para la diferenciación de los magmas a partir de un magma original.

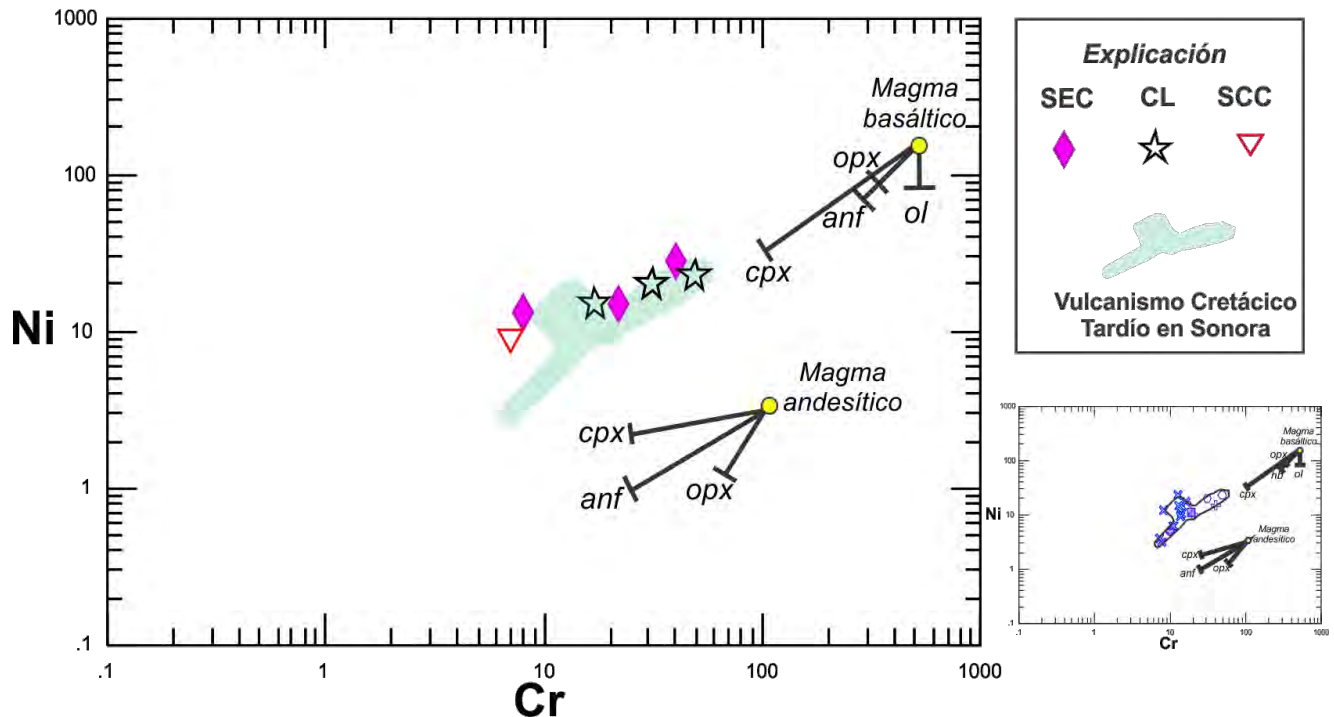


Figura 42.- Diagrama esquemático Cr vs. Ni de cristalización fraccionada para un magma basáltico y un magma andesítico (Yang et al., 2008). SEC Sierra El Chanate, CL Cerro Libertad, SCC Sierra Los Cerros Colorados. En el diagrama de la derecha se encuentran graficadas las rocas volcánicas del Cretácico Tardío en Sonora.

Por otra parte, es importante evaluar si las rocas volcánicas cretácicas estudiadas han sufrido contaminación cortical, ya que estas lavas intermedias pudieron haber residido en cámaras magmáticas antes de la erupción y por tanto tendrían oportunidad de interactuar con la corteza continental. Las anomalías negativas de Nb (Figura 39) sugieren la participación de materiales de la corteza y contaminación cortical. Además, en la Figura 43 se muestra un índice útil para diferenciar entre el fraccionamiento de cristales y la contaminación cortical, utilizando relaciones de elementos traza como Nb/Y frente a Rb/Y (Chazot y Bertrand, 1995). En dicho diagrama, las composiciones corticales y los fundidos de la corteza se distinguen por altas relaciones Rb/Nb (>1) (Chazot y Bertrand, 1995). En el diagrama Nb/Y vs. Rb/Y, la mayoría de las lavas cretácicas, con excepción de una muestra tienen relaciones Rb/Nb (>3) muy altas y quedan relativamente cerca de los valores de corteza inferior y superior (Rudnick y Fountain, 1995).

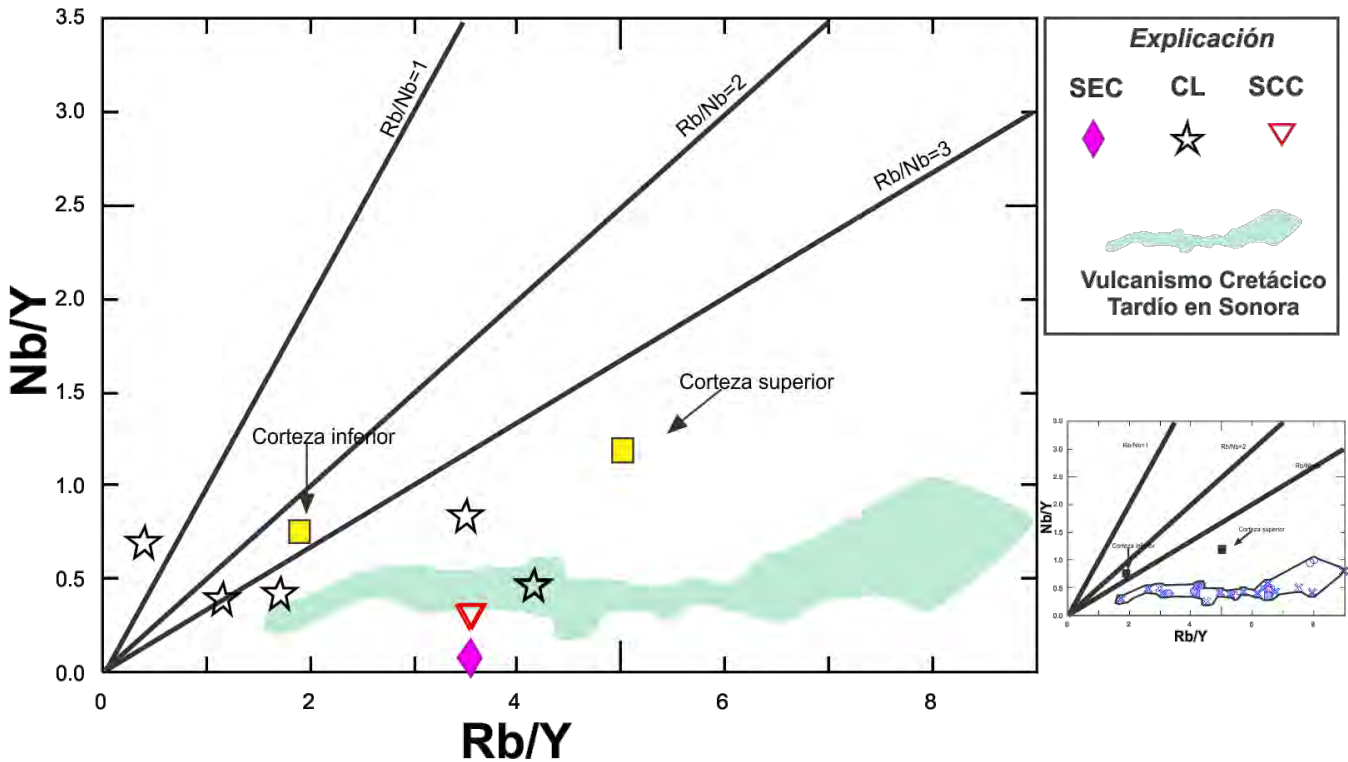


Figura 43.- Diagrama Nb/Y vs. Rb/Y para las rocas volcánicas cretácicas de Sonora y de las áreas de estudio (modificado de Chazot y Bertrand, 1995; El-Bialy, 2009). Las composiciones de la corteza superior e inferior son de Rudnick y Fountain (1995). SEC Sierra El Chanate, CL Cerro Libertad, SCC Sierra Los Cerros Colorados. En el diagrama de la derecha se encuentran graficadas las rocas volcánicas del Cretácico Tardío en Sonora.

Las posibles contribuciones de la corteza a la composición del magma, por ejemplo, proceso de asimilación-cristalización fraccionada (AFC) (De Paolo, 1981), así como fenómenos de contaminación cortical, se puede analizar utilizando las relaciones elementales Th/Nb frente a Zr (Figura 44). En este diagrama se traza una relación LILE/HFSE (Th/Nb), que no debe verse afectada significativamente por la cristalización fraccionada, contra un elemento traza incompatible (Zr) cuya abundancia aumenta a medida que aumenta el fraccionamiento. Este diagrama permite distinguir entre las evoluciones magmáticas controladas por la simple cristalización fraccionada en sistemas cerrados, que producirán una tendencia casi horizontal con un fraccionamiento creciente y las influenciadas por procesos adicionales. Algunas rocas volcánicas cretácicas definen tendencias caracterizadas por

relaciones elementales Th/Nb bastante elevadas, así como tendencias no tan elevadas, lo que implica que la cristalización fraccionada (FC) y la asimilación-cristalización fraccionada (AFC) han jugado un papel importante durante la evolución magmática del vulcanismo del Cretácico Tardío en las regiones de estudio. Por lo que muy probablemente la asimilación cortical está superpuesta al fraccionamiento de cristales en la evolución magmática de estas rocas.

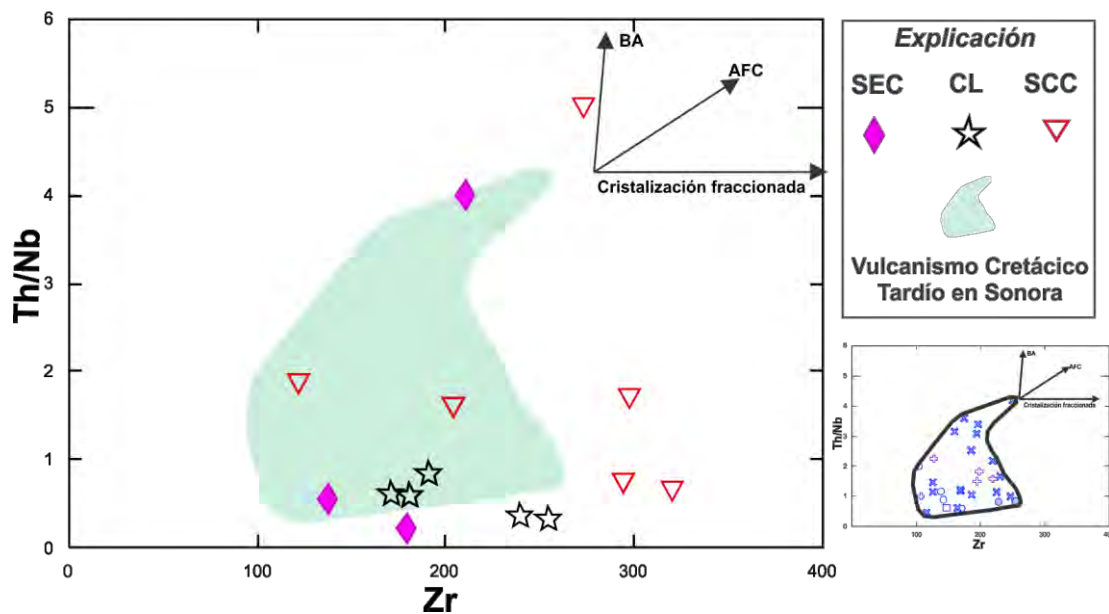


Figura 44.- Diagrama Zr vs. Th/Nb para las rocas volcánicas calci-alcálicas cretácicas de Sonora y de las regiones en estudio. Las tendencias esquemáticas que reflejan la creciente cristalización fraccionada (FC), asimilación-cristalización fraccionada (AFC) y asimilación de la corteza (BA) son de Nicolae y Saccani (2003). SEC Sierra El Chanate, CL Cerro Libertad, SCC Sierra Los Cerros Colorados. En el diagrama de la derecha se encuentran graficadas las rocas volcánicas del Cretácico Tardío en Sonora.

De acuerdo con el modelo general actualmente aceptado para la génesis de los magmas de arco, los enriquecimientos de LILE observados en las lavas calci-alcálicas cretácicas pueden referirse a una contribución química a partir de componentes derivados de la subducción. Se cree que, a diferencia de los LILE, los HFSE no se enriquecen con los procesos implicados en la génesis de los magmas relacionados con la subducción. Por lo tanto, al considerar una gráfica que involucre HFSE, puede ser posible establecer si un componente, aparte del componente de la zona de subducción, está involucrado en la génesis magmática

(Edwards et al., 1991). La Figura 45 muestra un intento de discriminar entre enriquecimientos relacionados con fluidos y en estado fundido, trazando las relaciones Rb/Y frente a las relaciones Nb/Y (Edwards et al., 1991). Los HFSE, tales como Nb e Y, tienen un potencial muy bajo para dividirse en fluidos hidratados. Por otra parte, los procesos de enriquecimiento derivados de la fusión conducirán hacia altas relaciones Nb/Y (Defant y Drummond, 1990).

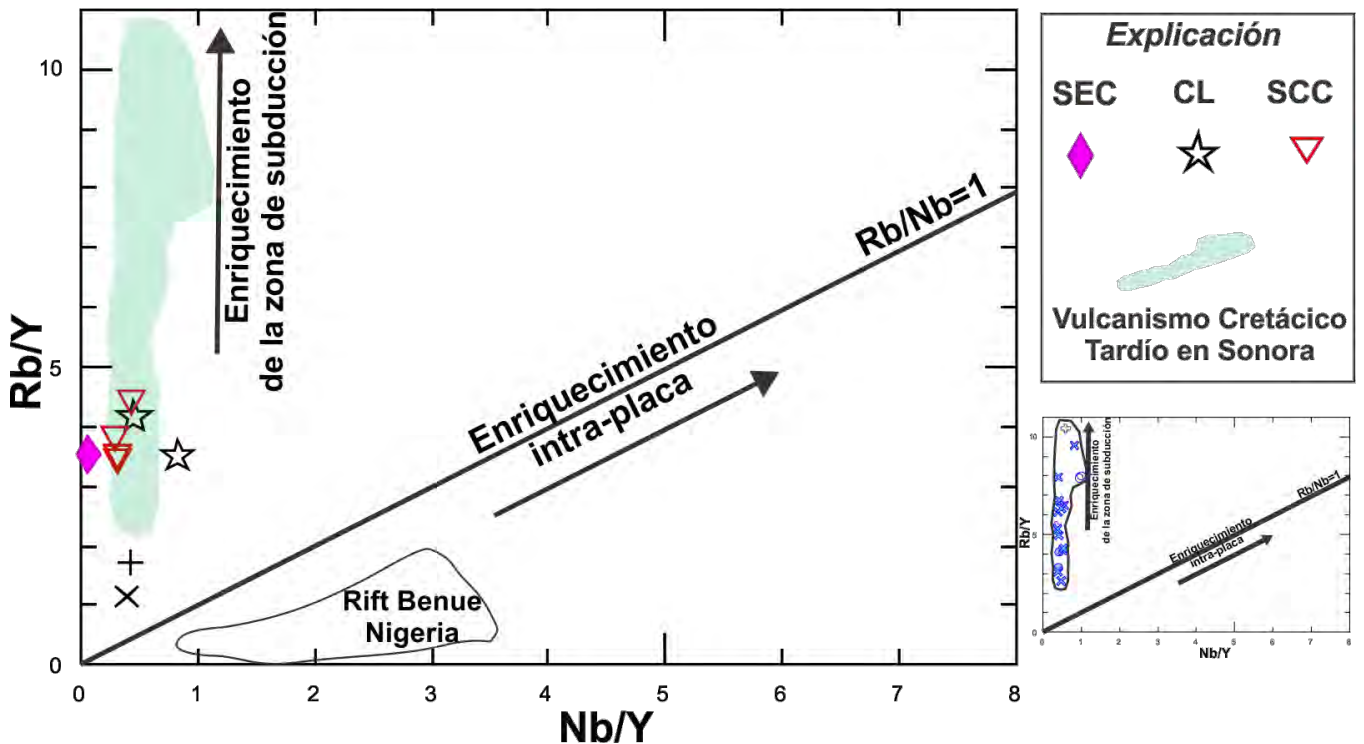


Figura 45.- Diagrama Nb/Y vs. Rb/Y donde se muestran las tendencias típicas de enriquecimiento debido a un componente de zona de subducción y componente dentro de placa (Edwards et al., 1991), para la serie calci-alcalina de las rocas volcánicas cretácicas en estudio. Los datos del “rift” Benue en Nigeria provienen de Obiora y Charan (2011). SEC Sierra El Chanate, CL Cerro Libertad, SCC Sierra Los Cerros Colorados. En el diagrama de la derecha se encuentran graficadas las rocas volcánicas del Cretácico Tardío en Sonora, estas se utilizaron para trazar el área de color verde.

La Figura 45 es un diagrama discriminante entre dos tendencias de enriquecimiento en el cual los datos del “rift” Benue, Nigeria (Obiora y Charan, 2011) sirven como comparación de enriquecimiento intra-placa en un contexto tectónico de rift continental. Por lo que la mayoría de las lavas del Cretácico Tardío en las regiones de estudio siguen la tendencia de un

enriquecimiento por subducción, relacionada con los fluidos hidratados derivados de la placa que se hunde.

Mediante el análisis de los elementos de las Tierras Raras, las rocas volcánicas de composición intermedia de la base de datos del vulcanismo cretácico tardío en Sonora (VCTS) muestran un ligero enriquecimiento de Tierras Raras ligeras en comparación a las Tierras Raras pesadas, estas rocas presentan anomalías negativas de Eu, lo que indica que la cristalización fraccionada jugó un papel importante en su formación (Figura 46). En comparación con este grupo de rocas, las rocas intermedias del vulcanismo orogénico del Paleógeno tardío de Sonora (VOPTS) presentan el mismo patrón de espectro químico en “L”, pero con un mayor enriquecimiento en Tierras Raras ligeras y un mayor empobrecimiento en las Tierras Raras pesadas con valores menores a 10, lo que refleja una señal adakítica para este vulcanismo. Al contrario del VCTS el VOPTS no presenta anomalías negativas tan marcadas de Eu lo que indica que la cristalización fraccionada no desempeñó un papel importante en su evolución (Figura 46).

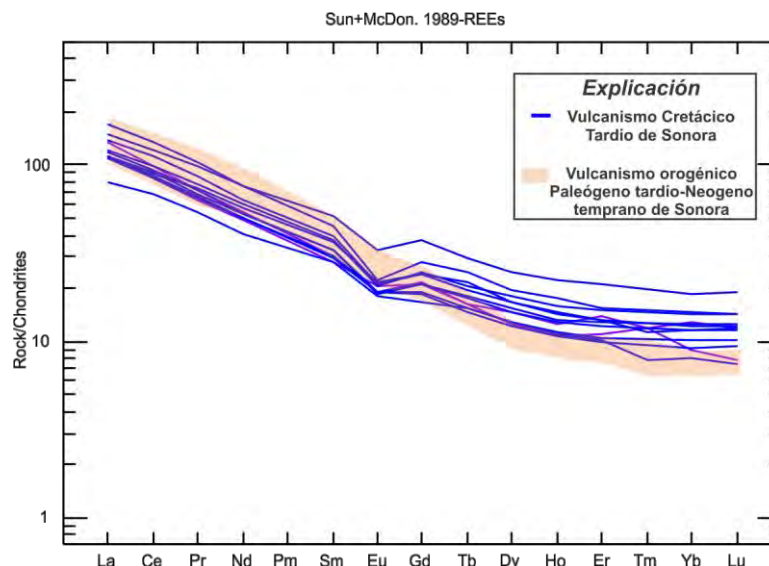


Figura 46.- Diagrama de elementos de Tierras Raras (REE) normalizado a condrita (Sun y McDonough, 1989). Los datos del vulcanismo orogénico Oligoceno-Mioceno provienen de Gómez-Valencia, (2014).

En el diagrama de multielementos normalizado contra el manto primitivo se observan espectros químicos muy similares entre sí, para las rocas intermedias del VCTS y del VOOMS. Las rocas del VCTS presentan un enriquecimiento de elementos incompatibles móviles y un patrón irregular característico (Figura 47), marcado por anomalías negativas pronunciadas en Ba, Nb, Ta, P y Ti, así como anomalías positivas pronunciadas en U, K y Pb.

En este diagrama las rocas del magmatismo orogénico Oligoceno-Mioceno presentan anomalías positivas de Ba y Sr, así como una disminución en la concentración de Th y U. De igual forma se aprecia el empobrecimiento de Tierras Raras pesadas visto en la Figura 46. Estas características muestran diferencias sutiles pero significativas que pueden ser clave para ayudar a distinguir petroquímicamente el magmatismo orogénico del Oligoceno-Mioceno del magmatismo orogénico del Cretácico Tardío.

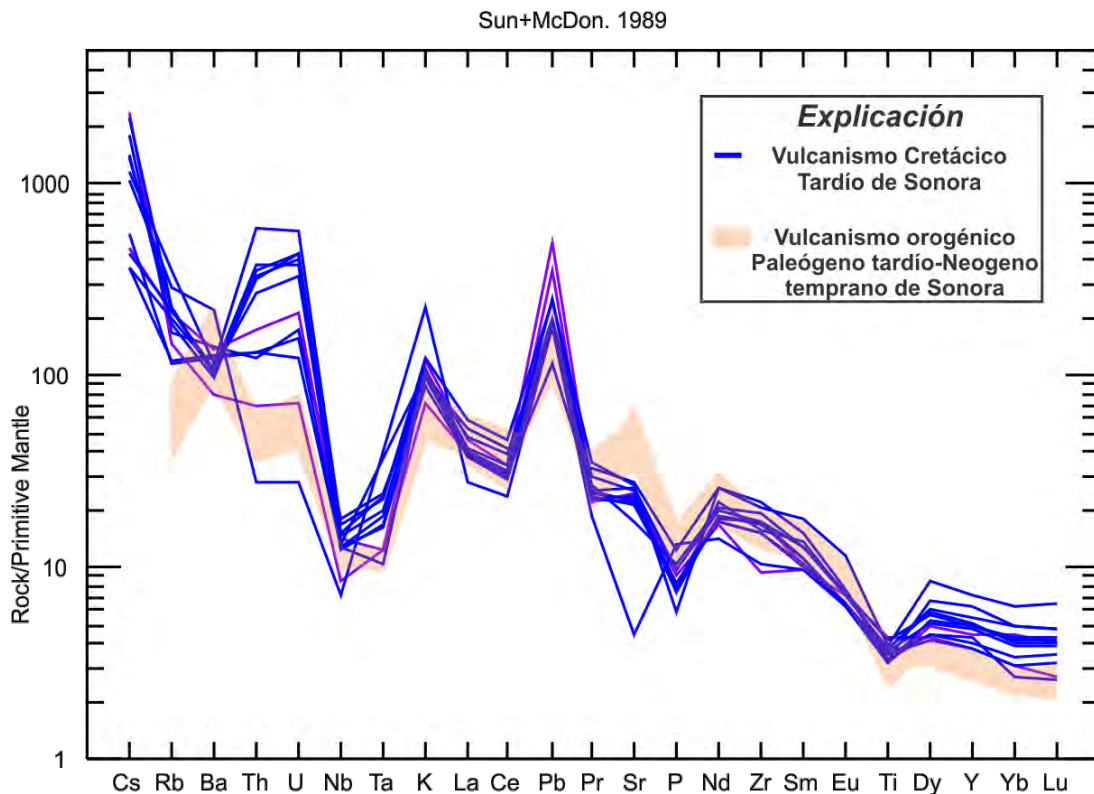


Figura 47.- Diagrama multielementos normalizado a manto primitivo; los valores de normalización son de [Son y McDonough \(1989\)](#). Los datos del vulcanismo orogénico Oligoceno-Mioceno provienen de [Gómez-Valencia, \(2014\)](#).

En resumen, los datos analizados indican que las rocas calci-alcaldas cretácicas en las regiones de estudio son originadas mediante un proceso de asimilación-cristalización fraccionada en un sistema cerrado a partir de fluidos hidratados derivados de la placa que se hunde. Las características químicas y petrológicas sugieren que estas rocas calci-alcaldas se originaron en un arco continental y muestran una identidad con respecto a las del arco Oligoceno-Mioceno en Sonora.

Esto representa un paso hacia una comprensión más amplia de las variaciones de elementos traza y de tierras raras en las rocas volcánicas cretácicas estudiadas, pero modelos más sofisticados de tierras raras e isótopos son necesarios para apreciar completamente estos datos y para obtener de ellos su rendimiento completo de información petrogenética.

VI GEOCRONOMETRÍA U-Pb EN CIRCONES

La geocronometría U-Pb se ha convertido en una herramienta cada vez más importante en muchos aspectos de la investigación en ciencias de la Tierra porque los desarrollos técnicos han proporcionado oportunidades para mejorar la precisión y exactitud, mejorar la resolución espacial y lograr una adquisición de datos más eficiente. El análisis de circones por la técnica de ablación laser utilizando un espectrómetro de masas de tipo multicolector con plasma de acoplamiento inductivo (LA-MC-ICPMS) produce edades individuales con una precisión y reproducibilidad del 1-2%. (Gehrels et al., 2008). Las edades obtenidas en circones permiten determinar la edad de cristalización de rocas ígneas, así como definir la edad máxima de depósito de rocas sedimentarias. La técnica analítica y proceso de preparación y separación de circones se encuentra en la sección de anexos.

6.1 Resultados

En el estado de Sonora existen una serie de análisis geocronométricos realizados por diversos autores para las rocas volcánicas del Cretácico Tardío (Tabla AN1). La recopilación de estos datos sugiere que la mayor producción magmática en el estado ocurrió entre el Campaniano y el Paloceno (80 a 64 Ma; Figura 4). Sin embargo, estos datos se encuentran mayormente distribuidos en la porción este y central de Sonora (Figura 5).

Con el propósito de reforzar la evidencia geocronométrica en la porción occidental de Sonora, para el presente estudio se realizó la determinación de edad de cristalización U-Pb en circones de tres muestras de las áreas en estudio, dos de la Sierra Los Cerros Colorados (CC16-19, CC16-01) y una del Cerro Libertad (CL15-06), ya que para la Sierra El Chanate se cuenta con una edad de 71.6 millones de años para una andesita fechada por Jacques-Ayala (2009). Los resultados están reportados en las Tablas 3, 4 y se encuentran graficados en las Figuras 49A, 49B, 50A y 50B.

La primera muestra CC16-19 es una roca andesítica de textura porfídica de grano medio. Se realizó el fechamiento de 30 granos de circón; las imágenes de catodoluminiscencia (Figura 48) no revelan herencias, sino estructuras magmáticas típicas, con un zoneación muy

marcada. Los datos U-Pb se graficaron en un diagrama de concordia (Figura 49A), en donde se observa una agrupación de análisis concordantes (elipses de color negro) que se emplearon para calcular una edad $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ media ponderada de $80.89 \pm 0.42 \text{ Ma}$ (Figura 49B). Esta edad se ha interpretado como la edad de cristalización de esta muestra de andesita.

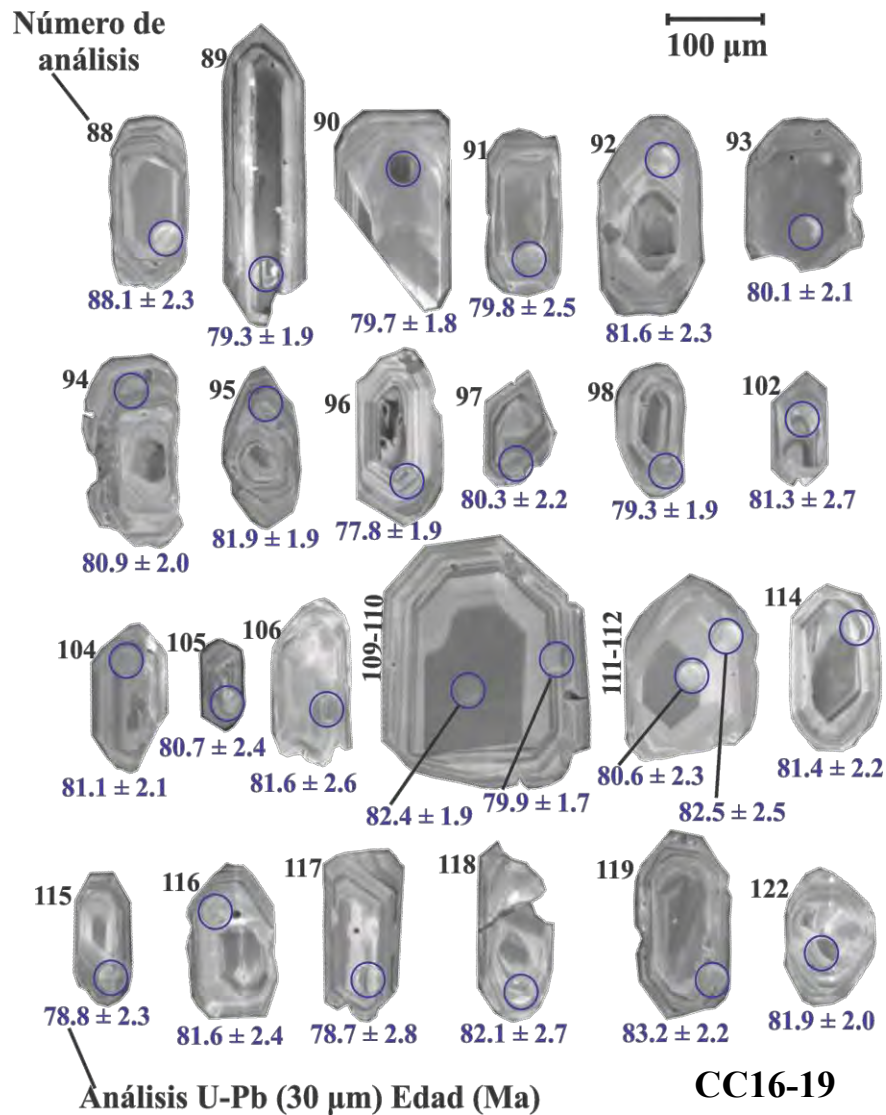


Figura 48.- Imagen post-ablación sobre la que se sobreponen los círculos de color azul que muestran el lugar de ablación y se indican las edades obtenidas. Estos circones pertenecen a la muestra de andesita CC16-19 colectada en el área de Sierra Los Cerros Colorados. La edad individual reportada para cada circon es una edad con precisión de 1 sigma. La edad de intersección superior, interpretada como la edad de cristalización de esta muestra es de $80.89 \pm 0.42 \text{ Ma}$ (2 sigma MSWD = 1.3).

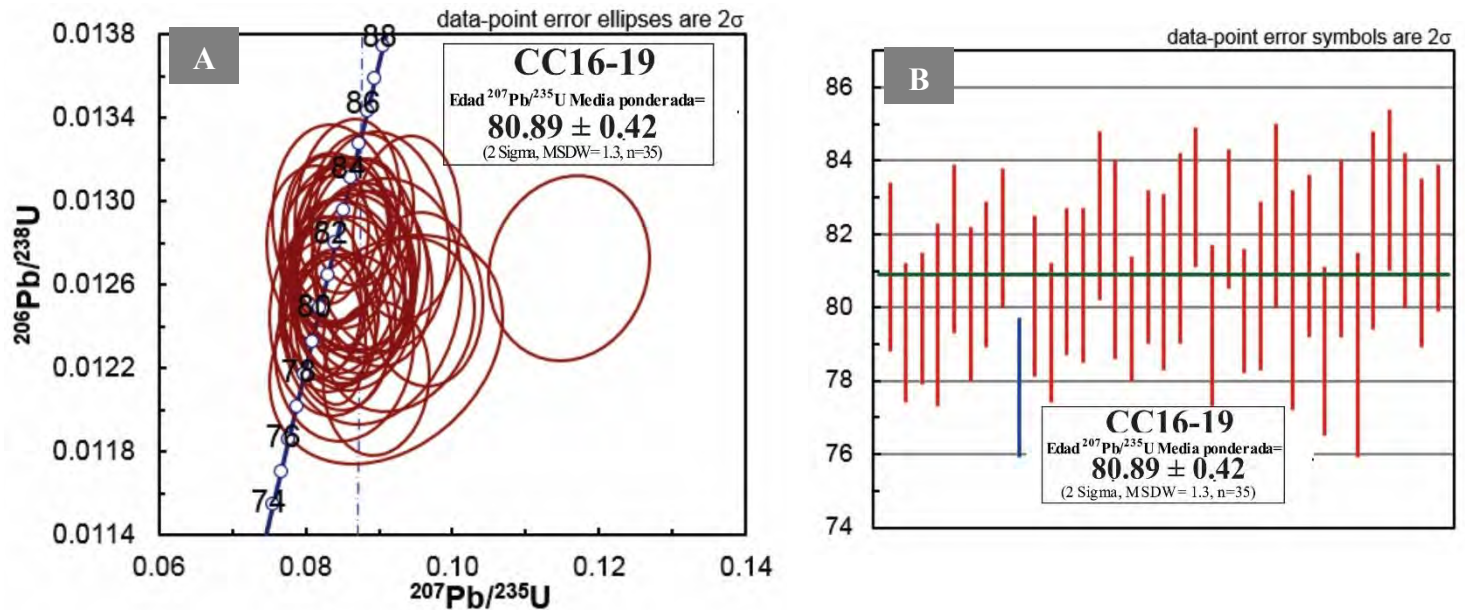


Figura 49.- Graficas de las edades de los circones obtenidos de la muestra de andesita de Sierra Los Cerros Colorados. (A) Diagrama de concordia de [Wetherill \(1956\)](#) mostrando la agrupación de análisis concordantes. (B) Diagrama de edad media ponderada mostrando la distribución de las edades registradas y su margen de error. MSDW: Mean Squared Weighed Deviates (desviación media cuadrática ponderada).

La segunda muestra CC16-01 corresponde a una roca de composición andesítica de grano fino con textura fluidal. De esta muestra solo se pudieron obtener 4 circones los cuales dieron las siguientes edades: 64.2, 71.9, 18.3 y 12.8 Ma. Por lo que de esta muestra no se pudo obtener la edad de cristalización, ya que estadísticamente la población de circones no representa una edad lo suficientemente representativa. La tercera muestra (CL15-06) corresponde al área del Cerro Libertad; se trata de una andesita con textura porfídica de grano medio. Se realizó el fechamiento de 29 granos de circón. Los datos U-Pb se graficaron en un diagrama de concordia ([Figura 50A](#)), en donde se observa una agrupación de análisis concordantes que se emplearon para calcular una edad $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ media ponderada de 18.09 ± 0.41 Ma ([Figura 50B](#)). Esta edad se ha interpretado como la edad de cristalización de esta muestra de andesita. Por lo que esta muestra pertenece al Mioceno. Esto debido a que en esta área se intentó fechar la unidad volcánica superior de la cual era más probable obtener circones. De esta manera, esta muestra (CL15-06) puede representar el contacto estratigráfico entre el Cretácico Tardío y el Mioceno en el área del Cerro Libertad.

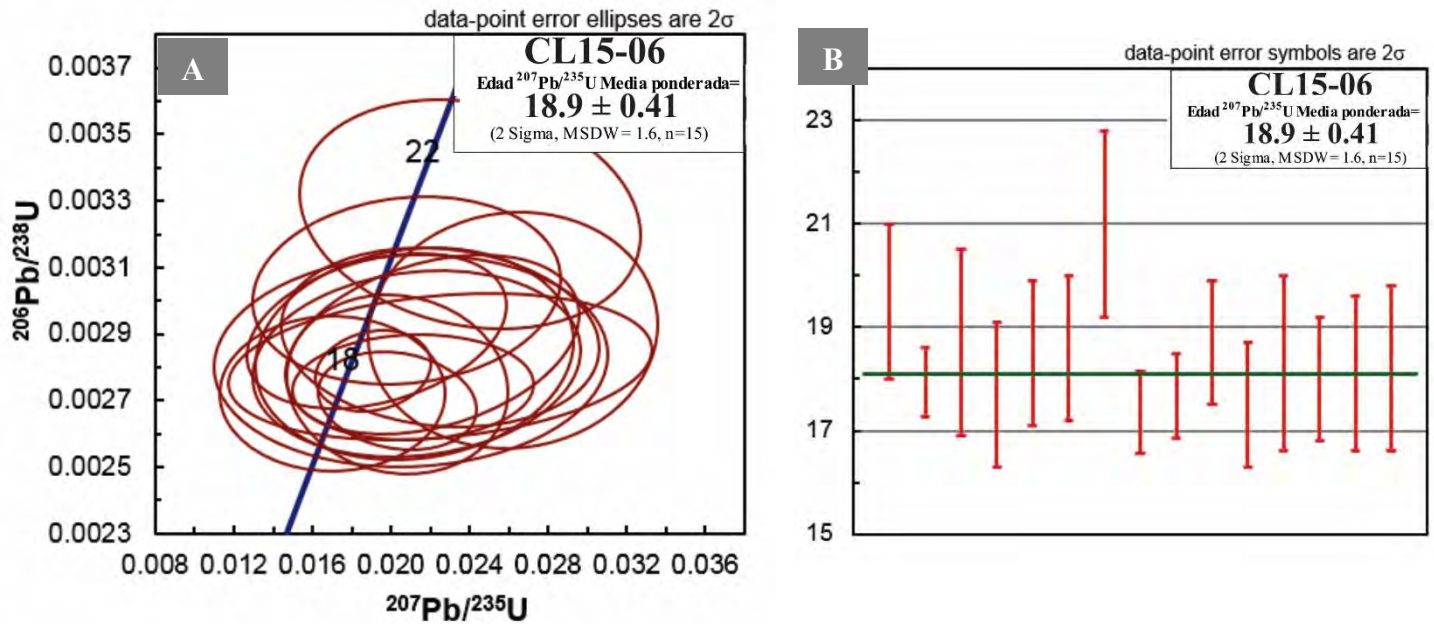


Figura 50.- Gráficas de las edades de los circones obtenidos de la muestra de andesita del área del Cerro Libertad. (A) Diagrama de concordia de [Wetherill \(1956\)](#) mostrando la agrupación de análisis concordantes. (B) Diagrama de edad media ponderada mostrando la distribución de las edades registradas y su margen de error. MSDW: Mean Squared Weighed Deviates (desviación media cuadrática ponderada).

Tabla 3.- Datos analíticos de U-Th-Pb obtenidos por LA-ICP-MS en circones de una muestra de andesita de la Sierra Los Cerros Colorados.

Número de analisis	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	Error (%)	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	Error (%)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	Error (%)	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	Error (%)	Rho	Disc %	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	Error (Ma)	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	Error (Ma)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	Error (Ma)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	Best age (Ma)	Error (Ma)
Muestra CC16-19	Andesita porfirítica de plagioclasa, anfíbol y biotita																					
CC1619-88	185	90	0.49	0.0510	± 0.0040	0.0891	± 0.0067	0.0127	± 0.0004	0.0041	± 0.0003	-0.14	6.13	81.1	± 2.3	86.4	± 6.2	230	± 170	81.1	± 2.3	
CC1619-89	910	900	0.99	0.0492	± 0.0028	0.0834	± 0.0039	0.0124	± 0.0003	0.0036	± 0.0004	-0.18	2.46	79.3	± 1.9	81.3	± 3.6	140	± 120	79.3	± 1.9	
CC1619-90	385	282	0.73	0.0482	± 0.0031	0.0836	± 0.0052	0.0124	± 0.0003	0.0038	± 0.0004	0.09	2.09	79.7	± 1.8	81.4	± 4.9	130	± 140	79.7	± 1.8	
CC1619-91	217	103.1	0.48	0.0488	± 0.0040	0.0836	± 0.0070	0.0125	± 0.0004	0.0041	± 0.0003	0.01	1.85	79.8	± 2.5	81.3	± 6.5	130	± 170	79.8	± 2.5	
CC1619-92	216	94.5	0.44	0.0470	± 0.0037	0.0826	± 0.0064	0.0127	± 0.0004	0.0041	± 0.0003	-0.16	-1.62	81.6	± 2.3	80.3	± 6	30	± 160	81.6	± 2.3	
CC1619-93	274	168	0.61	0.0512	± 0.0046	0.0857	± 0.0073	0.0125	± 0.0003	0.0040	± 0.0003	0.00	3.84	80.1	± 2.1	83.3	± 6.8	190	± 180	80.1	± 2.1	
CC1619-94	365	155.9	0.43	0.0492	± 0.0039	0.0857	± 0.0065	0.0126	± 0.0003	0.0037	± 0.0003	-0.12	2.88	80.9	± 2	83.3	± 6.1	160	± 170	80.9	± 2	
CC1619-95	386	163	0.42	0.0481	± 0.0028	0.0850	± 0.0051	0.0128	± 0.0003	0.0039	± 0.0002	0.20	0.97	81.9	± 1.9	82.7	± 4.8	130	± 120	81.9	± 1.9	
CC1619-96	387	196	0.51	0.0520	± 0.0034	0.0896	± 0.0059	0.0122	± 0.0003	0.0036	± 0.0002	0.05	10.57	77.8	± 1.9	87	± 5.5	310	± 140	77.8	± 1.9	
CC1619-97	464	284	0.61	0.0560	± 0.0042	0.0962	± 0.0065	0.0125	± 0.0003	0.0041	± 0.0002	-0.05	13.75	80.3	± 2.2	93.1	± 6	450	± 170	80.3	± 2.2	
CC1619-98	364	155.8	0.43	0.0490	± 0.0032	0.0848	± 0.0056	0.0124	± 0.0003	0.0038	± 0.0003	-0.02	3.88	79.3	± 1.9	82.5	± 5.2	170	± 150	79.3	± 1.9	
CC1619-99	438	168.4	0.38	0.0482	± 0.0024	0.0830	± 0.0042	0.0126	± 0.0003	0.0038	± 0.0003	-0.07	0.25	80.7	± 2	80.9	± 3.9	140	± 120	80.7	± 2	
CC1619-100	328	177	0.54	0.0484	± 0.0041	0.0858	± 0.0064	0.0126	± 0.0003	0.0040	± 0.0003	-0.24	3.36	80.6	± 2.1	83.4	± 6	170	± 180	80.6	± 2.1	
CC1619-101	549	220	0.40	0.0523	± 0.0035	0.0937	± 0.0060	0.0129	± 0.0004	0.0045	± 0.0004	0.08	9.24	82.5	± 2.3	90.9	± 5.5	310	± 150	82.5	± 2.3	
CC1619-102	266	130.3	0.49	0.0502	± 0.0038	0.0864	± 0.0062	0.0127	± 0.0004	0.0043	± 0.0003	0.27	3.21	81.3	± 2.7	84	± 5.8	160	± 160	81.3	± 2.7	
CC1619-103	542	264	0.49	0.0492	± 0.0030	0.0842	± 0.0044	0.0124	± 0.0003	0.0040	± 0.0002	-0.20	2.80	79.7	± 1.7	82	± 4.2	140	± 130	79.7	± 1.7	
CC1619-104	364	126	0.35	0.0506	± 0.0036	0.0891	± 0.0062	0.0127	± 0.0003	0.0037	± 0.0002	0.01	6.35	81.1	± 2.1	86.6	± 5.8	230	± 160	81.1	± 2.1	
CC1619-105	309	159.4	0.52	0.0505	± 0.0041	0.0866	± 0.0069	0.0126	± 0.0004	0.0040	± 0.0003	0.05	4.04	80.7	± 2.4	84.1	± 6.4	200	± 160	80.7	± 2.4	
CC1619-106	361	159	0.44	0.0493	± 0.0049	0.0856	± 0.0072	0.0127	± 0.0004	0.0041	± 0.0003	-0.24	2.04	81.6	± 2.6	83.3	± 6.7	130	± 200	81.6	± 2.6	
CC1619-107	425	216	0.51	0.0505	± 0.0033	0.0876	± 0.0058	0.0130	± 0.0003	0.0019	± 0.0012	0.06	2.58	83	± 1.9	85.2	± 5.4	200	± 140	83	± 1.9	
CC1619-108	251	99.1	0.39	0.0549	± 0.0049	0.0927	± 0.0084	0.0124	± 0.0003	0.0042	± 0.0003	0.19	12.73	79.5	± 2.2	91.1	± 8.1	340	± 190	79.5	± 2.2	
CC1619-109	402	253	0.63	0.0467	± 0.0028	0.0830	± 0.0045	0.0129	± 0.0003	0.0039	± 0.0002	0.00	-1.98	82.4	± 1.9	80.8	± 4.2	30	± 120	82.4	± 1.9	
CC1619-110	393	148.2	0.38	0.0482	± 0.0028	0.0820	± 0.0046	0.0125	± 0.0003	0.0035	± 0.0005	0.07	0.00	79.9	± 1.7	79.9	± 4.3	90	± 120	79.9	± 1.7	
CC1619-111	173	101.4	0.59	0.0492	± 0.0040	0.0856	± 0.0074	0.0126	± 0.0004	0.0038	± 0.0002	0.08	4.39	80.6	± 2.3	84.3	± 7.2	170	± 180	80.6	± 2.3	
CC1619-112	153.5	58.5	0.38	0.0467	± 0.0042	0.0842	± 0.0071	0.0129	± 0.0004	0.0044	± 0.0004	-0.09	0.36	82.5	± 2.5	82.8	± 6.5	40	± 180	82.5	± 2.5	
CC1619-113	172.5	82.8	0.48	0.0508	± 0.0064	0.0890	± 0.0100	0.0125	± 0.0005	0.0039	± 0.0004	0.16	7.50	80.2	± 3	86.7	± 9.7	260	± 260	80.2	± 3	
CC1619-114	183	83.8	0.46	0.0509	± 0.0052	0.0856	± 0.0074	0.0127	± 0.0003	0.0040	± 0.0003	-0.15	2.05	81.4	± 2.2	83.1	± 6.9	180	± 200	81.4	± 2.2	
CC1619-115	365	151	0.41	0.0489	± 0.0043	0.0852	± 0.0077	0.0123	± 0.0004	0.0040	± 0.0003	0.07	4.95	78.8	± 2.3	82.9	± 7.2	160	± 190	78.8	± 2.3	
CC1619-116	233	105.1	0.45	0.0493	± 0.0040	0.0869	± 0.0070	0.0127	± 0.0004	0.0041	± 0.0003	0.01	3.32	81.6	± 2.4	84.4	± 6.6	170	± 160	81.6	± 2.4	
CC1619-117	187	81	0.43	0.0534	± 0.0078	0.0910	± 0.0130	0.0123	± 0.0005	0.0044	± 0.0006	0.28	10.57	78.7	± 2.8	88	± 12	350	± 320	78.7	± 2.8	
CC1619-118	231	105.2	0.46	0.0528	± 0.0051	0.0902	± 0.0077	0.0128	± 0.0004	0.0040	± 0.0004	-0.06	6.06	82.1	± 2.7	87.4	± 7.2	240	± 200	82.1	± 2.7	
CC1619-119	321	129.6	0.40	0.0482	± 0.0033	0.0857	± 0.0058	0.0130	± 0.0003	0.0042	± 0.0004	0.15	0.12	83.2	± 2.2	83.3	± 5.4	90	± 140	83.2	± 2.2	
CC1619-120	303	137.6	0.45	0.0481	± 0.0031	0.0849	± 0.0053	0.0128	± 0.0003	0.0042	± 0.0003	0.17	0.61	82.1	± 2.1	82.6	± 5	100	± 130	82.1	± 2.1	
CC1619-121	220	81.1	0.37	0.0651	± 0.0052	0.1159	± 0.0090	0.0127	± 0.0004	0.0054	± 0.0006	0.11	26.85	81.2	± 2.3	111	± 8.2	770	± 170	81.2	± 2.3	
CC1619-122	319	172.6	0.54	0.0483	± 0.0036	0.0842	± 0.0063	0.0128	± 0.0003	0.0039	± 0.0002	0.14	0.00	81.9	± 2	81.9	± 5.9	130	± 150	81.9	± 2	

Coordenadas UTM: 3161479N, 477610E (DATUM WGS84)

Edad ²⁰⁷Pb/²³⁵U Media ponderada= **80.89 ± 0.42**
(2 Sigma, MSDW= 1.3, n=35)

Tabla 4. Datos analíticos de U-Th-Pb obtenidos por LA-ICP-MS en circones de una muestra de andesita del área del Cerro Libertad.

Número de análisis	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		Rho	Disc %	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U			
				Error (%)	Error (%)	Error (%)	Error (%)	Error (%)	Error (%)	Error (Ma)	Error (Ma)			Error (Ma)	Error (Ma)	Best age (Ma)	Error (Ma)						
Muestra CL15-06	Andesita porfídica de plagioclasa, anfíbol y biotita																						
CL1506-52	143	97	0.68	0.0530	± 0.0160	0.0208	± 0.0064	0.0030	± 0.0002	0.0011	± 0.0002	0.12	5.80	19.5	± 1.5	20.7	± 6.3	80.0	± 500.0	19.5	± 1.5		
CL1506-54	541	510	0.94	0.0530	± 0.0065	0.0191	± 0.0024	0.0028	± 0.0001	0.0008	± 0.0001	0.18	8.88	18.0	± 0.7	19.7	± 2.3	230.0	± 240.0	18.0	± 0.7		
CL1506-59	168	67	0.40	0.0630	± 0.0150	0.0262	± 0.0060	0.0029	± 0.0003	0.0009	± 0.0003	0.05	28.08	18.7	± 1.8	26.0	± 5.9	580.0	± 440.0	18.7	± 1.8		
CL1506-60	198	99	0.50	0.0580	± 0.0140	0.0203	± 0.0046	0.0028	± 0.0002	0.0009	± 0.0002	-0.09	15.31	17.7	± 1.4	20.9	± 4.6	180.0	± 460.0	17.7	± 1.4		
CL1506-61	175	104	0.59	0.0540	± 0.0150	0.0221	± 0.0061	0.0029	± 0.0002	0.0007	± 0.0002	0.34	15.53	18.5	± 1.4	21.9	± 6.0	60.0	± 500.0	18.5	± 1.4		
CL1506-63	164	124	0.76	0.0540	± 0.0160	0.0225	± 0.0066	0.0029	± 0.0002	0.0012	± 0.0002	-0.12	16.96	18.6	± 1.4	22.4	± 6.5	180.0	± 570.0	18.6	± 1.4		
CL1506-65	155	63	0.41	0.0670	± 0.0220	0.0240	± 0.0071	0.0033	± 0.0003	0.0011	± 0.0003	-0.18	11.76	21.0	± 1.8	23.8	± 7.0	280.0	± 580.0	21.0	± 1.8		
CL1506-66	531	288	0.54	0.0576	± 0.0089	0.0203	± 0.0033	0.0027	± 0.0001	0.0010	± 0.0001	-0.18	14.53	17.4	± 0.8	20.3	± 3.3	230.0	± 320.0	17.4	± 0.8		
CL1506-67	379	457	1.21	0.0520	± 0.0140	0.0211	± 0.0050	0.0027	± 0.0001	0.0008	± 0.0001	0.05	16.26	17.7	± 0.8	21.1	± 4.9	180.0	± 380.0	17.7	± 0.8		
CL1506-68	176	97	0.55	0.0480	± 0.0120	0.0193	± 0.0054	0.0029	± 0.0002	0.0008	± 0.0002	0.33	2.60	18.7	± 1.2	19.2	± 5.3	70.0	± 440.0	18.7	± 1.2		
CL1506-69	184	98	0.53	0.0440	± 0.0120	0.0170	± 0.0047	0.0027	± 0.0002	0.0008	± 0.0002	0.00	-2.94	17.5	± 1.2	17.0	± 4.7	-150.0	± 480.0	17.5	± 1.2		
CL1506-74	140	76	0.54	0.0600	± 0.0200	0.0212	± 0.0066	0.0028	± 0.0003	0.0011	± 0.0002	0.12	13.27	18.3	± 1.7	21.1	± 6.5	160.0	± 530.0	18.3	± 1.7		
CL1506-78	185	142	0.77	0.0580	± 0.0200	0.0225	± 0.0088	0.0028	± 0.0002	0.0012	± 0.0002	0.23	19.64	18.0	± 1.2	22.4	± 8.5	110.0	± 500.0	18.0	± 1.2		
CL1506-79	177	97	0.55	0.0600	± 0.0200	0.0213	± 0.0068	0.0028	± 0.0002	0.0009	± 0.0002	0.14	14.62	18.1	± 1.5	21.2	± 6.7	240.0	± 540.0	18.1	± 1.5		
CL1506-80	126	58	0.46	0.0470	± 0.0210	0.0210	± 0.0082	0.0028	± 0.0003	0.0010	± 0.0003	0.06	12.08	18.2	± 1.6	20.7	± 8.1	-380.0	± 720.0	18.2	± 1.6		

Coordenadas UTM: 3329902N, 342330E (DATUM WGS84)

Edad ²⁰⁷Pb/²³⁵U Media ponderada= 18.09 ± 0.41

(2 Sigma, MSDW= 1.6, n=15)

VII DISCUSIÓN

7.1 Alteración

La alteración que afecta a las rocas en estudio juega un papel importante en esta investigación, principalmente en el análisis geoquímico; si el efecto de la alteración no se toma en cuenta, se podrían dar interpretaciones mal fundamentadas. La evaluación de la alteración permitió construir diagramas con cajas de menor alteración en donde se pudo definir la alteración hidrotermal. De esta manera se pudo pulir y seleccionar los análisis de las muestras para reconocer que el vulcanismo de la Sierra El Chanate tiene concentraciones anómalas de Na; esta alteración está caracterizada por un intercambio de iones Na-K, por lo que al ganar Na pierden K.

Por el contrario, en el Cerro Libertad y en la Sierra Los Cerros Colorados, la alteración resultante es de tipo hidrotermal caracterizado por la pérdida de Na debido a la destrucción de plagioclasa. Estas alteraciones están evidenciadas de igual forma en la mineralogía vista en el microscopio y representan a la mayoría de las rocas reportadas en la literatura para el Cretácico Tardío.

La alteración hidrotermal es un término general que incluye la respuesta mineralógica, textural y química de las rocas a un cambio ambiental, en térmicos químicos y termales, en la presencia de agua caliente, vapor o gas. La alteración hidrotermal ocurre a través de la transformación de fases minerales, crecimiento de nuevos minerales, disolución de minerales y/o precipitación, y reacciones de intercambio iónico entre los minerales constituyentes de una roca y el fluido caliente que circuló por la misma. La alteración hidrotermal involucra la circulación de volúmenes relativamente grandes de fluidos calientes atravesando las rocas permeables debido a la presencia de fisuras o poros interconectados.

El estudio petrográfico aunado a la evaluación geoquímica de las rocas volcánicas del Cretácico Tardío; sugiere que la alteración es producto de la liberación de fluidos metamórficos generados por un metamorfismo de sepultamiento de escala regional sin deformación.

7.2 Movilidad de los elementos

Es importante evaluar la movilidad de los elementos producto de la alteración, debido a que el uso de elementos mayores para el estudio geoquímico no es tan confiable de utilizar, esto por la notable ganancia y pérdida de Na y K de la mayoría de las muestras, lo que quedó demostrado en la evaluación de la alteración.

Evaluar la movilidad de los elementos se logró comparando un elemento de interés contra el más inmóvil en este caso el Zr, de esta forma se eliminaron las muestras que no mostraban una relación sistemática en el gráfico obtenido. Entonces se pudieron utilizar con mayor confiabilidad los elementos traza para el estudio geoquímico.

7.3 Sobre la dificultad de fechar las rocas volcánicas en estudio.

La elección de muestras para realizar los fechamientos geocronométricos U-Pb fue un poco difícil principalmente por la composición intermedia de las rocas ya que el volumen de circones que contienen este tipo de rocas es reducido. Mediante el estudio petrográfico se pudo distinguir que en donde aumentaba el tamaño de grano aparecían algunos circones como minerales accesorios. Esto ocurre principalmente en la unidad superior que fue la que se consideró más adecuada para fechar. Sin embargo, al ser la unidad superior se corría el riesgo de fechar una roca con edades más jóvenes las cuales estaban en contacto estratigráfico. Lo que efectivamente pasó en el área del Cerro Libertad, en donde se fechó una andesita de **18.09 ± 0.41** millones de años.

Se intentó obtener circones de las unidades de base del Cerro Libertad y de La Sierra Los Cerros Colorados, pero en estas rocas al ser de grano fino y de composición intermedia, sólo se obtuvo un número muy reducido de circones y en algunos casos ninguno. Por lo que para futuros fechamientos de estas unidades es recomendable procesar un volumen mayor de roca, alrededor de 10 o 20 kilogramos.

7.4 Uniformidad del vulcanismo Cretácico Tardío en el estado de Sonora

Mediante el análisis bibliográfico se pudo observar que este vulcanismo se distribuye en no más de cuatro unidades o grupos estratigráficos en todo el estado de Sonora, sin muchas variaciones en sus productos volcánicos y por lo tanto las descripciones geológicas son muy parecidas. Esto también se ve reflejado en el estudio petrográfico y geoquímico lo que sugiere que los procesos petrogenéticos que dieron origen a este vulcanismo no tuvieron grandes variaciones. Pueden existir dos posibilidades para lograr tal proceso:

- (1) Mediante el proceso de asimilación-cristalización fraccionada (AFC) en donde [DePaolo \(1981\)](#) menciona que en situaciones ideales se puede alcanzar un valor de estado estacionario en donde los elementos no se agotan indefinidamente en el magma. Sin embargo, esta situación ideal no puede permanecer constante con el tiempo por lo que nunca podría alcanzarse en una situación natural.
- (2) Mediante un modelo de recarga, erupción, asimilación y cristalización fraccionada (RE AFC) ([Cin-Ty A. Lee et al., 2013](#)). Que considera que los magmas de arco pueden pasar por historias con etapas múltiples, comenzando con la generación de magmas primarios derivados del manto hidratado a partir de la cuña del manto. Estos magmas se elevan entonces en la corteza inferior, donde se depositan en cámaras de larga vida, se someten a recarga continua y cristalización fraccionada, generando un magma de segunda etapa del que se originan todos los líquidos derivados subsiguientes. Los elementos incompatibles se enriquecerán en este magma de segunda etapa, pero los elementos compatibles sólo se agotarán ligeramente. Por lo tanto, los magmas de la corteza heredarán sus composiciones de esta profunda zona de recarga en la corteza.

El modelo que más se ajusta y que explica la evolución magmática del vulcanismo Cretácico Tardío en Sonora y en las regiones de estudio es el RE AFC, esto sería una primera aproximación, lo que resta es aplicar las fórmulas de este modelo a las rocas en estudio, para evaluarlas y saber si los procesos de este modelo son efectivos en la formación y evolución de estas rocas.

VIII CONCLUSIÓN

8.1 Compilación de una base de datos

La recopilación bibliográfica permitió tener una visión más amplia en cuanto a la composición y la ubicación en tiempo-espacio de las unidades volcánicas bajo el trabajo de investigación de esta tesis ya que los datos obtenidos representan las características geoquímicas y petrológicas de los episodios magmáticos en un rango de tiempo del VCTS. Mediante este análisis se obtuvo información de un total de 136 muestras de rocas volcánicas del Cretácico Tardío-Eoceno temprano. Esta información se distribuye en más de 40 localidades del estado de Sonora, en donde se contabilizan 78 ejemplares de fechas isotópicas, siendo el método U-Pb el más utilizado, así como también 58 ejemplares de análisis geoquímicos de elementos mayores y trazas. Un dato interesante observado es que las edades recopiladas se acumulan en un rango de edad que va del Campaniano al Paleoceno (80 a 64 millones de años). Esto puede reflejar una producción uniforme de magmatismo durante este periodo en Sonora.

8.2 Análisis de la petrografía

Por medio del análisis petrográfico realizado en las tres localidades de estudio, se pudieron establecer tres grupos petrológicos de los cuales se puede concluir lo siguiente:

- (1) Se definió un patrón de afinidades petrográficas en las regiones involucradas.
- (2) Se asignaron tres unidades volcánicas espacio-temporales presentes en las tres regiones de estudio, quedando de la siguiente manera: A) Unidad volcánica inferior con plagioclasa y feldespato; B) Unidad volcánica intermedia con la presencia de anfíbol y C) Unidad volcánica superior con anfíbol y biotita.
- (3) Existe un aumento en el tamaño de los fenocristales de abajo arriba (la base a la cima). En la base ocurren cristales de grano fino a medio y hacia la cima los derrames de la cima los derrames tienen fenocristales de grano medio a grueso.

- (4) El grado y estilo de alteración juega un papel importante en la naturaleza de los afloramientos; las rocas volcánicas de la Sierra El Chanate están afectadas por alteración provocada por sepultamiento. Por otra parte, las rocas del Cerro Libertad y de la Sierra Los Cerros Colorados están afectadas principalmente por alteración hidrotermal, tal y como ocurre con la mayoría de las rocas volcánicas reportadas en la literatura para el Cretácico Tardío.

8.3 Características Geoquímicas

En primera instancia mediante los análisis geoquímicos se obtuvo la evaluación de la alteración y de movilidad de elementos mayores y traza que afecta a las rocas en estudio, tópico previsto en las discusiones de esta investigación. Las características químicas y petrológicas sugieren que estas rocas calci-alcálicas se originaron en un arco continental según los cocientes de $Y/Zr = 7$; que producen tendencias lineales que sugieren una afinidad magmática calci-alcálica. Por otra parte, el alto cociente de Zr/Y sugiere que estas rocas se formaron como el resultado de la cristalización fraccionada. Mediante un diagrama de Cr vs. Ni propuesto por [Yang et al., \(2008\)](#) a partir de coeficientes de partición de un magma basáltico y de un magma andesítico, se pudo determinar que la cristalización fraccionada de anfíbol y clinopiroxeno debió haber sido importante en la evolución del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de estudio. Estas lavas se caracterizadas por un enriquecimiento de elementos móviles (Rb y Ba) con respecto a los elementos inmóviles (Y, Zr, Nb y Ta). Los datos analizados indican que modelo que más se ajusta y que explica la evolución magmática del vulcanismo Cretácico Tardío en Sonora y en las regiones de estudio es el REAFC.

8.4 Análisis geocronométricos

El análisis de la literatura permitió ubicar temporalmente el vulcanismo Cretácico Tardío de Sonora en un lapso de mayor producción magmática de 80 a 64 millones de años (Campaniano-Paleógeno). Los resultados geocronométricos obtenidos en una andesita de la Sierra El Chanate indican una edad de 71.6 ± 0.7 millones de años ([Jacques-Ayala, 2009](#)). De

igual forma, en la Sierra Los Cerros Colorados mediante este estudio se obtuvo una edad isotópica U-Pb de 80 ± 0.3 millones de años, siendo la primera vez que se reporta esta edad en la región costera de Hermosillo en rocas volcánicas de composición intermedia.

La obtención de estas edades permite corroborar que las rocas volcánicas estudiadas pertenecen al episodio de 80 a 64 millones de años (Campaniano - Maastrichtiano) definido en este estudio como un pulso de composición intermedia, para el vulcanismo Cretácico Tardío en Sonora.

Finalmente, los datos obtenidos en esta investigación se pueden enriquecer mediante un estudio detallado de geología estructural, así como un análisis de geoquímica de tierras raras e isótopos de Rb-Sr-Hf, para obtener una información más completa acerca de la tectónica y de la petrogénesis de las rocas en estudio.

IX REFERENCIAS

- Anderson, T.H., y Silver, L.T., 1981**, An overview of Precambrian rocks in Sonora, Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 5, no. 2, p. 131–139.
- Arellano-Morales, R., 2004**, Caracterización geoquímica y estudio de inclusiones fluidas del prospecto El Alacrán, Cananea, Sonora, México: Hermosillo, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, tesis de maestro en ciencias, 122 p. (inédita).
- Barrett, T.J. and MacLean, W.H., 1994a**, Chemostratigraphy and hydrothermal alteration in exploration for VHMS deposits in greenstones and younger rocks, *in* Alteration and Alteration Processes Associated with Ore-Forming Systems, (ed.) D.R. Lentz: Geological Association of Canada, Short Course Notes Volume 11, p. 433-467.
- Basta, F.F., Maurice, A.E., Fontbote, L., 2011**, Petrology and geochemistry of the banded iron formation (BIF) of Wadi Karim and Um Anab, Eastern Desert, Egypt: implications for the origin of Neoproterozoic BIF: *Precambrian Research* 187, 277e292.
- Beraldi-Campesi, Hugo, y Cevallos-Ferriz, S.R.S., 2005**, Diversidad de microfósiles en la Formación Tarahumara, Sonora: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 22, núm. 2, p. 261–271.
- Best, M., G., 2003**, *Igneous and Metamorphic Petrology*: Blackwell Publishing, Malden, MA.
- Calmus, T., Vega-Granillo, R., Zazueta-Lugo, R., 2011**, Evolución geológica de Sonora durante el Cretácico Tardío y el Cenozoico, *in* Calmus, T. (ed.), *Panorama de la geología de Sonora*, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118(7), 227-266.
- Calmus, T., Bernet, M., Lugo-Zazueta R., Hardwick, E., Mendivil-Quijada H., 2015**, Apatite fission-track thermochronology of Laramide plutonic rocks in northwestern Mexico: Distinguishing Basin and Range extension versus Gulf of California rifting: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* v. 32, núm. 3, 2015, p. 529-541.
- Chazot, G., Bertrand, H., 1995**, Genesis of silicic magmas during Tertiary continental rifting in Yemen: *Lithos* 36, 69–83.

- Claisse F., 1989**, Automated sample preparation for analysis of geological materials. Ahmedali S.T (ed.), X-ray fluorescence analysis in the geological sciences: Advances methodology: Geological Association of Canada: Short course 7, p 39-54.
- Cox, D.P., Miller, R.J., y Woodburne, K., 2006**, The Laramide Mesa Formation and the Ojo de Agua Caldera, Southeast of Cananea Copper Mining District, Sonora, Mexico: USGS Scientific Investigations Report 2006-5022, 7 p.
- Damon, P.E.; Clark, K.C.; Shafiqullah, M. 1983**, Geochronology of the porphyry copper deposits and related mineralization of Mexico: Canadian Journal of Earth Sciences, Vol. 20: 1052-1071.
- Defant, M.J., Drummond, M.S., 1990**, Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere: Nature, 347, 662-665.
- DePaolo, D., 1981**, Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization: Earth and Planetary Science Letters 53, 189–202.
- Edwards, A., Menzies, M., Thirlwall, M., 1991**, Evidence from Muriah, Indonesia, for the interplay of supra-subduction zone and intraplate processes in the genesis of potassic alkaline magmas: Journal of Petrology 32, (3), 555–592.
- El-Bialy, M.Z., Streck, M.J., 2009**, Late Neoproterozoic alkaline magmatism in the Arabian–Nubian Shield: the postcollisional A-type granite of Sahara-Umm Adawi pluton, Sinai, Egypt: Arabian Journal of Geosciences 2, 151–174.
- Flores-Vázquez, I., 2006**, Magmatismo Cretácico Tardío-Terciario temprano y P-T de emplazamiento para intrusiones relacionadas al depósito Suaqui Verde, centro-este de Sonora: Hermosillo, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, tesis de maestro en ciencias, 106 p. (inédita).
- Gans, P.B., 1997**, Large-magnitude Oligo-Miocene extension in southern Sonora: Implications for the tectonic evolution of northwest Mexico: Tectonics, 16(3), 388-408.
- García y Barragán, J.C., 2003**, Stratigraphy, sedimentology and tectonic interpretation for the origin of the Late Cretaceous El Tuli Formation in northern Sonora, Mexico: El Paso, Texas, University of Texas at El Paso, disertación doctoral, 194 p. (inédita).
- García-Barragán, J.C., Jacques-Ayala, C., 2011**, Estratigrafía del Cretácico de Sonora, México, en Calmus, T. (ed.), Panorama de la geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín, 118, 113-199.

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

- García-Huerta J.A., 2015**, Geología del Cerro Libertad en la región de Puerto Libertad: Contribución al estudio petrológico del magmatismo orogénico en Sonora, México: *Tesis de Licenciatura en Geología, Universidad de Sonora*. 88pp.
- García-Martínez, D., Molina-Garza, R.S., Roldán-Quintana, J., Mendivil-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), 435–456.
- Gastil, G., y Krummenacher, D., 1977**, Reconnaissance geology of coastal Sonora between Puerto Lobos and Bahía Kino: *Geological Society of America Bulletin*, no. 2, p. 189-198.
- Gehrels, G.E., Valencia, V.A., Ruiz, J., 2008**, Enhanced precision, accuracy, efficiency, and spatial resolution of UPb ages by laser ablation–multicollector–inductively coupled plasma–mass spectrometry: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(3), 1–13.
- Gifkins, C., Herrmann, W., Large, R., 2005**, Altered volcanic rocks; a guide to description and interpretation: Centre for Ore Deposit Research, University of Tasmania, Australia, 275 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: Hermosillo, Sonora, México, Universidad de Sonora, Tesis de Maestría, 275 pp.
- 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*, v. XX, núm. X, p. XXX-XXX.
- González-León, C., McIntosh, W.C., Lozano-Santacruz, R., ValenciaMoreno, M., Amaya-Martínez, R., Rodríguez Castañeda, J.L., 2000**, Cretaceous and Tertiary sedimentary, magmatic, and tectonics evolution of north-central Sonora (Arizpe and Bacanuchi quadrangles), northwest Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 112(4), 600-611.
- González-León, C., Roldan-Quintana, J., Rodríguez, P. E., 1992**, Deformaciones Sevier y Laramide, su presencia en Sonora: *Boletín del Departamento de Geología, Universidad de Sonora*, 9(1), 1–18.

- González–León, C., Solari, L., Valencia-Moreno, M., Rascón-Heimpel, M.A., Solé, J., González-Becuar, E., Lozano-Santacruz, R., Pérez-Arvizu O., 2016**, Late Cretaceous to early Eocene magmatic evolution of the Laramide arc in the Nacozari quadrangle, northeastern Sonora, Mexico and its regional implications: *Ore Geology Reviews* xxx (2016) xxx–xxx.
- González-León, C.M., Solari, L., Solé, J., Ducea, M.N., Lawton, T.F., Bernal, J.P., González-Becuar, E., Gray, F., López-Martínez, M., Lozano-Santacruz, R., 2011**, Stratigraphy, geochronology, and geochemistry of the Laramide magmatic arc in north-central Sonora, Mexico: *Geosphere*, v. 7, no. 6, p. 1392-1418.
- Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A., y Mitchell, S.F., 2007**, Classification of altered island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th–Co discrimination diagram: *Journal of Petrology*, 48, 2341–2357.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1991**, Datos básicos de la Geografía de México, 142 pp.
- Ishikawa, Y., Sawaguchi, T., Iwaya, S., y Horiuchi, M., 1976**, Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism of underlying dacite and alteration halos: *Mining Geology*, v. 26, p. 105-17.
- Jacques-Ayala, C., 1983**, Sierra El Chanate, NW Sonora, Mexico—stratigraphy, sedimentology and structure: Cincinnati, Ohio, University of Cincinnati, tesis de maestría, 148 p. (inédita).
- Jacques-Ayala, C., 1989**, Arroyo Sásabe Formation (Aptian-Albian), northwestern Sonora, Mexico—marginal marine sedimentation in the Sonora back-arc basin: *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista*, v. 8, p. 171–178
- Jacques-Ayala, C., 1999**, Stratigraphy of El Chanate Group (Late Cretaceous) and its implications for the tectonic evolution on northwestern Sonora: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Sociedad Geológica Mexicana*: vol. 16, (2), pp. 97-120.
- Jacques-Ayala, C., Barth, A., Wooden, J.L., y Jacobson, C.E., 2009**, Provenance and U-Pb geochronology of the El Chanate Group (Late Cretaceous), northwestern Sonora, Mexico, and its tectonic significance: *International Geology Review*, v. 51, p. 1051–1077.
- Large, R.R., Gemmell, J.B., Paulick, H., and Huston, D.L., 2001b**, The alteration box plot: A simple approach to understanding the relationships between alteration mineralogy

- and lithogeochemistry associated with VHMS deposits: *Economic Geology*, v. 96, p. 957-971.
- Leake, B.E., Hendry, G.L., Kemp A., Plant, A. G., Harvey, P.K., Wilson, J.R., Coats, J.S., Aucott, J.W., Lunel, T. & Howarth, R.J., 1969**, The chemical analysis of tock powders by automated X-ray fluorescence: *Chemical Geology*, 5, p. 7-86.
- Livingston, D.E., 1973**, Geology, K-Ar ages and Sr isotopy at La Caridad, Nacozari district, Sonora, Mexico: Tucson, Arizona, University of Arizona, M.S. thesis, 31pp.
- Mackenzie W.S., Donaldson C.H., Guilford C. 1982**, Atlas of Igneous Rocks and their Textures: London, Longford. 148p.
- Martin, H., Smithies, R., Rapp, R., Moyen, J.F., Champion, D., 2005**, An overview of adakite, tonalite–trondhjemite–granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos* 79, 1–24.
- McDowell, F.W., Roldán-Quintana, J., Connelly, J.N., 2001**, Duration of Late Cretaceous–early Tertiary magmatism in east-central Sonora, México: *Bulletin of the Geological Society of America*, 113(4), 521-531.
- McDowell, F.W., y Roldán-Quintana, J., 1993**, Geochronology of Mesozoic–Cenozoic magmatism in southcentral Sonora: A progress report: III. Simposio de la Geología de Sonora y áreas adyacentes, Libro de Resúmenes, p. 77–80.
- Meinert, L.D., 1982**, Skarn, manto, and breccia pipe formation in sedimentary rocks of the Cananea mining district, Sonora, México: *Economic Geology*, 77, 919-949.
- Morales-Morales, H., Hernández-Rábago P.Y., Cendejas-Cruz F., Vázquez-Mendoza R., 2007**, Carta Geológico-Minera El Caracol H12-A85 escala 1:50 000: SGM (Servicio Geológico Mexicano).
- Nicolae, I., Saccani, E., 2003**, Petrology and geochemistry of the Late Jurassic calcalkaline series associated to Middle Jurassic ophiolites in the South Apuseni Mountains (Romania): *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen* 83, 81–96.
- Noguez-Alcántara B., Valencia-Moreno M., Roldán-Quintana J., Calmus T., 2007**, Enriquecimiento supergénico y análisis de balance de masa en el yacimiento de pórfido cuprífero Milpillas, Distrito Cananea, Sonora, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 24:368–388.

- Norrish, K. & Hutton, J. T., 1969**, An accurate X-ray spectrographic method for the analysis of a wide range of geological samples: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 33, p. 431-453.
- Obiora, S.C., y Charan, S.N., 2011**, Tectonomagmatic origin of some volcanic and sub volcanic rocks from the Lower Benue rift, Nigeria: *Chinese Journal of Geochemistry*, Volume 30, Number 4, pp. 507-522.
- Pearce, J.A., 1983**, Role of sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth, C.J., Norry, M.J. (Eds.), *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*: Shiva, Nantwich, pp. 230–249.
- Pearce, J.A., Norry, M.C., 1979**, Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks: *Contributions to Mineralogy and Petrology* 69, 33–47.
- Peccerillo A., Taylor, S. R., 1976**, Geochemistry of Eocene cal-alkaline volcanic Rocks from the kastamonu area, Northern Turkey: *Contributions to Mineralogy and Petrology* 58, p. 63-81.
- Pérez-Segura, E., González-Partida, E., Valencia, V.A., 2009**, Late Cretaceous adakitic magmatism in East-central Sonora, Mexico, and its relation to Cu-Zn-Ni-Co skarns: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 26, 411-427.
- Polat, A., Appel, P.W.U., Frei, R., Pan, Y., Dilek, Y., Ordonez-Caldeeron, J.C., Fryer, B., Raith, J.G., 2007**, Field and Geochemical Characteristics of the Mesoarchean (~3075 Ma) Ivisartaq Greenstone Belt, Southern West Greenland: Evidence for Seafloor Hydrothermal Alteration in a Supra-Subduction Oceanic Crust: *Gondwana Research* 11, 69–91.
- Pubellier M., Y Rangin, C., 1987**, Mise en évidence d'une phase céno-mano-turonienne en Sonora central (Mexique), Consequences sur les relations structurales entre domaine cordillérain et domaine téthysien: *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, t. 305, Sene II, p. 1093-1098.
- Pubellier, M., Rangin, C., Rascón, B., Chorowicz, J., Bellon, H., 1995**, Cenomanian thrust tectonics in the Sahuaripa region, Sonora: implications about northwestern megashears, in Jacques-Ayala, C., González-León, C.M., Roldán-Quintana, J., Eds., *Studies in the mesozoic of Sonora and adjacent areas*: Boulder, Geological Society of America Special Paper 301, 111-120.
- Ramos-Velázquez, Calmus, T., Valencia, V., Iriando, 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*, v. 25 (2), p. 314-333.
- Rascón-Heimpel, M.A., 2011**, Reconstrucción geológica y metalogenética del prospecto de pórfido cuprífero Los Alisos, Distrito Minero de la Caridad, Sonora, México: Hermosillo, Sonora, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría, 89pp.
- Rascón-Heimpel, M.A., Valencia-Moreno, M., Ocho-Landín, L., y Calmus, T., 2012**, Geología y geoquímica del pórfido cuprífero Los Alisos, Distrito Minero de La Caridad, Sonora, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 29, 355-383.
- Rodríguez-Castañeda, J.L., 1994**, Geología del área el Teguachi, Estado de Sonora, Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 11, no. 1, p. 11–28.
- Roldán-Quintana, J., 1994**, Geología del Sur de la Sierra de Oposura, Moctezuma, Estado de Sonora, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 11, 1-10.
- Roldán-Quintana, J., 2002**, Caracterización geológico–geoquímica y evolución del arco magmático Mesozoico–Terciario entre San Carlos y Maycoba, sur de Sonora: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral, 185 pp.
- 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*.
- Roldán-Quintana, J., McDowell, F.W.; y Valencia-Moreno, Martín, 2002**, Datos geoquímicos e isotópicos de las rocas volcánicas de la Formación Tarahumara en el sur de Sonora: *GEOS*, v. 22, núm. 2, p. 239.
- Rollinson, Hug R., 1993**, Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation: Pearson Education Limited, p. 10-11.
- Rudnick, R.L., Fountain, D.M., 1995**, Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective: *Reviews of Geophysics* 33, 267–309.
- Salvatierra-Domínguez, E., 2000**, Petrografía y geoquímica de los depósitos tipo pórfido cuprífero de la Fortuna de Cobre y el Americano, en el noroeste de México: Hermosillo, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, tesis de maestro en ciencias, 91 pp.
- Seagart, W. E., Sell, J. D., Kilpatrick, B. E., 1974**, Geology and mineralization of La Caridad porphyry copper deposit, Sonora, Mexico: *Economic Geology*, 67 1069-1077.

- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2006**, Informe de la Carta Geológico Minera y Geoquímica, Suaqui Grande H12-D74, Escala 1: 50,000, Estado de Sonora: México D.F., Secretaría de Economía.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2008**, Preliminary evaluation of potreritos project Yécora, Sonora, México, Estado de Sonora: México D.F., Secretaría de Economía.
- Sun, S.S., McDonough, W., 1989**, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications 42, 313–345.
- Sláma, J., Košler, J., Condon, D.J., Crowley, J.L., Gerdes, A., Hanchar, J.M., Horstwood, M.S.A., Morris, G.A., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M.N., Whitehouse, M.J., 2008**, Plešovice zircon — A new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis: Chemical Geology, 249, 1–35.
- Valencia, V.A., Noguez-Alcántara, B., Barra, F., Ruiz, J., Gehrels, G., Quintanar, F., Valencia-Moreno, M., 2006**, Re-Os molybdenite and LA-ICPMS-MC U-Pb circon geochronology for the Milpillas porphyry copper deposit: insights for the timing of mineralization in the Cananea District, Sonora, Mexico: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 23:39–53.
- Valencia-Gómez, V., 2005**, Evolution of La Caridad porphyry copper deposit, Sonora and geochronology of porphyry copper deposits in northwest Mexico: Tucson, Arizona, The University of Arizona, Ph. D. thesis, 197 p.
- Valencia-Moreno, M., Ruiz, J., Barton, M. D., Patchett, P. J., Zürcher, L., Hodkinson, D., Roldán-Quintana, J. 2001**, A chemical and isotopic study of the Laramide granitic belt of northwestern Mexico: identification of the southern edge of the North American Precambrian basement: Geological Society of America Bulletin, 113, 1409-1422.
- Valencia-Moreno M., Ortega-Rivera M. 2011**, Cretácico Tardío-Eoceno medio en el noroeste de México—evolución del arco magmático continental y su contexto geodinámico (orogenia Laramide): Boletín del Instituto de Geología, UNAM 118:201-226.
- Valentine, W.G., 1936**, Geology of the Cananea Mountains, Sonora, Mexico: Geological Society of America Bulletin, v. 47, p. 53-86.

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

- Valenzuela-Navarro, L.C., Valencia-Moreno, M., Calmus, T., Ochoa-Landín, L., y González-León, C., 2005**, Marco geológico del pórfido de molibdeno El Crestón, Sonora central, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 22, p. 345-357.
- Verdugo-Mariscal, F., 1985**, Aporte al estudio de la Geología Histórica del Noroeste de Sonora: Notas Geológicas del Boletín de la asociación de egresados de geología de la Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora. Publicación no. 6.
- Wetherill, G. W., 1956**, Discordant uranium-lead ages: Transactions of the American Geophysical Union, vol. 37, núm. 2, p. 320-326.
- Wilson, F.I., Rocha, S.V., 1949**, Coal deposits of the Santa Clara district near Tónichi, Sonora, México: United States Geological Survey Bulletin, 962A, 80 pp.
- Wilson, M., 1989**, Igneous Petrogenesis: Unwin Hyman, London 466 pp.
- Winchester, J. A., & Floyd, P. A., 1976**, Geochemical magma type discrimination: application to altered and metamorphosed basic igneous rocks: Earth and Planetary Science Letters, 28, 459–469.
- Wodzicki, W., 1995**, The evolution of Laramide igneous rocks and porphyry copper mineralization in the Cananea district, Sonora, Mexico: Tucson, University of Arizona, Ph.D. Thesis, 181 p.
- Yang, J.H., Wu, F.Y., Wilde, S.A., Zhao, G.C., 2008**, Petrogenesis and geodynamics of Late Archean magmatism in eastern Hebei, eastern North China Craton: geochronological, geochemical and Nd–Hf isotopic evidence: Precambrian Research 167, 125–149.
- Zúñiga-Hernández, L.G., 2010**, Estudio geológico, geoquímico y metalogenético del cuadrángulo Huépac-Moctezuma, centro noreste de Sonora, México: Hermosillo, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, tesis de maestro en ciencias, 101 p.

ANEXOS

García-Huerta J.A. 2015-2017

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

ANEXOS

1.- Base de datos exclusiva de rocas volcánicas del Cretácico Tardío en Sonora.

Tabla AN1.- Tabla exclusiva de rocas volcánicas, la cual muestra la ubicación, edad y otras características; fue construida a partir de la recopilación de la literatura del Cretácico Tardío – Eoceno Temprano del estado de Sonora. Los datos están ordenados por edad en orden creciente. La abreviatura mostrada en la tabla corresponde a: **A** andesita; **AB**; andesita basáltica; **TA** traquiandesita; **D** dacita; **TD** traquidacita; **RD** riodacita; **L** latita; **R** riolita; **V** volcánica; **FT** Formación Tarahumara; **FM** Formación Mesa; **GEC** Grupo El Chanate; **FET** Formación El Tuli.

Clave	Tipo de roca	Edad	Método	Mineral	Formación estratigráfica	Geoquímica	Isotopos	Alteración	Localidad Ubicación	Referencia	
1	UAKA 78-20	R	40.6 ± 1.1	K-Ar	roca total	FT	x	x	x	Mina Oposura	Damon et al., (1983)
2	x	A	43.2 ± 1.1	K-Ar	roca total	FT	x	x	x	La florida	Damon et al., (1983)
3	SR-63B	D	43.7 ± 0.2	Ar-Ar	plagioclasa	FT	x	x	x	Santa Rosa	Gans, (1997)
4	x	R	51±1.1	K-Ar	ortoclasa	FT	x	x	x	Mina San Felipe	Damon et al., (1983)
5	x	L	51.3 ± 1.0	K-Ar	x	FT	x	x	x	La Caridad Antigua	Livingston, (1973)
6	x	L	52.5± 1.3	K-Ar	biotita	FT	x	x	x	Mina La Caridad	Damon et al., (1983)
7	x	V	52.9 ± 0.9	K-Ar	roca total	FT	x	x	x	x	Pubellier et al., (1995)
8	SR-15	R	54.3 ± 0.92	Ar-Ar	plagioclasa	FT	x	x	x	Santa Rosa	Gans, (1997)
9	SO13	R	55.3 ± 2.1	K-Ar	biotita	FT	x	x	x	28° 27' 28'' N 109° 21' 32'' E	Roldán-Quintana et al., (2009)
10	x	A	56.7± 1.2	Ar-Ar	biotita	FT	x	x	x	573087E 3413081N	Damon et al., (1983)
11	SO-39	R	56.8 ± 0.9	K-Ar	biotita	FT	x	x	x	28° 24' 15'' N 109° 14' 13'' E	Roldán-Quintana et al., (2009)
12	9-9-11-3	R	57.1 ± 0.4	U-Pb	Circón	FT	x	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
13	x	D	58.67 ± 0.17	Ar-Ar	biotita	FT	x	x	x	Arizpe	González-León et al., (2000)
14	SR-91	A	60 ± 0.5	Ar-Ar	plagioclasa	FT	x	x	x	Santa Rosa	Gans, (1997)
15	6-9-13-7	R	60.9 ± 0.4	U-Pb	circón	FT	x	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

16	1-26-12-6	R	60.3 ± 0.4	U-Pb	circón	FT	√	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
17	SO-97	A	61.2 ± 3.4	K-Ar	plagioclasa	FT	x	x	x	28° 24' 45'' N 109° 05' 10'' E	Roldán-Quintana et al., (2009)
18	SO-51	D	62.5 ± 1.5	K-Ar	feldespato	FT	x	x	x	La Dura	Roldán-Quintana, (2002)
19	KI-04-08	A	62.5 ± 1.5	K-Ar	roca total	FT	x	x	x	Kino Nuevo-Punta Chueca	Ramos-Velázquez et al., (2008)
20	10-10-13-3	R	63.0 ± 0.6	U-Pb	circón	FT	x	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
21	4-23-09-5	R	63.5 ± 1.4	U-Pb	circón	FT	x	x	x	597200 E 3305069 N	González-León et al., (2011)
22	SOK-276	D	63.9 ± 2.0	K-Ar	biotita	FT	x	x	x	Puerto Libertad	Gastil y Krummenacher, (1977)
23	LP	TA	64.2 ± 0.8	U-Pb	circón	FT	√	x	x	Pilares	Rascón-Heimpel et al., (2012)
24	300507-1	TA	64.2 ± 0.8	U-Pb	circón	FT	x	x	x	Pilares	Rascón-Heimpel, (2011)
25	A-1	A	64.2 ± 2.5	U-Pb	circón	FM	x	x	x	La Caridad	Valencia-Gómez, (2005)
26	6-19-13-2	A	64.3 ± 0.3	U-Pb	circón	FT	x	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
27	300507-3	AB	64.3 ± 0.9	U-Pb	circón	FT	x	x	x	Pilares	Rascón-Heimpel, (2011)
28	AP	AB	64.3 ± 0.9	U-Pb	circón	FT	x	x	x	Pilares	Rascón-Heimpel et al., (2012)
29	CR I 25	A	65.7 ± 3.3	K-Ar	roca total	FT	x	x	x	Arivechi	Pubellier et al., (1995)
30	x	RD	65.8 ± 0.4	Ar-Ar	biotita	FM	x	x	x	Cananea	Cox et al., (2006)
31	x	V	65.9 ± 0.4	K-Ar	roca total	FT	x	x	x	Cerro Las Conchas	Pubellier y Rangin, (1987)
32	x	RD	66.0 ± 0.4	Ar-Ar	biotita	FT	x	x	x	El Alacrán	USGS
33	SO-36	D	66.2 ± 2.0	U-Pb	circón	FT	x	x	x	La Dura	Mc Dowell y Roldán-Quintana, (1993)
34	x	X	67.4 ± 3.4	K/Ar	roca total	FM	x	x	x	Cananea	Meinert, (1982)
35	8-26-11-1	R	68.0 ± 0.7	U-Pb	circón	FT	√	√	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
36	4-23-09-12	D	68.5 ± 2	U-Pb	circón	FT	x	x	x	593822 E 3298900 N	González-León et al., (2011)
37	x	RD	69 ± 0.2	Ar-Ar	biotita	FM	x	x	x	Cananea	Wodzicki, (1995)

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

38	x	x	69.0 ± 0.2	Ar-Ar	x	FM	x	x	x	Cananea	Wodzicki, (2001)
39	X	D	69.1 ± 0.40	Ar-Ar	biotita	FM	x	x	x	30°53'13" N 110°13'00" E	USGS
40	X	D	69.1 ± 0.4	Ar-Ar	biotita	FM	x	x	x	Cananea	Cox et al., (2006)
41	11-4-12-3	R	69.1 ± 0.6	U-Pb	circón	FT	x	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
42	3-30-09-13	R	69.1 ± 2.4	U-Pb	circón	FT	x	x	x	590806 E 3317626 N	González-León et al., (2011)
43	SO43	R	69.7 ± 0.6	U-Pb	circón	FT	x	x	x	Onavas	McDowell et al., (2001)
44	3-5-08-2	R	70.02 ± 1.5	U-Pb	circón	FT	x	x	x	577038 E 3333810 N	González-León et al., (2011)
45	SO79	X	70.2 ± 0.6	U-Pb	circón	FT	x	x	x	Suaqui	McDowell et al., (2001)
46	X	X	71± 0.35	Ar-Ar	sanidina	FM	x	x	x	31° 10' 17"N 110° 15' 47"	USGS
47	X	A	71.6 ± 0.7	Ar-Ar	hornblenda	GEC	x	x	x	Sierra El Chanate	Jacques-Ayala et al., (1993)
48	1-28-09	R	71.7 ± 1.7	U-Pb	circón	FT	x	x	x	561534 E 3345455 N	González-León et al., (2011)
49	x	A	72.1± 0.4	Ar-Ar	biotita	FM	x	x	x	Bacoachi	USGS
50	11-25-09-6	RD	72.20 +1.60	U-Pb	circón	FT	x	x	x	625743 E 3295070 N	González-León et al., (2011)
51	SO44	X	72.5 ± 0.5	U-Pb	circón	FT	x	x	x	Onavas	McDowell et al., (2001)
52	SO37	X	72.6 ± 0.8	U-Pb	circón	FT	x	x	x	Onavas	McDowell et al., (2001)
53	x	D	72.6± 1.2	Ar-Ar	biotita	FM	x	x	x	572635E 3419487N	Cox et al., (2006)
54	x	A	72.6 ± 1.2	Ar-Ar	biotita	FM	x	x	x	Cananea	USGS
55	11-16-07-4	R	73.56 ± 1.3	U-Pb	circón	FT	x	x	x	581246 E 3322656 N	González-León et al., (2011)
56	x	x	73.4 ± 0.18	Ar-Ar	sanidina	FT	x	x	x	31° 14' 57" N 110° 22'18"E	USGS
57	300507-5	A	73.6 ± 1.0	U-Pb	circón	FT	x	x	x	Los Alisos	Rascón-Heimpel, (2011)
58	LAa	A	73.6 ± 1.0	U-Pb	circón	FT	x	x	x	Los Alisos	Rascón-Heimpel et al., (2012)

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

59	11-4-12-1	R	73.8 ± 0.5	U-Pb	circón	FT	√	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
60	12-5-08-2	R	73.8 ± 1.6	U-Pb	circón	FT	x	x	x	553442 E 3338772 N	González-León et al., (2011)
61	CRM 0	A	73.8 ± 3.7	K-Ar	roca total	FT	x	x	x	Arivechi	Pubellier et al., (1995)
62	6-8-13-3	D	74.1 ± 0.6	U-Pb	circón	FT	x	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
63	6-18-13-6	R	74.3 ± 0.5	U-Pb	circón	FT	√	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
64	9-18-07-2	R	74.30 ± 1.3	U-Pb	circón	FT	x	x	x	580721 E 3327213 N	González-León et al., (2011)
65	11-19-07-1	R	74.64 ± 1.5	U-Pb	circón	FT	x	x	x	585366 E 3329548 N	González-León et al., (2011)
66	x	x	74.6 ± 3.7	K-Ar	roca total	FT	x	x	x	Cerro Las Conchas	Pubellier and Rangin, (1987)
67	11-4-12-5	R	74.7 ± 0.4	U-Pb	circón	FT	√	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
68	2-27-08-4	RD	75.10 ± 1.2	U-Pb	circón	FT	x	x	x	590478 E 3326460 N	González-León et al., (2011)
69	4-7-08-1	RD	75.70 +0.30	U-Pb	circón	FT	x	x	x	587699 E 3363535 N	González-León et al., (2011)
70	11-26-09-3	D	75.75 +0.55	U-Pb	circón	FT	x	x	x	619652 E 3292210 N	González-León et al., (2011)
71	x	R	76	U-Pb	circón	FET	x	x	x	Cerro La Cuchilla	García y Barragán, (2003)
72	3-3-09-7	RD	76.0 ± 2.7	U-Pb	circón	FT	x	x	x	584409 E 3331196 N	González-León et al., (2011)
73	6-13-13-2	R	76.8 ± 0.4	U-Pb	circón	FT	√	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
74	11-26-09-4	R	78.7 ± 1.3	K-Ar	biotita	FT	x	x	x	609823 E 3287485 N	González-León et al., (2011)
75	S1G-5	A	85.1 ± 1.7	K-Ar	hornblenda	FT	x	x	x	Bahía Kino	Gastil y Krummenacher, (1977)
76	SO78	x	89.0 ± 0.8	U-Pb	circón	FT	x	x	x	Suaqui	McDowell et al., (2001)
77	SO66	x	90.1 ± 0.7	U-Pb	circón	FT	x	x	x	Suaqui	McDowell et al., (2001)
78	CL15-01	A	x	x	x	FT	√	x	x	Puerto Libertad	García-Huerta, (2015)

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

79	CL15-02	A	x	x	x	FT	√	x	x	Puerto Libertad	García-Huerta, (2015)
80	CL15-32	D	x	x	x	FT	√	x	x	Puerto Libertad	García-Huerta, (2015)
81	CL15-33A	D	x	x	x	FT	√	x	x	Puerto Libertad	García-Huerta, (2015)
82	1-99	A	x	x	x	FT	√	x	x	Sonora este y central	Roldán-Quintana et al., (2009)
83	106-90	A	x	x	x	FT	√	x	x	Sonora este y central	Roldán-Quintana et al., (2009)
84	109-90	A	x	x	x	FT	√	x	x	Sonora este y central	Roldán-Quintana et al., (2009)
85	58-96	A	x	x	x	FT	√	x	x	Sonora este y central	Roldán-Quintana et al., (2009)
86	For-2	A	x	x	x	FT	√	x	x	Fortuna del Cobre	Salvatierra-Domínguez, (2000)
87	For-3	A	x	x	x	FT	√	x	x	Fortuna del Cobre	Salvatierra-Domínguez, (2000)
88	For-5	A	x	x	x	FT	√	x	x	Fortuna del Cobre	Salvatierra-Domínguez, (2000)
89	For-7	x	x	x	x	FT	√	x	x	Fortuna del Cobre	Salvatierra-Domínguez, (2000)
90	For-8	x	x	x	x	FT	√	x	x	Fortuna del Cobre	Salvatierra-Domínguez, (2000)
91	For-25	A	x	x	x	FT	√	x	x	Fortuna del Cobre	Salvatierra-Domínguez, (2000)
92	For-22	A	x	x	x	FT	√	x	x	Fortuna del Cobre	Salvatierra-Domínguez, (2000)
93	For-23	A	x	x	x	FT	√	x	x	Fortuna del Cobre	Salvatierra-Domínguez, (2000)
94	Ame-3	A	x	x	x	FT	√	x	x	El Americano	Salvatierra-Domínguez, (2000)
95	Ame-24	D	x	x	x	FT	√	x	x	El Americano	Salvatierra-Domínguez, (2000)
96	Ame-28	D	x	x	x	FT	√	x	x	El Americano	Salvatierra-Domínguez, (2000)
97	LT-04	TD	x	x	x	FT	√	x	x	Huepac	Zúñiga-Hernández, (2010)
98	LT-05	TD	x	x	x	FT	√	x	x	Huepac	Zúñiga-Hernández, (2010)
99	LT-10	TD	x	x	x	FT	√	x	x	Huepac	Zúñiga-Hernández, (2010)
100	LCU-01	R	x	x	x	FT	√	x	x	Huepac	Zúñiga-Hernández, (2010)
101	LCU-02	R	x	x	x	FT	√	x	x	Huepac	Zúñiga-Hernández, (2010)
102	LCU-06	R	x	x	x	FT	√	x	x	Huepac	Zúñiga-Hernández, (2010)
103	LCU-07	R	x	x	x	FT	√	x	x	Huepac	Zúñiga-Hernández, (2010)

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

104	LCU-08	R	x	x	x	FT	√	x	x	Huepac	Zúñiga-Hernández, (2010)
105	IF1-18	A	x	x	x	FT	√	x	x	Suaqui Grande	Flores-Vásquez, (2006)
106	IF1-1B	A	x	x	x	FT	√	x	x	Suaqui Grande	Flores-Vásquez, (2006)
107	IF2-04	A	x	x	x	FT	√	x	x	Suaqui Grande	Flores-Vásquez, (2006)
108	IF2-71	D	x	x	x	FT	√	x	x	Suaqui Grande	Flores-Vásquez, (2006)
109	IF2-77	R	x	x	x	FT	√	x	x	Suaqui Grande	Flores-Vásquez, (2006)
110	Dique-228	B	x	x	x	FM	√	x	x	Cananea	Wodzicki, (1995)
111	F Ma- 109	A	x	x	x	FM	√	x	x	Cananea	Wodzicki, (1995)
112	LF Me-156	D	x	x	x	FM	√	x	x	Cananea	Wodzicki, (1995)
113	MF Me-144	D	x	x	x	FM	√	x	x	Cananea	Wodzicki, (1995)
114	UF Me-127	D	x	x	x	FM	√	x	x	Cananea	Wodzicki, (1995)
115	6-6-13-4	A	x	x	x	FT	√	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
116	6-13-13-4	R	x	x	x	FT	√	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
117	6-13-13-6	R	x	x	x	FT	√	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
118	6-14--13-1	A	x	x	x	FT	√	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
119	6-19-13-2	A	x	x	x	FT	√	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
120	8-19-13-7	R	x	x	x	FT	√	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
121	8-23-11-4	A	x	x	x	FT	√	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
122	11-7-11-2	A	x	x	x	FT	√	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
123	11-7-11-13	A	x	x	x	FT	√	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
124	8-23-11-8	A	x	x	x	FT	√	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
125	11-7-11-7	AB	x	x	x	FT	√	√	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
126	1-27-12-2	A	x	x	x	FT	√	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)
127	11-27-12-7	A	x	x	x	FT	√	x	x	Nacozari	González-León et al., (2016)

2.- Datos geoquímicos de la base de datos

Tabla AN2.- Tabla de datos geoquímicos, recabados mediante la recopilación de información basada en la literatura del vulcanismo Cretácico Tardío en Sonora. La abreviatura mostrada en la tabla corresponde a: **B** basalto; **A** andesita; **AB**; andesita basáltica; **TA** traquiandesita; **D** dacita; **R** riolita.

Región norte						Nacozari		Nacozari					
Wodzicki, (1995) Cananea						Rascón-Heimpel et al., 2012		González-León et al., (2016)					
Muestra	Dique-228	F Ma- 109	LF Me-156	MF Me-144	UF Me-127	Muestra	LP	Muestra	6-13-13-2	6-13-13-4	6-13-13-6	6-14-13-1	6-18-13-6
Roca	B	AB	D	D	D	Roca	TA	Roca	R	R	R	A	R
Mayores %						Mayores %		Mayores %					
SiO ₂	47.0	51.5	54.3	51.5	65.1	SiO ₂	76.8	SiO ₂	71	75.88	72.31	61.58	74.39
Al ₂ O ₃	16.0	16.2	18.3	16.5	14.8	Al ₂ O ₃	13.4	Al ₂ O ₃	15.23	12.51	13.42	17.74	14.3
MgO	9.23	4.34	3.57	3.53	2.18	MgO	0.43	MgO	0.46	0.29	0.31	2.76	0.17
CaO	9.54	4.26	5.89	6.16	2.19	CaO	0.04	CaO	1.6	0.66	2.16	3.27	0.15
Na ₂ O	2.10	4.37	4.31	3.40	3.48	Na ₂ O	0.22	Na ₂ O	3.22	1.61	3.33	4.07	1.08
K ₂ O	1.76	3.80	1.13	2.68	4.18	K ₂ O	4.73	K ₂ O	4.76	4.35	2.62	3.08	6.07
F ₂ O _{3t}	10.80	11.90	6.34	7.53	3.79	F ₂ O _{3t}	1.67	Fe ₂ O ₃	2.23	1.47	1.92	5.36	1.6
TiO ₂	0.99	1.52	0.91	0.82	0.55	TiO ₂	0.28	TiO ₂	0.24	0.37	0.35	0.75	0.2
MnO	0.22	0.21	0.17	0.17	0.07	MnO	0	MnO	0.04	0.02	0.06	0.1	0.02
P ₂ O ₅	0.00	0.38	0.26	0.23	0.19	P ₂ O ₅	0.07	P ₂ O ₅	0.04	0.09	0.07	0.18	0.03
LOI	0.50	0.60	3.90	6.85	3.10	PxC	2.71	LOI	0.81	2.01	2.92	2.08	1.62
Total	98.14	99.08	99.08	99.37	99.63	Total	100.35	Total	99.63	99.26	99.47	100.97	99.63
Trazas (PPM)						FeOt	1.5	Trazas y REE					

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

Ba	220	970	450	400	1700	#Mg	33.82	V	24	22.7	8.99	115.5	10.8
Cu	44	54	6	43	31	A/CNK	2.41	Cr	7.75	3.31	2.84	14	2.83
Ni	79	26	33	26	13	A/NK	2.44	Co	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Rb	110	180	60	150	160	Trazas (PPM)		Ni	3.15	1.19	0.92	10.45	0.92
Sr	230	270	1390	370	390	Rb	253	Cs	9.02	8.21	6.3	2.89	29.32
Zr	80	170	140	200	170	Sr	68	Hf	3.64	5.97	5.4	4.32	11.78
Y	20	40	20	20	<10	Ba	1283	Ta	1.07	1	0.75	n.a.	n.a.
Nb	<10	10	10	10	10	Y	40	Cu	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
K/Rb	160.00	211	188	179	261	Zr	147	Zn	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Rb/Sr	0.48	0.67	0.04	0.41	0.41	Nb	13	Rb	166.49	155.74	59.65	76.94	402.47
Ba/Rb	2.00	5.39	7.50	2.67	10.63	V	16	Sr	202.04	77.06	400.4	491.56	56.04
REE (PPM)						Cr	<2	Y	26.68	23.98	22.81	18.36	51.76
La	7.43	16.31	n.a.	n.a.	n.a.	Co	6	Sc	5.88	4.23	3.26	9.67	5.4
Ce	19.47	59.43	n.a.	n.a.	n.a.	Ni	5	Zr	121.04	230.42	224.92	169.32	407.49
Nt	9.81	24.53	n.a.	n.a.	n.a.	Cu	4	Nb	13.95	13.62	10.96	9.52	34.29
Sm	2.72	6.17	n.a.	n.a.	n.a.	Zn	6	Ba	895.97	972.53	1918.05	896.09	2141.95
Eu	0.84	0.75	n.a.	n.a.	n.a.	Th	8	Pb	27.92	12.96	8.55	12.82	15.57
Gd	2.83	5.28	n.a.	n.a.	n.a.	Pb	7	Th	13.92	22.69	12.47	11.19	37.07
Tb	0.54	1.04	n.a.	n.a.	n.a.	REE (PPM)		Sn	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Dy	3.33	6.65	n.a.	n.a.	n.a.	La	23.27	W	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ho	0.79	1.31	n.a.	n.a.	n.a.	Pr	4.79	U	4.84	6.24	3.67	3.33	10.61
Er	2.23	3.82	n.a.	n.a.	n.a.	Nd	17.09	La	31.83	34.22	27.56	26.22	76.66
Yb	2.07	3.4	n.a.	n.a.	n.a.	Sm	2.93	Ce	61.77	63.05	52.83	51.21	150.6
Lu	0.34	0.64	n.a.	n.a.	n.a.	Eu	1.15	Pr	7.2	7.14	6.1	6.21	17.69
Min Normativos						Gd	2.24	Nd	25.31	24.33	21.82	23.17	61.31

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

Cuarzo	0.00	0.00	5.31	2.32	21.1	Tb	0.26	Sm	5.08	4.6	4.19	4.6	11.74
Corindón	0.00	0.00	0.00	0.00	1.02	Dy	1.42	Eu	0.72	0.79	0.84	1.1	1.46
Ortoclasa	10.4	22.46	6.68	17.12	24.70	Ho	0.29	Gd	4.57	4.01	3.85	3.95	9.95
Albita	17.77	33.71	36.47	31.10	29.45	Er	0.68	Tb	0.73	0.63	0.61	0.57	1.57
Anhortita	29.03	13.36	27.25	23.61	9.62	Tm	0.12	Dy	4.46	3.81	3.76	3.27	9.55
Diópsido	10.72	2.40	0.15	3.83	0.00	Yb	0.79	Ho	0.89	0.79	0.78	0.64	1.88
Hedenbergita	4.04	1.97	0.08	2.56	0.00	Lu	0.15	Er	2.55	2.32	2.24	1.73	5.38
Enstatita	1.11	0.00	8.82	7.73	5.43	SREE	104.1	Tm	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ferrosilita	0.48	0.00	5.32	5.92	0.79	EuN/EuN*	1.39	Yb	2.64	2.5	2.32	1.71	5.31
Forsterita	11.85	6.80	0.00	0.00	0.00	CeN/YbN	16.6	Lu	0.39	0.38	0.35	0.26	0.79
Fayalita	5.64	7.05	0.00	0.00	0.00								
Magnetita	3.91	4.31	2.30	2.95	2.75								
Ilmenita	1.88	2.89	1.73	1.68	1.04								
Apatito	0.00	0.88	0.60	0.58	0.44								
Total	96.83	95.83	94.71	99.40	96.34								
Color Index	39.63	25.41	18.39	24.67	10.01								
Diff.Index	57.2	69.53	75.71	74.14	84.87								

Continuación Tabla AN2.- Tabla de datos geoquímicos, recabados mediante la recopilación de información basada en la literatura del vulcanismo Cretácico Tardío en Sonora. La abreviatura mostrada en la tabla corresponde a: **A** andesita; **AB**; andesita basáltica; **R** riolita.

Región norte

González-León et al., (2016) Nacozari

Muestra	6-19-13-2	8-19-13-5	8-19-13-7	8-23-11-4	11-7-11-2	11-7-11-13	8-23-11-8	11-7-11-7	8-26-11-1	1-26-12-6	1-27-12-2	1-27-12-7	11-4-12-1
Roca	A	A	R	A	A	A	A	AB	R	R	A	A	R

Mayores %

SiO ₂	60.34	61.66	72.97	59.64	56.84	60.37	62.68	55.07	73.54	58.85	62.33	57.33	78.67
TiO ₂	0.82	0.77	0.44	0.8	0.65	0.68	0.71	1.09	0.23	0.78	0.67	0.9	0.3
Al ₂ O ₃	17.29	17.4	16.26	17.1	12.09	17.74	16.66	18.67	14.64	17.42	16.57	18.18	11
Fe ₂ O ₃	6.09	5.62	1.83	6.21	5.24	5.27	5.42	8.15	1.57	6.24	4.93	6.85	2.36
MnO	0.12	0.09	0.01	0.09	0.24	0.2	0.09	0.15	0.07	0.17	0.11	0.11	0.03
MgO	2.7	2.61	0.68	2.64	0.84	2.16	2.4	3.4	0.26	2.58	2.06	2.89	0.13
CaO	4.48	4.1	0.17	5.22	9.33	4.27	4.22	7.21	0.88	4.66	4.27	5.39	0.53
Na ₂ O	3.58	4.4	0.18	3.02	0.25	3.85	3.2	3.04	3.81	3.35	3.36	3.22	1.91
K ₂ O	3.28	2.93	3.54	3.14	6.35	2.71	3.65	1.57	4.5	2.68	3.13	2.64	4.39
P ₂ O ₅	0.23	0.18	0.08	0.17	0.27	0.16	0.13	0.21	0.03	0.17	0.16	0.21	0.06
LOI1	1.9	1.47	4.43	2.59	8.73	3	1.48	1.66	1.19	2.32	1.9	1.92	1.18
Total	100.83	101.23	100.59	100.62	100.83	100.41	100.64	100.22	100.72	99.22	99.49	99.64	100.56

Trazas y REE

V	116.87	110.63	37.05	133.14	76.61	85.5	126.93	196.86	9.17	138.35	98.23	148.9	28.84
Cr	11.01	13.67	4.32	n.a.	n.a.	n.a.	6.34	n.a.	n.a.	8.17	12.95	16.09	7.27
Co	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ni	6.21	9.36	1.33	19.76		2.41	25.58	34.29	7.34	12.05	14.58	17.24	3.67
Cs	2.89	4.35	11.21	10.79	8.22	5.64	9.17	2.05	10.22	2.92	3.39	11.06	6
Hf	5.66	4.22	4.94	4.81	2.58	5.42	6.01	4.12	3.88	4.39	4.98	5.22	3.34
Ta	0.82	0.67	1.18	0.43	n.a.	0.55	0.94	0.26	1.13	0.86	0.96	0.68	0.74
Cu	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Zn	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Rb	125.54	73.38	162.94	141.88	186.57	85.94	227.85	44.87	181.09	133.05	141.71	120.21	129.9
Sr	366.45	467.79	81.93	539.79	95.74	491.84	576.26	672.31	171.17	419.75	481.8	553.59	137.62

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

Y	25.34	17.07	17.04	23.04	19.49	27.72	28.71	25.93	20.21	23.33	22.36	22.76	11.33
Sc	10.66	8.63	3.86	14	10.08	10.36	16.25	19.76	8.83	11.87	9.63	14.06	1.75
Zr	218.94	168.48	185.95	174.6	116.06	246.27	249.56	163.89	125.83	159.79	185.57	196.06	125.73
Nb	10.53	9.21	14.09	9.13	5.14	10.96	11.87	7.55	16.19	10.06	10.9	8.89	11.08
Ba	758.3	866.56	522.22	765.7	1565.33	891.22	815.6	624.98	1291.12	671.57	734.8	677.9	982.71
Pb	13.25	13.32	36.41	14.13	12.91	46	17.2	9.24	15.72	20.12	18.08	8.11	18.65
Th	22.95	11.2	14.84	32.81	2.37	10.89	49.72	4.66	23.73	31.73	27.51	30.15	12.69
Sn	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
W	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
U	7.07	2.63	5.13	8.08	0.58	1.39	12.12	0.73	4.64	9.84	9.16	9.16	3.42
La	29.15	26.59	25.09	33.06	18.96	42.13	40.72	27.19	45.31	27.6	27.95	26	67.81
Ce	60.41	53.32	47.19	68.48	41.81	79.27	82.2	56.74	95.09	58.17	56.84	54.75	108.46
Pr	7.49	6.33	5.29	8.32	5.12	9.83	9.89	7.35	8.75	6.89	6.79	6.94	10.75
Nd	28	23.34	18.01	29.87	19.01	35.04	35.26	28.48	27.58	25.54	24.82	26.79	32.09
Sm	5.77	4.56	3.12	6	4.34	6.63	6.8	6.09	4.94	5.29	5.02	5.63	4.42
Eu	1.19	1.11	0.67	1.22	1.04	1.49	1.28	1.59	0.79	1.15	1.07	1.24	0.95
Gd	5.09	3.8	2.67	4.88	3.4	5.46	5.78	5.43	3.63	4.65	4.38	4.93	3.05
Tb	0.77	0.55	0.42	0.8	0.58	0.86	0.92	0.85	0.58	0.7	0.67	0.73	0.41
Dy	4.54	3.11	2.7	4.28	3.28	4.71	4.99	4.7	3.21	4.13	3.87	4.2	2.05
Ho	0.89	0.6	0.57	0.82	0.62	0.95	0.99	0.94	0.66	0.8	0.75	0.8	0.39
Er	2.47	1.62	1.75	2.17	1.66	2.58	2.56	2.45	1.81	2.22	2.1	2.18	1.09
Tm	n.a.	n.a.	n.a.	0.29	0.2	0.38	0.38	0.34	0.28	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Yb	2.45	1.54	2.07	1.99	1.35	2.5	2.46	2.26	1.95	2.25	2.13	2.05	1.15
Lu	0.36	0.24	0.33	0.3	0.19	0.39	0.36	0.34	0.29	0.33	0.32	0.31	0.18

Continuación Tabla AN2.- Tabla de datos geoquímicos, recabados mediante la recopilación de información basada en la literatura del vulcanismo Cretácico Tardío en Sonora. La abreviatura mostrada en la tabla corresponde a: **A** andesita; **D** dacita; **V** volcánica; **FT** Formación Tarahumara.

Región Norte									Región Central					Región Costera- NE de Puerto Libertad				
Zúñiga-Hernández, (2010) Huepac									Flores-Vásquez, (2006) Suaqui Grande					Salvatierra-Domínguez, (2000)				
Muestra	LT-04	LT-05	LT-10	LCU-01	LCU-02	LCU-06	LCU-07	LCU-08	Muestra	IF1-18	IF1-1B	IF2-04	IF2-71	IF2-77	Muestra	Ame-3	Ame-24	Ame-28
Roca	V	V	V	V	V	V	V	V	Roca	FT	FT	FT	FT	FT	Roca	A	D	D
Mayores %									Mayores %						Mayores %			
SiO ₂	62.44	64.57	61.53	74.19	66.80	68.80	68.54	72.06	SiO ₂	61.239	67.593	55.241	66.063	70.110	Al ₂ O ₃	13.11	16.71	15.53
TiO ₂	0.84	0.86	1.02	0.14	0.47	0.46	0.45	0.43	TiO ₂	0.683	0.525	0.915	0.481	0.300	CaO	0.26	1.14	2.59
Al ₂ O ₃	17.05	15.52	18.38	13.51	16.00	15.58	14.75	14.40	Al ₂ O ₃	16.550	15.418	17.160	17.110	14.396	Cr ₂ O ₃	0.01	0.01	0.01
Fe ₂ O ₃ t	4.39	3.90	3.55	1.43	3.44	3.38	3.19	2.37	Fe ₂ O ₃ t	5.222	3.840	8.449	3.029	1.546	Fe ₂ O ₃	4.07	3.69	2.13
MnO	0.07	0.10	0.14	0.07	0.02	0.03	0.04	0.01	MnO	0.143	0.076	0.222	0.070	0.062	K ₂ O	3.66	1.07	2.84
MgO	0.98	0.78	1.25	0.22	0.42	0.60	0.57	0.22	MgO	2.204	1.201	4.113	0.652	0.361	MgO	0.42	1.35	0.52
CaO	5.14	3.51	3.19	0.38	0.99	1.73	1.44	0.78	CaO	4.796	3.596	5.192	2.279	2.287	MnO	0.001	0.04	0.01
Na ₂ O	4.11	3.65	4.66	2.00	4.13	3.07	3.20	4.29	Na ₂ O	3.289	2.370	4.762	3.026	3.526	Na ₂ O	0.26	4.3	3.71
K ₂ O	2.90	3.89	3.75	6.98	6.41	5.63	5.57	4.20	K ₂ O	3.558	4.039	2.121	4.607	4.199	P ₂ O ₅	0.23	0.17	0.13
P ₂ O ₅	0.27	0.27	0.27	0.03	0.14	0.12	0.12	0.07	P ₂ O ₅	0.178	0.126	0.196	0.115	0.051	SiO ₂	70.92	66.27	68.44
PCX	1.01	0.84	1.04	0.66	0.56	0.63	0.52	0.77	CO ₂	1.770	0.790	1.020	1.940	2.820	TiO ₂	0.5	0.55	0.43
Total	99.19	97.87	98.77	99.61	99.38	100.03	98.39	99.6	Suma	99.632	99.574	99.391	99.372	99.658	LOI	5.59	3.37	2.17
Trazas (PPM)									A/CNK	1.421	1.541	1.421	1.726	1.438	Trazas (PPM)			
Ba	1000	1270	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	*A/CNK	0.920	1.041	0.877	1.213	0.993	U	3	3	2.5
Co	6.4	3.3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Trazas (PPM)						V	50	55	35
Cu	22	5	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Tm	0.3	0.1	0.3	0.3	0.3	Yb	1	0.9	1
Cr	10	10	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	U	4.5	3.5	1.5	4.5	5	Y	7.5	6	9.5

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

Ni	5	5	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	V	110	75	170	55	15	Zn	20	85	15
V	75	60	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	W	3	2	3	4	4	Zr	104.5	138	142
Zn	57	81	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Y	20.5	10.5	17	19.5	18.5	Pb	25	5	20
Zr	228	254	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Yb	2.2	1	1.5	2.2	2	Nd	15.5	24.5	24.5
Y	32.5	32.3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Zn	130	95	240	65	70	Nb	4	6	9
Nb	13	14	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Zr	194.5	127.5	107.5	219	198	Ta	0.5	0.5	1.5
Cs	14.1	6.8	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	REE (PPM)						Tb	0.3	0.4	0.4
Th	10.7	11.75	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Ba	975	1325	563	915	1005	Th	8	7	8
Ta	1	1.1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Ce	60	49.5	51	68.5	69.5	Sn	10	4	3
U	3.71	3.91	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Co	11.5	8.5	22	5	1.5	W	87	105	150
Hf	6.3	6.9	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Cr	10	40	20	10	<10	REE (PPM)			
Sn	4	2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Cs	3.7	24.6	18.7	13.5	11.5	Ba	807	250	1135
W	2	3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Cu	25	5	5	<5	5	Ce	33	57	68
Ga	20.1	19.1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Dy	3.7	1.9	3.2	3.3	3.1	Cs	1.4	2.8	0.8
Mo	2	2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Er	2.3	1.1	1.8	2.1	2	Co	13.5	29.5	23.5
REE (PPM)									Eu	1.1	0.8	1.2	1.1	0.9	Cu	160	1390	125
La	35.9	37.9	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Ga	18	19	20	20	16	Dy	1.4	1.5	1.6
Ce	74.5	77.9	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Gd	4.5	2.8	4.3	4.2	3.8	Er	1	0.5	1
Pr	9.27	9.57	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Hf	6	4	3	7	6	Eu	0.6	1	0.9
Nd	35.9	36.2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Ho	0.7	0.4	0.6	0.7	0.6	Gd	2.2	2.9	2.9
Sm	7.92	7.62	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	La	32	29	26.5	37	37.5	Ga	18	20	19
Eu	1.93	1.83	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Lu	0.3	0.1	0.2	0.3	0.3	Ho	0.3	0.2	0.3
Gd	7.64	7.46	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Mo	2	2	2	2	4	La	17	27.5	35.5
Tb	1.1	1.07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Nb	10	8	6	12	11	Pr	4.1	6.4	7.2
Dy	6.34	6.17	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Nd	25	18.5	23	24.5	24.5	Rb	109.5	48	74.8

Tesis Maestría en Ciencias Geología-UNISON

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

Ho	1.25	1.21	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Ni	5	15	10	25	5	Sm	3.4	4.1	4
Er	3.53	3.54	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Pb	35	55	25	20	30	Sr	118.5	745	692
Yb	3.14	3.3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Pr	6.9	5.3	6	7.3	7.4				
Lu	0.48	0.5	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Rb	135	148.5	92.6	221	193				
Rb	107	132.5	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Sm	4.6	2.9	4.3	4.4	4				
Sr	587	478	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Sn	4	4	4	5	4				
Min Normativos									Sr	459	286	522	354	261				
Qz	16.51	21.43	13.63	35.87	15.77	25.11	25.2	30.31	Ta	0.5	0.5	<0.5	0.5	0.5				
Or	17.24	23.46	22.4	41.36	38.07	33.22	33.41	24.89	Tb	0.6	0.3	0.6	0.6	0.5				
Ab	35.03	31.51	39.85	16.97	35.13	25.95	27.5	36.41	Th	15	18	6	19	20				
An	17.66	10.76	7.75	-2.47	0.55	3.89	3.2	-1.41	Min Normativos									
Hyp	6.91	5.88	6.34	2.3	4.78	5.16	4.95	2.93	Q	15.323	29.334	0.748	25.992	29.155				
Mt	0.87	0.78	0.7	0.28	0.68	0.66	0.64	0.47	or	21.553	24.208	12.821	27.974	25.625				
Ilm	1.6	1.66	1.96	0.27	0.9	0.87	0.87	0.82	ab	28.528	20.339	41.216	26.309	30.811				
Ap	0.65	0.64	0.65	0.07	0.33	0.28	0.29	0.17	an	20.836	17.258	19.623	10.845	11.373				
Cor	0.74	1.47	3.91	3.58	2.08	3.01	2.34	3.33	C	n.a.	0.924	n.a.	3.368	0.015				
Ca	2.31	1.95	2.39	1.51	1.28	1.43	1.2	1.76	di	2.267	n.a.	4.422	n.a.	n.a.				
Id	68.78	76.41	75.89	94.21	88.97	84.27	86.11	91.62	hy	6.948	3.642	15.35	1.668	0.928				
									mt	3.244	2.978	3.582	1.925	n.a.				
									il	1.33	1.011	1.778	0.939	0.137				
									hem	n.a.	n.a.	n.a.	0.708	1.596				
									ap	0.423	0.296	0.464	0.274	0.122				
									ru	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.238				

Continuación Tabla AN2.- Tabla de datos geoquímicos, recabados mediante la recopilación de información basada en la literatura del vulcanismo Cretácico Tardío en Sonora. La abreviatura mostrada en la tabla corresponde a: **A** andesita; **TA** traquiandesita; **D** dacita;

Región Costera									Región Costera					Región Sur - Maycoba - San Carlos				
Salvatierra-Domínguez, (2000) NE de Puerto Libertad									García-Huerta, (2015) Puerto Libertad					Roldán-Quintana et al., (2009)				
Muestra	For-2	For-3	For-5	For-7	For-8	For-25	For-22	For-23	Muestra	CL15-01	CL15-02	CL15-32	CL15-33A	Muestra	1-99	106-90	109-90	58-96
Roca	A	A	A	TA	TA	A	A	A	Roca	A	A	D	D	Roca	A	A	A	A
Mayores %									Mayores %					Mayores %				
Al ₂ O ₃	13.85	14.07	17.24	14.26	17.22	15.54	15.3	15.63	SiO ₂	55.38	56.20	66.47	64.75	SiO ₂	60.9	60.4	60.5	59.4
CaO	0.34	0.37	0.73	0.28	0.73	0.47	2.2	1.5	Al ₂ O ₃	18.48	18.73	15.45	15.88	TiO ₂	0.72	0.92	0.92	0.77
Cr ₂ O ₃	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	Fe ₂ O ₃	5.91	5.57	3.38	3.76	Al ₂ O ₃	17	16.4	16.5	16.1
Fe ₂ O ₃	4.15	4.83	5.03	4.28	2.89	2.77	2.32	2.64	CaO	5.41	7.06	1.15	2.84	Fe ₂ O _{3t}	6.13	7.77	7.68	6.42
K ₂ O	1.71	2.45	3.61	3.17	2.16	5.15	2.8	3.45	Na ₂ O	4.35	3.83	2.48	4.55	MnO	0.11	0.12	0.12	0.09
MgO	0.27	0.51	0.48	0.31	0.35	0.22	0.64	1.17	K ₂ O	1.31	1.86	0.36	2.18	MgO	2.44	2.55	2.57	2.75
MnO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.03	MgO	2.97	2.02	4.39	1.54	CaO	4.94	2.03	4	4.39
Na ₂ O	0.83	0.27	0.28	0.29	0.57	3.48	3.47	3.23	TiO ₂	0.87	0.88	0.56	0.59	Na ₂ O	3.64	5.8	2.05	3.04
P ₂ O ₅	0.17	0.13	0.1	0.18	0.16	0.07	0.12	0.14	P ₂ O ₅	0.37	0.38	0.24	0.25	K ₂ O	2.83	0.75	0.77	3.21
SiO ₂	71.05	68.86	36.16	67.22	61.1	67.38	69.41	68.69	MnO	0.07	0.06	0.03	0.06	P ₂ O ₅	0.17	0.46	0.46	0.12
TiO ₂	0.5	0.76	0.84	0.68	0.69	0.42	0.37	0.45	BaO	0.11	0.12	0.04	0.20	LOI	1.7	2.99	2.96	4.14
LOI	5.98	6.81	9.33	7.88	13.17	2.43	1.98	1.9	LOI	4.78	3.30	5.46	3.41	Total	100.6	100.1	100.3	100.4
Trazas (PPM)									Total	99.89	99.88	99.96	99.81	Trazas (PPM)				
Sr	370	423	214	144.5	462	613	581	505	Trazas (PPM)					Rb	104	30	35	150
Ta	0.5	1.5	1.5	0.5	1.5	1	1.5	1	V	96	101	102	57	Sr	451	307	304	331
Tb	0.1	0.6	0.9	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4	Cr	8	13	49	17	Ba	814	346	338	659
Th	6	18	24	6	6	3	7	7	Co	22	22	16	12	Y	25	27	27	23

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

Sn	14	15	19	19	20	1	1	1	Ni	8	6	23	15	Zr	225	309	310	160
W	56	42	29	63	35	103	183	163	Cu	5	12	35	8	Nb	10	15	15	8
U	1	2	3	1.5	2.5	2	2	1.5	Zn	85	75	81	63	V	n.a.	80	82	145
V	40	85	145	50	70	25	30	25	Rb	23	36	4	54	Cr	20	9	8	19
Yb	0.8	2.1	3.3	1.3	1.5	1	1.1	0.9	Sr	1003	1143	584	1042	Co	16	22	40	24
Y	3	17.5	29	10	11	8.5	11	9.5	Y	20	21	10	13	Ni	4	6	6	11
Zn	15	15	15	15	10	35	30	50	Zr	239	254	180	191	Cu	23	10	12	31
Zr	128	176	104	156	165.5	107	137	178.5	Nb	8	9	7	6	Zn	108	128	124	96
La	9	32.5	30.5	13	17	11	31	30	Ba	985	1112	399	1751	Th	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
REE (PPM)									Pb	11	13	2	20	Pb	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ba	527	1080	1255	526	470	2520	1320	1370	Th	3	3	4	5	REE (PPM)				
Ce	18	67	74.5	26.5	32	18	58.5	53.5	Min Normativos					Ce	n.a.	118.17	119.93	67.58
Cs	0.4	0.9	0.8	0.4	0.8	1	3.6	1.6	Q	8.57	9.32	21.31	41.99	Pr	n.a.	13.79	13.84	7.6
Co	9	6	6	11	10.5	15	30	31.5	or	8.14	11.4	13.34	2.27	Nd	n.a.	53.19	52.4	27.48
Cu	35	45	55	65	85	640	1080	2090	ab	40.98	35.74	42.44	23.8	Sm	n.a.	8.58	8.05	5.04
Dy	0.6	3.1	5.2	1.7	2	1.5	2.4	2	an	25.6	29.57	13	4.42	Eu	n.a.	2	4.57	1.12
Er	0.7	2.3	3.2	1.1	1	0.9	1	1	ne	0	0	0	0	Gd	n.a.	6.69	6.45	4.44
Eu	0.3	1	1.2	0.6	0.6	0.5	1.1	0.9	C	1.08	0	1.65	11.07	Tb	n.a.	0.94	0.91	0.63
Gd	1	4.3	5.7	2	2.6	1.7	3.4	3.5	di	0	3.43	0	0	Dy	n.a.	4.97	4.82	0.39
Ga	13	15	21	18	16	16	18	20	hy	11.03	5.92	4.66	12.96	Ho	n.a.	1.02	1	0.71
Rb	47.2	70.2	107	84.2	59.6	97	61.8	91.6	ol	0	0	0	0	Er	n.a.	2.73	2.72	1.97
Sm	1.2	4.7	6.1	2.6	2.7	2.6	3.9	4.2	mt	2.52	2.53	2.21	1.98	Tm	n.a.	0.37	0.37	0.26
									il	1.27	1.27	0.85	0.83	Yb	n.a.	0.38	0.39	0.27
									hem	0	0	0	0.16	Total	n.a.	212.83	215.45	120.56
									ap	0.81	0.82	0.52	0.53					

3.- Descripciones petrográficas de la Sierra El Chanate

Grupo petrológico 1

LOCALIDAD:	<i>Sierra El Chanate</i>	COMPOSICIÓN:	<i>Intermedia</i>
MUESTRA:	<i>SECH16-03</i>	NOMBRE:	<i>Andesita</i>
COORDENADAS:	<i>416316E, 3410482N</i>	TIPO:	<i>Derrame volcánico</i>
GRUPO PETROLÓGICO:	<i>1</i>	TEXTURA:	<i>Traquítica</i>

Roca de composición andesítica con textura traquítica en una matriz microcristalina a vítrea de plagioclasas con fenocristales de plagioclasas y feldespato alcalino. La alteración en esta roca se concentra principalmente en la matriz y es de tipo argílica, presenta vetillas rellenas de carbonato de calcio.



Luz natural



Luz polarizada

ASOCIACIÓN MINERAL:	ALTERACIÓN:	ABUNDANCIA DE OPACOS:
Pl > FA	Argílica	5%

LOCALIDAD:	<i>Sierra El Chanate</i>	COMPOSICIÓN:	<i>Intermedia</i>
MUESTRA:	<i>SECH16-03A</i>	NOMBRE:	<i>Andesita</i>
COORDENADAS:	<i>416316E, 3410482N</i>	TIPO:	<i>Brecha volcánica</i>
GRUPO PETROLÓGICO:	<i>2</i>	TEXTURA:	<i>Sostenida-Porfídica</i>

Brecha andesítica con abundantes clastos de andesita los cuales presentan textura sostenida-porfídica, la roca está inmersa en una matriz vítrea a microcristalina compuesta de plagioclasas. Tiene alteración argílica moderada y comienzan a aparecer cristales de anfíbol a manera de pseudomorfos. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



Luz natural



Luz polarizada

ASOCIACIÓN MINERAL:	ALTERACIÓN:	ABUNDANCIA DE OPACOS:
Pl > FA > Anf	Argílica	2%

Grupo petrológico 2

LOCALIDAD:	<i>Sierra El Chanate</i>	COMPOSICIÓN:	<i>Intermedia</i>
MUESTRA:	<i>SECH16-03C</i>	NOMBRE:	<i>Andesita</i>
COORDENADAS:	<i>416127E, 3410269N</i>	TIPO:	<i>Conglomerado (clasto)</i>
GRUPO PETROLÓGICO:	<i>2</i>	TEXTURA:	<i>Porfíritica</i>

Andesita con textura porfíritica en una matriz microcristalina de plagioclasas la cual presenta una ligera textura traquitoide. La roca está afectada por alteración argílica moderada, de igual forma aparecen cristales de anfíbol a manera de pseudomorfos, estos concentran minerales opacos en sus bordes. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



ASOCIACIÓN MINERAL:	ALTERACIÓN:	ABUNDANCIA DE OPACOS:
PI>FA>Anf	Propilítica y argílica	1%

Grupo petrológico 3

LOCALIDAD:	<i>Sierra El Chanate</i>	COMPOSICIÓN:	<i>Intermedia</i>
MUESTRA:	<i>SECH16-02</i>	NOMBRE:	<i>Andesita</i>
COORDENADAS:	<i>418705E, 3412167N</i>	TIPO:	<i>Derrame volcánico</i>
GRUPO PETROLÓGICO:	<i>3</i>	TEXTURA:	<i>Porfíritica</i>

Andesita con textura porfíritica en una matriz microcristalina de plagioclasas. La roca está afectada por alteración filica y argílica moderada. La roca tiene grandes fenocristales de feldespato alcalino, biotita y anfíbol. En este caso los fenocristales no están tan afectados por alteración, sin embargo, la matriz sí se encuentra afectada. Los fenocristales de anfíbol y biotita acumulan minerales opacos en sus bordes. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



Luz natural	Luz polarizada	
ASOCIACIÓN MINERAL:	ALTERACIÓN:	ABUNDANCIA DE OPACOS:
FA>PI>Anf>Biot	Filica y argílica	5%

4.- Descripciones petrográficas del área del Cerro Libertad

Grupo petrológico 1

LOCALIDAD:	<i>Cerro Libertad</i>	COMPOSICIÓN:	<i>Intermedio</i>
MUESTRA:	<i>CL15-01</i>	NOMBRE:	<i>Andesita</i>
COORDENADAS:	<i>341968 E, 3329586 N</i>	TIPO:	<i>Derrame volcánico</i>
GRUPO PETROLÓGICO:	<i>1</i>	TEXTURA:	<i>Traquítica</i>

Roca volcánica con textura traquítica en una matriz microcristalina de plagioclasas, está afectada por alteración moderada de tipo argílica y filica. La combinación de estas dos alteraciones hace que las plagioclasas de la matriz sean difíciles de reconocer. Los fenocristales también están afectados por esta alteración, pero aún no llegan a ser pseudomorfos. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



Luz natural



Luz polarizada

ASOCIACIÓN MINERAL:	ALTERACIÓN:	ABUNDANCIA DE OPACOS:
PI>FA	Argílica y filica	5%

LOCALIDAD:	<i>Cerro Libertad</i>	COMPOSICIÓN:	<i>Intermedio</i>
MUESTRA:	<i>CL15-02</i>	NOMBRE:	<i>Andesita</i>
COORDENADAS:	<i>341903 E, 3329600 N</i>	TIPO:	<i>Derrame volcánico</i>
GRUPO PETROLÓGICO:	<i>1</i>	TEXTURA:	<i>Traquítica</i>

Roca volcánica con textura traquítica en una matriz microcristalina de plagioclasas, está afectada por alteración moderada de tipo argílica, filica y propilitica en menor proporción. En general los fenocristales de plagioclasa tienen menor grado de alteración. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



Luz natural



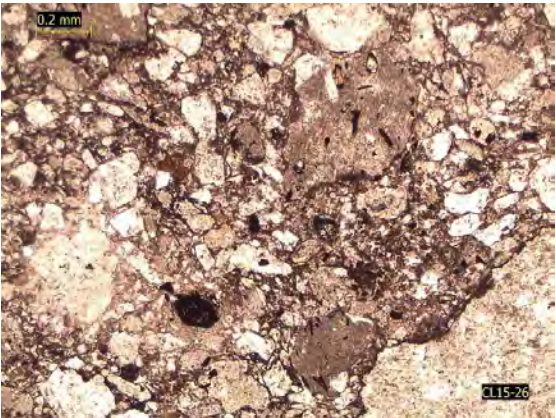
Luz polarizada

ASOCIACIÓN MINERAL:	ALTERACIÓN:	ABUNDANCIA DE OPACOS:
PI>FA	Argílica, filica y propilitica	5%

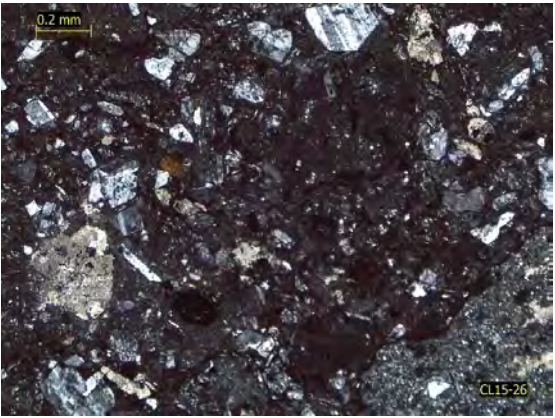
Grupo petrológico 2

LOCALIDAD:	<i>Cerro Libertad</i>	COMPOSICIÓN:	<i>Intermedia</i>
MUESTRA:	<i>CL15-26</i>	NOMBRE:	<i>Andesita</i>
COORDENADAS:	<i>342194 E, 3329188 N</i>	TIPO:	<i>Brecha</i>
GRUPO PETROLÓGICO:	<i>2</i>	TEXTURA:	<i>Porfídica</i>

Brecha con abundantes clastos de andesita y cristales de plagioclasas en una matriz vítrea a microcristalina de plagioclasas. La concentración de los minerales opacos disminuye, sin embargo, los minerales como el anfíbol y la biotita tienden a acumularlos en sus bordes. La roca se encuentra silicificada. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



Luz natural




Luz polarizada


ASOCIACIÓN MINERAL:	ALTERACIÓN:	ABUNDANCIA DE OPACOS:
PI>FA>Anf	Argílica	1%

LOCALIDAD:	<i>Cerro Libertad</i>	COMPOSICIÓN:	<i>Intermedia</i>
MUESTRA:	<i>CL15-27</i>	NOMBRE:	<i>Andesita</i>
COORDENADAS:	<i>341716 E, 3329234 N</i>	TIPO:	<i>Derrame volcánico</i>
GRUPO PETROLÓGICO:	<i>2</i>	TEXTURA:	<i>Traquítica</i>

Roca volcánica de composición andesítica en una matriz vítrea a microcristalina de plagioclasas, con alteración filica y argílica. La combinación de estas dos alteraciones hace que se borre un poco la textura original de la roca. Aunque se alcanza a distinguir una ligera textura traquítica. En este caso los fenocristales de anfíbol, plagioclasas y feldespatos alcalinos aparecen a manera de pseudomorfos. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



Luz natural



Luz polarizada

ASOCIACIÓN MINERAL:	ALTERACIÓN:	ABUNDANCIA DE OPACOS:
PI>Anf>FA	Filica y argílica	3%

LOCALIDAD:	<i>Cerro Libertad</i>	COMPOSICIÓN:	<i>Intermedia</i>
MUESTRA:	<i>CL15-28</i>	NOMBRE:	<i>Andesita</i>
COORDENADAS:	<i>341628 E, 3329243 N</i>	TIPO:	<i>Derrame volcánico</i>
GRUPO PETROLÓGICO:	<i>2</i>	TEXTURA:	<i>Traquítica</i>

Roca volcánica de composición andesítica en una matriz vítrea a microcristalina de plagioclasas, con alteración argílica y propilitica moderada. En general esta roca no se encuentra tan afectada por algún tipo de alteración ya que los minerales como anfíbol, biotita y los feldespatos estas más preservados. Se alcanza a distinguir una ligera textura traquítica. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



Luz natural



Luz polarizada

ASOCIACIÓN MINERAL:	<i>Pl>FA>Anf</i>	ALTERACIÓN:	<i>Argílica</i>	ABUNDANCIA DE OPACOS:	<i>2%</i>
----------------------------	------------------------	--------------------	-----------------	------------------------------	-----------

LOCALIDAD:	<i>Cerro Libertad</i>	COMPOSICIÓN:	<i>Intermedia</i>
MUESTRA:	<i>CL15-29A</i>	NOMBRE:	<i>Andesita</i>
COORDENADAS:	<i>341582 E, 3329307 N</i>	TIPO:	<i>Dique</i>
GRUPO PETROLÓGICO:	<i>2</i>	TEXTURA:	<i>Traquítica</i>

Dique andesítico de grano fino con textura traquítica en una matriz vítrea a microcristalina de plagioclasas. Esta roca es abundante en pseudomorfos de anfíbol los cuales tienden a concentrar minerales opacos. La matriz de esta roca presenta alteración argílica y en menor grado por alteración propilitica. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



Luz natural




Luz polarizada


ASOCIACIÓN MINERAL:	<i>Pl>FA>Anf</i>	ALTERACIÓN:	<i>Argílica y propilitica</i>	ABUNDANCIA DE OPACOS:	<i>10%</i>
----------------------------	------------------------	--------------------	-------------------------------	------------------------------	------------

LOCALIDAD:	<i>Cerro Libertad</i>	COMPOSICIÓN:	<i>Intermedia</i>
MUESTRA:	<i>CL15-29B</i>	NOMBRE:	<i>Andesita</i>
COORDENADAS:	<i>341582 E, 3329307 N</i>	TIPO:	<i>Dique</i>
GRUPO PETROLÓGICO:	<i>2</i>	TEXTURA:	<i>Traquítica</i>

Dique andesítico de grano fino con textura traquítica en una matriz vítrea a microcristalina de plagioclasas. Abundante en fenocristales de anfíbol, estos tienden a concentrar minerales opacos en sus bordes. En esta roca la alteración argílica es moderada de tal forma que los fenocristales están mayormente preservados. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



Luz natural




Luz polarizada


ASOCIACIÓN MINERAL:	ALTERACIÓN:	ABUNDANCIA DE OPACOS:
PI>FA>Anf	Argílica y filica	1%

LOCALIDAD:	<i>Cerro Libertad</i>	COMPOSICIÓN:	<i>Intermedia</i>
MUESTRA:	<i>CL15-30</i>	NOMBRE:	<i>Andesita</i>
COORDENADAS:	<i>341570 E, 3329349 N</i>	TIPO:	<i>Toba</i>
GRUPO PETROLÓGICO:	<i>2</i>	TEXTURA:	<i>Porfídica</i>

Toba con matriz de ceniza y microcristalina de plagioclasas. Esta roca contiene clastos de andesitas, perlitas y cuarcitas. Contiene algunos cristales de plagioclasas y feldespato alcalino. Esta roca está mayormente afectada por alteración argílica y propilitica moderada. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



Luz natural



Luz polarizada

ASOCIACIÓN MINERAL:	ALTERACIÓN:	ABUNDANCIA DE OPACOS:
PI>FA	Argílica y filica	1%

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

LOCALIDAD:	<i>Cerro Libertad</i>	COMPOSICIÓN:	<i>Intermedia</i>
MUESTRA:	<i>CL15-31</i>	NOMBRE:	<i>Dacita</i>
COORDENADAS:	<i>341579 E, 3329349 N</i>	TIPO:	<i>Depósito de bloques y ceniza (matriz)</i>
GRUPO PETROLÓGICO:	<i>2</i>	TEXTURA:	<i>Cripcristalina? - Ligera textura traquitoide</i>

Roca de composición dacítica en una matriz cripcristalina, presenta textura traquítica con fenocristales de anfíbol que concentran minerales opacos en sus bordes. Presenta alteración argílica y filica moderada a intensa. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



Luz natural



Luz polarizada

ASOCIACIÓN MINERAL:	ALTERACIÓN:	ABUNDANCIA DE OPACOS:
<i>Pl>Anf>Czo</i>	<i>Argílica y filica</i>	<i>1%</i>

LOCALIDAD:	<i>Cerro Libertad</i>	COMPOSICIÓN:	<i>Intermedia</i>
MUESTRA:	<i>CL15-32</i>	NOMBRE:	<i>Andesita</i>
COORDENADAS:	<i>341565 E, 3329355 N</i>	TIPO:	<i>Sill</i>
GRUPO PETROLÓGICO:	<i>2</i>	TEXTURA:	<i>Traquítica</i>

Sill dacítico en una matriz vítrea a microcristalina de plagioclasas y cuarzo. Se encuentra afectado por intensa alteración filica y argílica lo que hace que se borre la textura original de la roca. Se alcanza a observar que la textura original era traquítica. Esta roca presenta pseudomorfos de anfíbol que concentran minerales opacos en los bordes. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



Luz natural




Luz polarizada

ASOCIACIÓN MINERAL:	ALTERACIÓN:	ABUNDANCIA DE OPACOS:
<i>Pl > FA > Anf</i>	<i>Filica y argílica</i>	<i>5%</i>


Grupo petrológico 3

LOCALIDAD:	<i>Cerro Libertad</i>	COMPOSICIÓN:	<i>Intermedia</i>
MUESTRA:	<i>CL15-33A</i>	NOMBRE:	<i>Andesita</i>
COORDENADAS:	<i>341430 E, 3329618 N</i>	TIPO:	<i>Epiclástico (Clasto)</i>
GRUPO PETROLÓGICO:	<i>3</i>	TEXTURA:	<i>Porfíritica</i>

Clasto de composición andesítica con textura porfíritica en una matriz microcristalina a vítrea de plagioclasas con grandes fenocristales de feldespato alcalino, plagioclasas, anfíbol y biotita. Esta roca está afectada por alteración argílica moderada y con una ligera alteración filica. Los minerales como anfíbol y biotita tienden a acumular minerales opacos en sus bordes. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



Luz natural




Luz polarizada

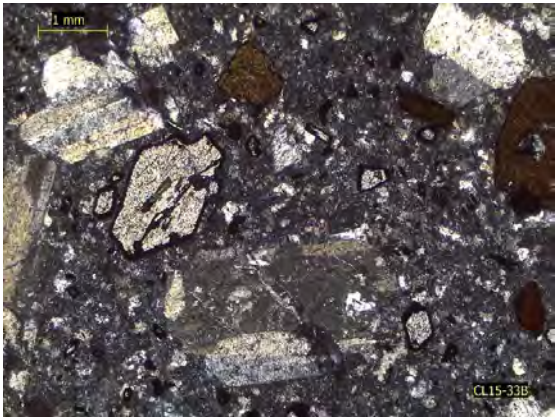
ASOCIACIÓN MINERAL:	ALTERACIÓN:	ABUNDANCIA DE OPACOS:
FA>PI>Anf>Biot	Argílica y filica	2%

LOCALIDAD:	<i>Cerro Libertad</i>	COMPOSICIÓN:	<i>Intermedia</i>
MUESTRA:	<i>CL15-33B</i>	NOMBRE:	<i>Andesita</i>
COORDENADAS:	<i>341432 E, 3329616 N</i>	TIPO:	<i>Epiclástico (Matriz)</i>
GRUPO PETROLÓGICO:	<i>3</i>	TEXTURA:	<i>Porfíritica</i>

Roca de composición andesítica con textura porfíritica en una matriz microcristalina a vítrea de plagioclasas con grandes fenocristales de feldespato alcalino, plagioclasas, anfíbol y biotita. Esta roca está afectada por alteración argílica moderada y con una ligera alteración filica y propilitica. Los minerales como anfíbol y biotita están afectados por alteración propilitica y tienden a acumular minerales opacos en sus bordes. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



Luz natural



Luz polarizada

ASOCIACIÓN MINERAL:	ALTERACIÓN:	ABUNDANCIA DE OPACOS:
FA>PI>Anf>Biot	Argílica, filica y propilitica	5%

5.- Descripciones petrográficas de la Sierra Los Cerros Colorados

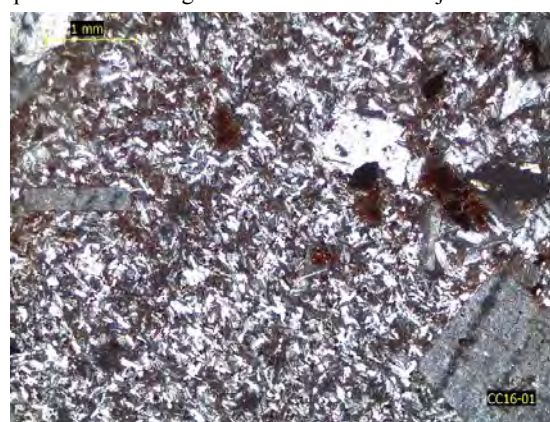
Grupo petrológico 1

LOCALIDAD:	<i>Sierra Los Cerros Colorados</i>	COMPOSICIÓN:	<i>Intermedia</i>
MUESTRA:	<i>CC16-01</i>	NOMBRE:	<i>Andesita</i>
COORDENADAS:	<i>473479E, 3160748N</i>	TIPO:	<i>Derrame volcánico</i>
GRUPO PETROLÓGICO:	<i>1</i>	TEXTURA:	<i>Intersticial - traquítica</i>

Andesita con textura intersticial y ligeramente traquítica, en una matriz microcristalina de plagioclasas. La roca está afectada por alteración filica y argílica moderada a intensa. Presenta fenocristales de plagioclasa y feldespato. La combinación de las alteraciones comienza a ser intensa ya que en algunas partes está a punto de borrarse la textura original de la roca. Roca con gran contenido de minerales opacos. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



Luz natural



Luz polarizada

ASOCIACIÓN MINERAL:	ALTERACIÓN:	ABUNDANCIA DE OPACOS:
Pl> FA	Filica y argílica	5%

LOCALIDAD:	<i>Sierra Los Cerros Colorados</i>	COMPOSICIÓN:	<i>Intermedia</i>
MUESTRA:	<i>CC16-06</i>	NOMBRE:	<i>Andesita</i>
COORDENADAS:	<i>473505E, 3160706N</i>	TIPO:	<i>Derrame volcánico</i>
GRUPO PETROLÓGICO:	<i>1</i>	TEXTURA:	<i>Porfíritica- Intersticial - traquítica</i>

Andesita con textura porfíritica-intersticial y ligeramente traquítica, en una matriz microcristalina de plagioclasas. La roca está afectada por alteración filica y argílica moderada a intensa. Presenta fenocristales de plagioclasa y feldespato. La combinación de las alteraciones comienza a borrar la textura original de la roca. Roca con gran contenido de minerales opacos. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



Luz natural



Luz polarizada

ASOCIACIÓN MINERAL:	ALTERACIÓN:	ABUNDANCIA DE OPACOS:
FA>Pl>Anf>Biot	Filica y argílica	5%

“Petrología del vulcanismo Cretácico Tardío en las regiones de la Sierra el Chanate, Cerro Libertad y Sierra Los Cerros Colorados, Sonora Occidental, México”

LOCALIDAD:	<i>Sierra Los Cerros Colorados</i>	COMPOSICIÓN:	<i>Intermedia</i>
MUESTRA:	<i>CC16-22</i>	NOMBRE:	<i>Andesita</i>
COORDENADAS:	<i>472331 E, 3163108 N</i>	TIPO:	<i>Derrame volcánico</i>
GRUPO PETROLÓGICO:	<i>1</i>	TEXTURA:	<i>Criptocrystalina? Traquítica?</i>

Andesita con textura criptocrystalina? - traquítica? en una matriz vítrea a microcrystalina de plagioclasas y cuarzo. La roca está afectada por alteración filica pervasiva y argílica moderada. Con fenocristales de feldespato alcalino y plagioclasa. Escasos minerales de plagioclasas y feldespatos se alcanzan a preservar y se alcanza a distinguir la textura original de la roca en este caso traquítica. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



Luz natural



Luz polarizada

ASOCIACIÓN MINERAL:	<i>Pl > FA</i>	ALTERACIÓN:	<i>Fílica y argílica</i>	ABUNDANCIA DE OPACOS:	<i>1%</i>
----------------------------	-------------------	--------------------	--------------------------	------------------------------	-----------

LOCALIDAD:	<i>Sierra Los Cerros Colorados</i>	COMPOSICIÓN:	<i>Intermedia</i>
MUESTRA:	<i>CC16-25</i>	NOMBRE:	<i>Andesita</i>
COORDENADAS:	<i>472530 E, 3162802 N</i>	TIPO:	<i>Derrame volcánico</i>
GRUPO PETROLÓGICO:	<i>1</i>	TEXTURA:	<i>Traquítica - Intersticial</i>

Andesita con textura traquítica - intersticial en una matriz microcrystalina de plagioclasas. La roca está afectada por alteración filica y argílica moderada. La roca tiene fenocristales de feldespato alcalino y plagioclasa. La matriz está afectada por alteración filica en cambio los fenocristales de feldespato alcalino por alteración argílica. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



Luz natural



Luz polarizada

ASOCIACIÓN MINERAL:	<i>Pl > FA</i>	ALTERACIÓN:	<i>Fílica y argílica</i>	ABUNDANCIA DE OPACOS:	<i>3%</i>
----------------------------	-------------------	--------------------	--------------------------	------------------------------	-----------

Grupo petrológico 2

LOCALIDAD:	Sierra Los Cerros Colorados	COMPOSICIÓN:	Intermedia
MUESTRA:	CC16-04	NOMBRE:	Andesita
COORDENADAS:	473519E, 3160722N	TIPO:	Derrame volcánico
GRUPO PETROLÓGICO:	2	TEXTURA:	Traquítica

Andesita con textura traquítica en una matriz microcristalina de plagioclasas. La roca está afectada por alteración argílica y filica moderada. La roca tiene grandes fenocristales de feldespato alcalino, los cuales están afectados principalmente por alteración argílica y están mejor preservados. Comienzan a aparecer algunos cristales de anfíbol. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



Luz natural



Luz polarizada

ASOCIACIÓN MINERAL:	ALTERACIÓN:	ABUNDANCIA DE OPACOS:
Pl>FA>Anf	Argílica y filica	5%

LOCALIDAD:	Sierra Los Cerros Colorados	COMPOSICIÓN:	Intermedia
MUESTRA:	CC16-23	NOMBRE:	Andesita
COORDENADAS:	472437 E, 3162895 N	TIPO:	Conglomerado
GRUPO PETROLÓGICO:	2	TEXTURA:	Sostenida

Conglomerado con abundantes clastos de andesita y arenisca de cuarzo. El cementante está compuesto por cristales de epidota, arcillas y calcita. Afectada por alteración propilitica y argílica. Este conglomerado tiene clastos de la unidad volcánica de base. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.

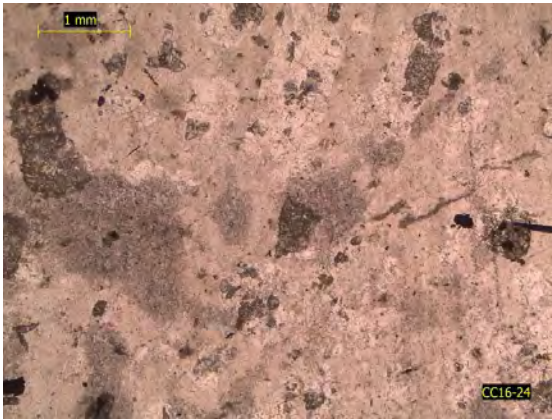


ASOCIACIÓN MINERAL:	ALTERACIÓN:	ABUNDANCIA DE OPACOS:
Clastos de andesita y arenisca	Propilitica y argílica	1%

Grupo petrológico 3

LOCALIDAD:	Sierra Los Cerros Colorados	COMPOSICIÓN:	Intermedia
MUESTRA:	CC16-24	NOMBRE:	Andesita
COORDENADAS:	472475 E, 3162854 N	TIPO:	Derrame volcánico
GRUPO PETROLÓGICO:	3	TEXTURA:	Porfíritica

Andesita con textura porfíritica en una matriz microcristalina de plagioclasas. La roca está afectada por alteración argílica intensa y propilitica en menor proporción. La roca tiene grandes fenocristales de plagioclasas y feldespato alcalino además con presencia de anfíbol a manera de pseudomorfos los cuales tienden a concentrar minerales opacos. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



Luz natural



Luz polarizada

ASOCIACIÓN MINERAL:	Pl > FA > Anf	ALTERACIÓN:	Argílica y propilitica	ABUNDANCIA DE OPACOS:	1%
----------------------------	---------------	--------------------	------------------------	------------------------------	----

LOCALIDAD:	Sierra Los Cerros Colorados	COMPOSICIÓN:	Intermedia
MUESTRA:	CC16-19	NOMBRE:	Andesita
COORDENADAS:	477610E, 3161479N	TIPO:	Derrame volcánico
GRUPO PETROLÓGICO:	3	TEXTURA:	Porfíritica

Andesita con textura porfíritica en una matriz vítrea a microcristalina de plagioclasas y cuarzo. La roca está afectada por alteración filica intensa y argílica – propilitica moderada. La roca tiene grandes fenocristales de feldespato, biotita y anfíbol. Los anfíboles acumulan minerales opacos en sus bordes. Los minerales de anfíbol están a punto de ser pseudomorfos. Microfotografías tomadas con un objetivo 4x.



ASOCIACIÓN MINERAL:	Pl > FA > Biot > Anf	ALTERACIÓN:	Filica, argílica y propilitica	ABUNDANCIA DE OPACOS:	1%
----------------------------	----------------------	--------------------	--------------------------------	------------------------------	----

6.- Técnica analítica geoquímica y preparación de muestras

Los análisis geoquímicos de roca total se llevaron a cabo en el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, durante una estancia de investigación de una semana de duración (13 al 17 de febrero de 2017), bajo la asesoría del Químico Rufino Lozano Santa-Cruz. Se utilizó un equipo marca Rigaku modelo ZSX Primus II para el análisis de elementos mayores y traza de los polvos de roca.

Preparación de muestras.

Esta etapa comienza con la recolección de muestras en campo de tal manera que se pueda obtener la roca más representativa y lo más fresca posible, evitando que la roca tuviera intemperismo, alteración o amígdalas rellenas de un material secundario (calcita, cuarzo, zeolitas). Una vez seleccionada la muestra adecuada se obtuvo una cantidad suficiente de esquirlas para después pasarlas por la etapa de trituración y pulverización.

Trituración.

Esta etapa se realizó en el Laboratorio de Preparación de Muestras para Análisis Geoquímicos, en la Estación Regional del Noroeste (ERNO) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) a cargo del Quim. Pablo Peñaflor Escarcega. La trituración de esquirlas se hizo en una quebradora de quijadas de acero inoxidable Braun Chipmunk (**Figura AN1A**). Una vez obtenida la roca triturada o gravilla, el siguiente paso fue el cuarteo de la muestra (**Figura AN1B**) y el tamizado para obtener la roca más homogénea en el tamaño (0.5cm). Ya teniendo la muestra de un tamaño homogéneo se realizó una muy delicada separación manual (**Figura AN1C**), para descartar la roca que estuviera alterada o con intemperismo, para finalmente obtener un aproximado de 50 gramos de roca fresca (**Figura AN1D**).

Pulverización.

Esta etapa se realizó en el Laboratorio de Preparación de Muestras para Análisis Geoquímicos, en la Estación Regional del Noroeste (ERNO) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) a cargo del Quím. Pablo Peñaflor Escarcega. La pulverización se realizó en un molino planetario de bolas PM 100 marca RETSCH ([Figura AN1E](#)) y contenedor de ágata ([Figura AN1F](#)).

Técnica de análisis FRX.

El método de análisis más utilizado actualmente para la determinación de elementos mayores y traza de muestras de roca es la técnica de espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX). Mediante esta técnica se pueden analizar hasta 80 elementos a través de una amplia gama de sensibilidades. Es un método rápido y un gran número de análisis precisos se puede hacer en un espacio relativamente corto de tiempo. La técnica FRX se basa en el estudio de las emisiones de fluorescencia generadas después de la excitación de la muestra por rayos X. Un haz de rayos X primarios excita los rayos X secundarios (FRX) que tienen longitudes de onda características de los elementos presentes en la muestra. La intensidad de los rayos X secundarios se utiliza para determinar las concentraciones de los elementos presentes en la muestra en función de los estándares de calibración ([Rollinson, 1993](#)).

Preparación de muestras para el análisis mediante la técnica FRX.

La preparación de muestras de roca para el análisis de FRX se lleva a cabo en dos etapas: la primera etapa se lleva a cabo mediante un disco de polvo compacto para el análisis de elementos traza ([Leake et al., 1969](#)). La segunda etapa se realiza para el análisis de elementos mayores ([Norrish y Hutton, 1969](#) y [Claisse, 1989](#)), mediante una perla de vidrio generada a partir de la muestra en polvo, por fusión con metaborato, tetraborato de litio o, metaborato de sodio.



Figura AN1.- Preparación de muestras para análisis de geoquímica. **A)** Trituradora Braun Chipmunk. **B)** Cuarteador de gravilla. **C)** separación manual de intemperismo. **D)** Obtención de gravilla para pulverizar. **E)** Molino de bolas PM 100. **F)** Contenedor de ágata.

Preparación de muestra para elementos mayores.

De la muestra de roca obtenida en la etapa de pulverización, se escogen 5 gramos aproximadamente para vaciarlos en recipientes de cristal (Figura AN2A) los cuales se secan en una estufa a 150° C por una 1 hora. Una vez pasada la hora, se escogen 0.4 gramos de muestra, a la cual se le agregan 8 gramos de fundente, pesados en una balanza de precisión alta (Figura AN2B). Una vez teniendo la muestra correctamente pesada se funde por 15 minutos mediante una fundidora marca Fluxy (Figura AN2C), hasta que el resultado sea una perla de vidrio (Figura AN2D).



Figura AN2.- Preparación de muestras para elementos mayores. **A)** 5 gramos de muestra pulverizada en vasos de precipitado. **B)** Balanza de alta precisión para pesar el fundente. **C)** Fundidora Fluxy. **D)** Perlas de vidrio templadas.

Preparación de la muestra para elementos traza.

La preparación de muestras de roca para la obtención de elementos traza, en una primera etapa consiste en secar la muestra durante una hora en una estufa a 150°C. Después, se pesa 5.6 gramos de muestra a la cual se le añade 1 gramo de cera. Teniendo 6.6 gramos de polvo, estos se mezclan el suficiente tiempo para que quede una masa homogénea que esté lista para prensar. El prensado se hace en un equipo Graseby Specac (Figura AN3A), donde la muestra recibe una compresión de 19 toneladas en un tiempo de 19 segundos, para finalmente obtener la pastilla compacta (Figura AN3B).

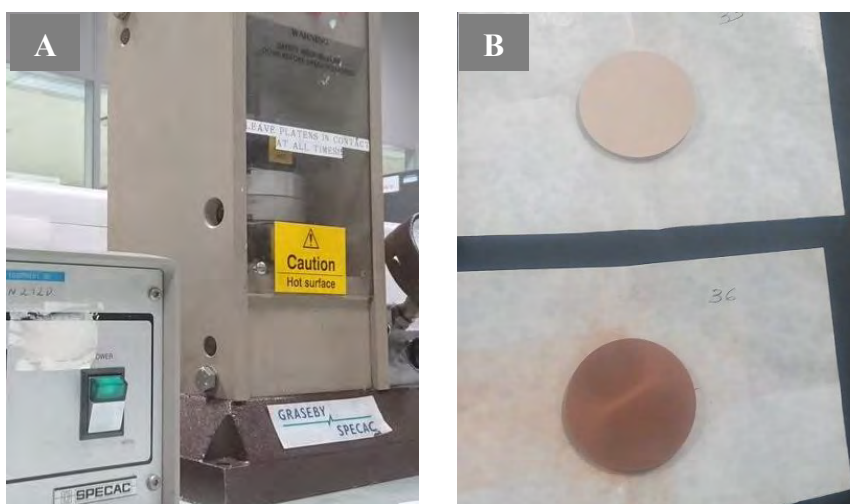


Figura AN3.- Preparación de muestras para elementos traza. **A)** Prensa hidráulica Graseby Specac. **B)** Pastillas prensadas para análisis de elementos traza.

7.- Técnica analítica U-Pb

Los análisis isotópicos de U-Pb en circones fueron realizados durante una estancia de investigación de una semana de duración (06 al 12 de noviembre de 2016) bajo la asesoría del Dr. Lugi Solari, 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). El LEI cuenta con un sistema de ablación láser modelo Resolution M50 de la marca “Resonetics” (Figura AN4A) 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 AN4B). Previo a la medición isotópica, las muestras (probeta con circones) se limpiaron con HNO₃ 1M con la finalidad de eliminar o minimizar cualquier posible contaminación por la presencia de Pb común en la superficie de los granos. La ablación láser se realiza en una celda de nueva generación de doble volumen que puede alojar hasta 4 probetas con muestras (Figura AN4C). Los cristales de zircón fueron ablacionados dentro de esta celda en una atmósfera de He, la cual proporciona una condición óptima para este proceso. Primeramente, el haz del láser incide sobre la superficie del cristal con una energía de ~130-140 mJ y a una tasa de repetición de 5 Hz creando un hoyo provocado por la volatilización de un área del zircón (*spot* o punto de análisis) de ~33 μm de diámetro y de ~25 μm de profundidad para obtener un total de ~75–85 ng de masa ablacionada durante cada análisis. La ablación se lleva a cabo por alrededor de 30 segundos con el fin de minimizar la profundidad del hoyo de ablación. Posteriormente, el material ablacionado (vaporizado) es evacuado de la celda de ablación y transportado al espectrómetro de masas en un flujo de He y N₂ mezclado con gas Ar (flujos de gas optimizados diariamente) para después ser analizado. En el caso de los análisis en circones, una secuencia típica de medición por ablación láser en el LEI inicia con el análisis de dos muestras de referencia certificada (vidrios estándar NIST, SRM, 610; Figura AN4D), seguido por cinco análisis de material de referencia natural cuya composición y/o edad han sido ya publicadas (zircón estándar Plešovice; Sláma et al., 2008) y finalmente cinco circones de edad desconocida. El experimento finaliza con dos circones estándar y un vidrio NIST. Los análisis del vidrio NIST son utilizados para calcular las concentraciones correctas de U y Th, además de las otras concentraciones de elementos traza y tierras raras medidas durante cada análisis, mientras que los análisis del estándar de zircón Plešovice son usados para recalculas las relaciones isotópicas. Durante el análisis de cada zircón los isótopos de interés principal para el fechamiento U-Pb como ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb, ²⁰⁸Pb, ²³²Th y ²³⁸U fueron determinados.



Figura AN4.- Técnica analítica U-Pb. **(A)** Laser de ablación RESONETICS. **(B)** Espectrómetro de masas (ICP-MS tipo cuadrupolo). **(C)** Celdas de ablación con muestras para analizar. **(D)** Vidrio estándar de referencia ablacionado

8.- Preparación y separación de circones para análisis geocronométricos U-Pb

La separación de circones se llevó a cabo en tres etapas. La primera etapa 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. La 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. La tercera etapa se llevó a cabo en el Laboratorio de Separación de Minerales I y II del Instituto de Geología de la UNAM, gracias al apoyo de la Geol. María del Consuelo Macías Romo. El análisis y la obtención de datos se llevó a cabo en el Laboratorio de Estudios Isotópicos del Centro de Geociencias UNAM campus Juriquilla, a cargo del Dr. Luigi A. Solari. En la primera etapa los circones fueron obtenidos de muestra de roca triturada y posteriormente pulverizada usando una quebradora de quijadas Braun Chipmunk (**Figura AN5A**), después se realizó una separación magnética mediante un

separador magnético Frantz (**Figura AN5B**). Durante la segunda etapa el concentrado de circones se obtuvo mediante la separación de líquidos pesados (yoduro de metileno, **Figura AN5 C, D, E**). La tercera etapa de separación se inició con la roca triturada y tamizada, para después procesar el material triturado en una mesa de separación gravitacional Wilfley (**Figura AN5 F, G, H**). La separación y concentración final fue realizada mediante elección manual de los cristales bajo un microscopio binocular.

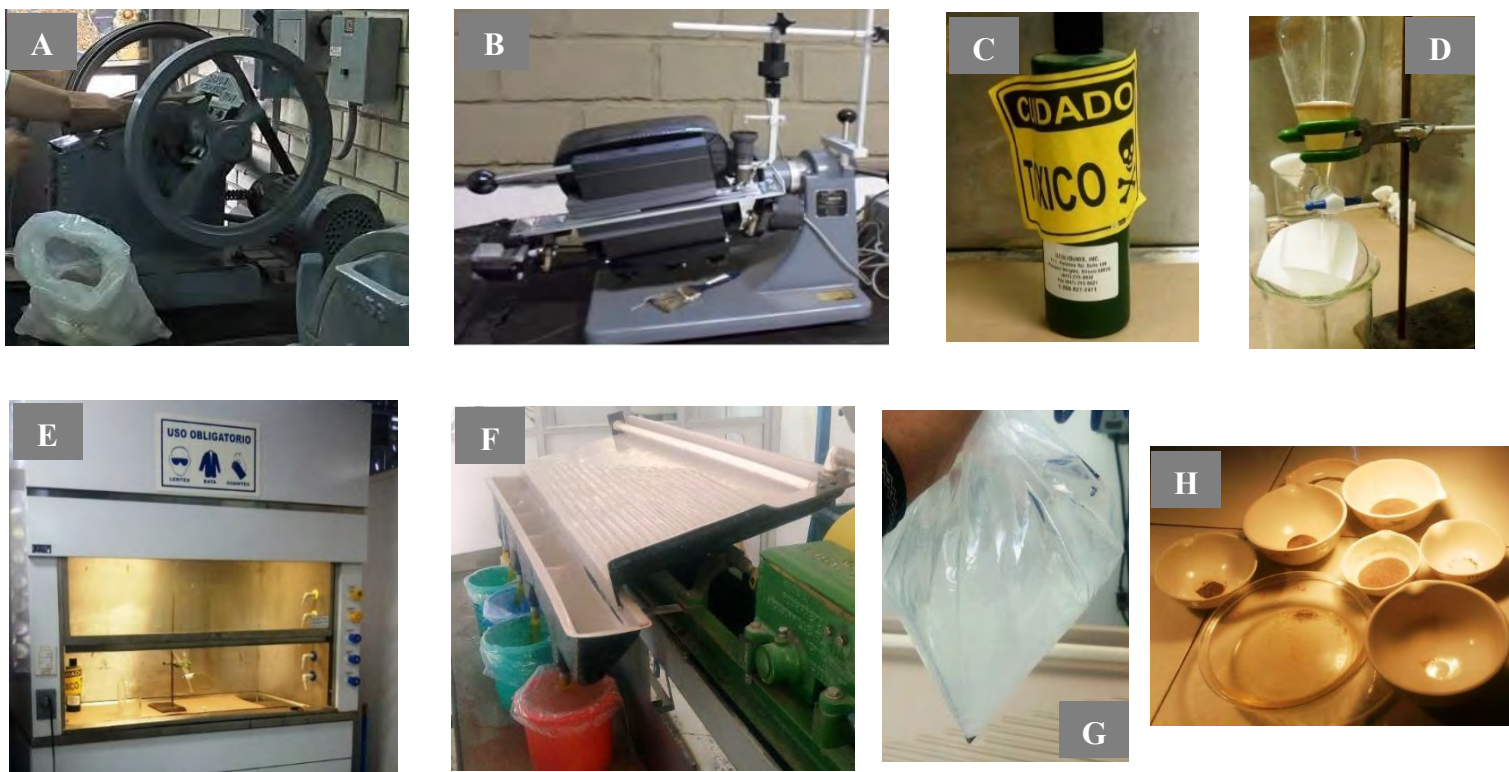


Figura AN5.- Etapas de separación de circones. Primera etapa **(A)** Quebradora de quijadas Braun Chipmunk. **(B)** Separador magnético Frantz. Segunda etapa **(C)** Compuesto químico yoduro de metileno utilizado para la separación de circones debido a su alta densidad. **(D)** Mediante un embudo de separación con llave se deposita el yoduro de metileno, posteriormente se deposita la muestra triturada y después de recuperan los minerales más pesados en el filtro de color blanco. **(E)** Posteriormente la muestra triturada sobrante empapada de yoduro de metileno se deja reposando en una campana de extracción, para evitar la exposición al vapor emitido del líquido pesado. Tercera etapa **(F)** Mesa Wilfley para separar minerales aprovechando sus diferentes densidades. **(G)** Obtención de los minerales más pesados mediante la mesa Wilfley, estos caen en el último recipiente. **(H)** Por último la muestra obtenida se deja secar para posteriormente realizar una separación manual de cristales.

Una vez concluidas las etapas de separación se eligen cuidadosamente alrededor de 60 granos de zircón de cada muestra bajo un microscopio binocular (Figura AN6A) con la finalidad de asegurar que los cristales fueran representativos de varias poblaciones de circones (tamaño, forma y color) para después ser montados en una resina epóxica (Figura AN6B) y, posteriormente, desbastados hasta exponer una superficie lo más cercana posible a la mitad ecuatorial de los circones. Antes y después de los análisis in situ por ablación láser, las superficies pulidas de los granos de zircón fueron fotografiadas en el Laboratorio de Microscopía 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 (Figura AN6C). Las imágenes de cátodoluminiscencia, luz reflejada y transmitida fueron obtenidas con el propósito de caracterizar la estructura interna de los circones y elegir los sitios potenciales para los análisis de U-Pb, observando el zoneamiento relacionado a los cambios de composición química de los circones para poder detectar posibles inclusiones, sobrecrecimientos metamórficos o herencias que cambiarían el sentido de la interpretación de los datos analíticos. Esta es una herramienta ventajosa para interpretar las edades obtenidas.



Figura 52.-Preparación de circones antes de ser ablacionados. **(A)** Elección y organización de circones mediante un microscopio binocular. **(B)** Circones montados en resina epóxica dentro de una probeta. **(C)** Microscopio electrónico de barrido (SEM) utilizado para fotografías de circones post-ablación.