



IPICYT

**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**Petrología y Petrografía de la Secuencia de Lavas e
Ignimbritas del Eoceno-Oligoceno del Área Mesa La
Virgen Calerilla al sur de la Ciudad de Zacatecas,
México.**

Tesis que presenta

Karla Rubí Hernández Martínez

Para obtener el grado de

Maestra en Geociencias Aplicadas

Codirectores de la Tesis:

Dr. Sanjeet Kumar Verma

Dr. José Ramón Torres Hernández

San Luis Potosí, S.L.P., agosto del 2020



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “Petrología y petrografía de la Secuencia de Lavas e Ignimbritas del Eoceno-Oligoceno del Área La Mesa Virgen Calerilla al sur de la Ciudad de Zacatecas” presentada para obtener el Grado de Maestro(a) en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Karla Rubí Hernández Martínez** y aprobada el **veinticuatro de agosto del dos mil veinte** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. Sanjeet Kumar Verma

Codirector de la tesis

Dr. José Ramón Torres Hernández

Codirector de la tesis

Dr. Pablo Dávila Harris

Miembro del Comité Tutorial

Dr. Aaron Martín

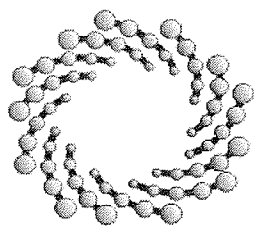
Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de Petrografía y Petrofísica de la División de Geociencias Aplicadas, y el laboratorio de LINAN (Laboratorio Nacional de Investigaciones en Nanociencias y Nanotecnología) del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la codirección de los doctores Sanjeet Kumar Verma y José Ramón Torres Hernández.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (932326) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



IPICYT

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 061 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 24 días del mes de agosto del año 2020, se reunió a las 12:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dr. Aaron James Martin _	Presidente	IPICYT
Dr. Pablo Dávila Harris	Secretario	IPICYT
Dr. Sanjeet Kumar Verma _	Sinodal	IPICYT

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

MAESTRA EN GEOCIENCIAS APLICADAS

sustentó la C.

Karla Rubí Hernández Martínez

sobre la Tesis intitulada:

Petrología y Petrografía de la Secuencia de Lavas e Ignimbritas del Eoceno-Oligoceno del Área Mesa La Virgen Calerilla al sur de la Ciudad de Zacatecas, México

que se desarrolló bajo la dirección de

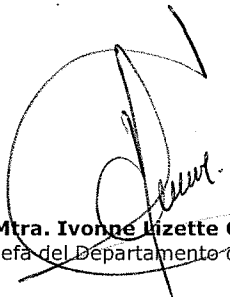
Dr. Sanjeet Kumar Verma _
Dr. José Ramón Torres Hernández (UASLP)

El Jurado, después de deliberar, determinó

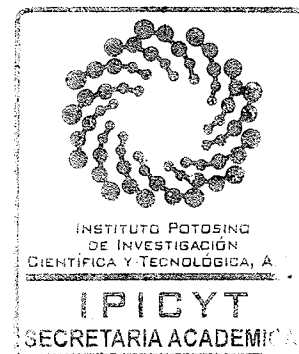
APROBARLA

Dándose por terminado el acto a las 13:25 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición de la interesada y para los fines que a la misma convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 24 días del mes de agosto de 2020.


Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado


Dr. Marcial Bonilla Marín
Secretario Académico



DEDICATORIA

*A mi mamá, por siempre amarme, cuidarme y protegerme,
A mi papá, por enseñarme el valor del trabajo y responsabilidad,
A Jesús, por alentarme y escucharme cuando más lo necesite,
A mis amigos y a todos mis seres queridos que estuvieron y me apoyaron en este
proceso.*

AGRADECIMIENTOS

Mamá, papá... ustedes fueron mi principal motor para concluir este gran trabajo, gracias.

Gracias Jesús, por ser mi mejor amigo y compañero de aventuras, por calmar mi estrés y enseñarme a ser paciente.

A mis amigos que estuvieron acompañándome en este camino, que creyeron en mí y que estuvieron ahí para molestarme: Hugo "Juguito", Oscar "Príncipe", América, Edgar, Leo Dany, Fermín, Jocelyn y Randall "los cachitos", Pascal y su esposa Marce, Jonathan, Fernanda, Adrián, a Brenda Torres por ser mi amiga de tantos años. A todos mis amigos Prismatic y Thinkers, A mi amigo y padrino Darío, que estuvo ahí para ayudarme, explicarme y darme palabras de aliento.

Al Dr. Sanjeet Kumar Verma por su apoyo y confianza para permitirme trabajar con él, gracias por los consejos y los regaños. Ha sido un largo camino en el cual aprendí mucho de él, gracias por ser mi profesor y una gran persona.

Al Dr. José Ramón Torres Hernández, por ser mi guía en este trabajo, por su paciencia al explicarme cosas que no comprendía y ser un excelente maestro.

A mi comité, los doctores Aaron Martín y Pablo Dávila Harris, que me indicaron críticas constructivas y como mejorar mi trabajo.

Quiero agradecer a la M. en C. María Mercedes Zavala por su amistad y su tiempo al enseñarme la elaboración de las láminas delgadas.

A Ivonne, Edith y Tere, que siempre se preocupan por los estudiantes y nos ayudan en cada paso que damos.

A los doctores José Alfredo Ramos Leal, J. Sergio Casas Flores, Leonardo Chapa Vargas, Cesar Octavio Maldonado Ahumada y Luis Antonio Salazar Olivo, por creer en mí y mostrar interés en mi crecimiento profesional.

A IPICYT y a la División de Geociencias Aplicadas, por permitirme utilizar los laboratorios y áreas de investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el otorgamiento de la beca de maestría en el programa Maestría en Geociencias Aplicadas.

CONTENIDO

Constancia de aprobación de la tesis	II
Créditos Institucionales.....	III
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
RESUMEN	XVI
ABSTRACT.....	XVII
CAPÍTULO 1.GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Proyecto de estudio	2
1.2.1 Justificación.....	2
1.2.2 Objetivo general.....	3
1.2.3 Objetivos específicos.....	3
1.2.4 Hipótesis	3
1.2.5 Localización y vías de acceso	4
CAPÍTULO 2.MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	6
2.1 Antecedentes y geología regional	6
2.1.1 Mesa Central (MC).....	7
2.1.2 Sierra Madre Occidental (SMOc)	9
2.1.3 Sistema de fallas San Luis-Tepehuanes.....	12
2.1.4 Fallas en el área LMVC.....	12
2.2 Fisiográfica de Zacatecas.....	15

2.3	Actividad volcánica de la región de Zacatecas	16
CAPÍTULO 3.MARCO GEOLÓGICO LOCAL		20
3.1	Geología local.....	20
3.2	Estratigrafía local	22
3.2.1	Basamento	22
3.2.2	Conglomerado Rojo de Zacatecas	23
3.2.3	Ignimbrita la Virgen	25
3.3	Estratigrafía de LMVC	29
3.3.1	Zona Noreste (NE)	29
3.3.2	Domos	31
3.3.3	Zona Suroeste (SO)	32
3.3.4	Estructura.....	34
CAPÍTULO 4.METODOLOGÍA		35
4.1	Muestreo	35
4.2	Análisis petrográfico.....	37
4.3	Análisis geoquímico	38
4.3.1	Perdida de ignición (LOI)	40
4.4	Incertidumbres y limitaciones.....	42
CAPÍTULO 5.RESULTADOS		46
5.1	Análisis petrográfico.....	46
5.1.1	Grupo Traquitas	46
5.1.2	Grupo Dacitas	48
5.1.3	Grupo Riolitas	50
5.2	Análisis de mineralogía	53

5.3	Análisis geoquímico	55
5.3.1	Clasificación del magma	60
5.3.2	Elementos mayores.....	61
5.3.3	Elementos traza y Elementos Tierras Raras (REE).....	62
CAPÍTULO 6.DISCUSIÓN		66
6.1	Alteración.....	66
6.2	Procesos petrogenéticos	68
6.2.1	Fuente del magma.....	68
6.2.2	Fusión parcial de rocas félsicas	72
6.3	Modelo tectono-térmico y ambientes tectónicos	75
CAPÍTULO 7		79
CONCLUSIÓN		79
REFERENCIAS		81
ANEXOS		87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Incertidumbre en la medición para cada elemento mayor en términos de %. Elaboradas en el programa Igrocs http://tlaloc.ier.unam.mx/igrocs	43
Tabla 2. Contenido mineralógico de las rocas ácidas de LMVC, identificadas mediante la técnica de Difracción de Rayos X.	55
Tabla 3. Composiciones representativas de elementos mayores (en wt.%) de las rocas ácidas de LMVC. Las coordenadas se encuentran en datum WGS 84, Z 13 N.	56
Tabla 4. Composiciones representativas de elementos traza y tierras raras (ppm) de las rocas ácidas de LMVC. Las coordenadas se encuentran en datum WGS 84, Z 13 N.	58

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Mapa de localización del área de estudio, mostrando las principales vías de acceso que conectan al estado de San Luis Potosí con Zacatecas, se muestra que la carretera federal 49 conduce de la ciudad de San Luis Potosí a la zona de estudio..... 5
- Figura 2.** Mapa de las provincias fisiográficas que cubren el estado de Zacatecas. La ubicación de la zona de estudio está marcada en cuadro color rojo en el borde de la provincia fisiográfica SMO 11
- Figura 3.** Esquema del sistema de fallas San Luis-Tepehuanes (SL-T) separa las porciones septentrional y meridional de la Mesa Central y marca el límite de las provincias SMOC y MS (tomado y modificado de Loza Aguirre et al., 2008). El área de estudio es marcada en el cuadro color rojo y se encuentra en intersección con el sistema de fallas SL-T 13
- Figura 4.** Esquema estructural del Cerro La Virgen (tomado de Loza-Aguirre et al., 2008) 14
- Figura 5.** Esquema dinámico donde se muestra a la placa de Rivera en contacto con la placa Norteamericana (tomado y modificado de Loza-Aguirre et al., 2008), además de mostrar la fisiografía dónde se muestran los límites de las provincias Sierra Madre Occidental (SMOc) y Mesa Central (MC), en color rojo se ubica La Mesa Virgen Calerilla (LMVC) 17
- Figura 6.** Localización de la zona de estudio al sur de la ciudad de Zacatecas, además de mostrar la parte estructural del distrito minero de zacatecas, en color rojo se ubica La Mesa Virgen Calerilla (LMVC), en color azul las vetas La Cantera, Veta Mala Noche, Veta Grande y Veta Pánuco-Plomoso (tomado y modificado de Tristán-González et al., 2012) 19
- Figura 7.** Modelo de Elevación del área de estudio LMVC. Hecho en GeoMapApp 21
- Figura 8.** a) Conglomerado Rojo de Zacatecas (CRZ), se muestra con color de intemperismo rojizo además de estar intrusionado por un domo riolítico. Se observa en las inmediaciones de la zona de estudio a un costado de la carretera, b) CRZ visible en la zona norte del área de estudio, en contacto con el depósito de las rocas riolíticas. 24

Figura 9. a) Unidad de la ignimbrita la Virgen intemperizada. b) Recolección de muestra de la ignimbrita la Virgen. 25

Figura 10. Características de los tipos de roca en las zonas: a) Ignimbrita masiva con presencia de líticos de la zona NE. b) Depósito piroclástico de la zona SO... 27

Figura 11. Mapa geológico de LMVC, A-A' y B-B' correspondientes a la zona NE y SO, respectivamente. Los puntos de muestreo (verde) NE y (azul) SO también indican la ubicación de las columnas estratigráficas mostradas más adelante 28

Figura 12. Mapa geológico de LMVC, A-A' y B-B' correspondientes a la zona NE y SO, respectivamente. Los puntos de muestreo (verde) NE y (azul) SO también indican la ubicación de las columnas estratigráficas mostradas más Adelante..... 30

Figura 13. a) Domo riolítico encajonando al conglomerado rojo de Zacatecas intemperizado. B) Mismo domo riolítico desde el norte de LMVC se observa la continuación de la estructura y la relación con la falla a su paso, c) Domo riolítico perteneciente a la zona NE. 31

Figura 14. Columna estratigráfica correspondiente a la Zona SO de LMVC (Figura 11, representada con marca verde en el mapa geológico), presenta potentes depósitos piroclásticos de edad Oligoceno con variados tamaños de líticos negros y pómez además de ignimbritas bien soldadas (imagen b), la parte superior presenta secuencias con fiames (imagen a). 33

Figura 15. Imagen satelital del área de estudio donde se muestra los puntos de muestreo. Al norte de la imagen en la parte central, se encuentra la ciudad de Zacatecas. (Imagen satelital fuente Esri Digital Globe GeoEye Earthstar Geographics CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and THE GIS User Community 36

Figura 16. Triturador del laboratorio de petrografía de la División de Geociencias Aplicadas, IPICYT. 39

Figura 17. Molino planetario Pulverisette 6 de ágata marca Fritsch. 39

Figura 18. A la izquierda tamaño ideal de las pastillas. A la derecha se muestra las pastillas dentro de los contenedores para su análisis bajo fluorescencia. 41

Figura 19. Fotomicrografía de las muestras traquitas, utilizando el objetivo 4.0/0.10X en nicols cruzados (NX). La línea color amarillo en la parte inferior derecha representa 1cm de escala. Las fotomicrografías de la parte superior corresponden a la muestra ZAC-01 y las de la parte inferior a la muestra ZAC-04. Abreviaciones: Kfs–feldespato potásico, Pl–plagioclasa, Qz–cuarzo, Sn–sanidino, Bt–biotita, Op–minerales opacos..... 47

Figura 20. Fotomicrografía del grupo de las muestras dacitas, utilizando el objetivo 4.0/0.10X en nicols cruzados (NX). La línea color amarillo en la parte inferior derecha representa 1cm de escala. Las fotomicrografías de la parte superior corresponden a la muestra ZAC-11, las intermedias son pertenecientes a la muestra ZAC-12 y las de la parte inferior a la muestra ZAC-17. Abreviaciones: Kfs–feldespato potásico, Pl–plagioclasa, Qz–cuarzo, Sn–sanidino, Bt–biotita, Op–minerales opacos..... 49

Figura 21. Fotomicrografía del grupo de las muestras riolitas, utilizando el objetivo 4.0/0.10X en nicols cruzados (NX). La línea color amarillo en la parte inferior derecha representa 1cm de escala. Las fotomicrografías de la parte superior corresponden a la muestra ZAC-1, las intermedias son pertenecientes a la muestra ZAC-12 y las de la parte inferior a la muestra ZAC-17. Abreviaciones: Kfs–feldespato potásico, Pl–plagioclasa, Qz–cuarzo, Sn–sanidino, Bt–biotita, Op–minerales opacos..... 52

Figura 22. Difractogramas de las muestras representativas de la composición mineralógica de LMVC; Zac-02, Zac-12, Zac-17 y Zac-18..... 54

Figura 23. a) Clasificación a partir del diagrama de TAS (Le Bas et al., 1986), b) diagrama alcalinidad-aluminosidad (A/CNK vs A/NK), para las rocas volcánicas de LMVC, CVP y CSSM. Abreviaciones: LMVC– La Mesa Virgen Calerilla, CVP– Complejo Volcánico Pinos, CSSM–Complejo Sierra San Miguelito, R–riolita, T–traquita, D–dacita, TD–traquidacita. 61

Figura 24. a) Diagramas de condrita normalizados (Valores de condrita tomados de McDonough y Sun, 1995) para las rocas volcánicas de LMVC, b) Diagramas de condrita normalizados para las rocas volcánicas de CVP y CSSM. Abreviaciones: LMVC– La Mesa Virgen Calerilla, CVP–Complejo Volcánico Pinos, CSSM– Complejo Sierra San Miguelito, R–riolita, T–traquita, D–dacita, TD–traquidacita. 64

Figura 25. Diagramas multielementos normalizados a manto primitivo (datos de normalización en ppm, tomados de McDonough y Sun, 1995). (a) Diagrama para las rocas volcánicas de LMVC, (b) Diagrama para las rocas volcánicas de literatura CVP y CSSM. Abreviaciones: LMVC– La Mesa Virgen Calerilla, CVP–Complejo

Volcánico Pinos, CSSM–Complejo Sierra San Miguelito, R–riolita, T–traquita, D–dacita, TD–traquidacita. 65

Figura 26. Diagramas basados en Zr en relación con los elementos traza Nb, Hf, Ce, Sm para mostrar si hay alteración completa en la roca. Se logra apreciar una tendencia normal, donde no se ve alteración alguna. 67

Figura 27. (a) Diagrama (Nb/Yb) con relación (Th/Yb) de variación geoquímica de rocas volcánicas de LMVC, CVP y CSSM. Abreviaciones: N-MORB–normal Mid-Ocean Ridge basalt, E-NORM–enriquecido Mid-Ocean Ridge basalt, OIB–Ocean Island basalt, LCC–Corteza continental inferior, MCC–Corteza continental media, UCC–Corteza continental superior, LMVC–La Mesa Virgen Calerilla, CVP–Complejo Volcánico Pinos, CSSM–Complejo Sierra San Miguelito, R–riolita, T–traquita, D–dacita, TD–traquidacita. 68

Figura 28. Diagrama de variación geoquímica de rocas volcánicas de LMVC, CVP y CSSM. Diagrama (b) (Eu/Eu*) con relación a (Gd/Yb); (c) (Th/Yb) con relación (Nb/Ta). Abreviaciones: OIB–Ocean Island basalt, LCC–Corteza continental inferior, MCC–Corteza continental media, UCC–Corteza continental superior. Los símbolos mencionados en la Figura 25a. 70

Figura 29. Modelo cuantitativo de fusión parcial para las rocas félsicas del LMVC. (a) Patrones de elementos de tierras raras normalizados con condrita para la corteza continental inferior (LCC), (b) patrones de elementos de tierras raras normalizados con condrita para la corteza continental superior (UCC). Grado de fusión $F = 0.2-0.5$ (20%-50%). Valores de LCC y UCC tomados de Rudnick y Gao (2003). 71

Figura 30. (a) Diagrama de variación Ce-(Ce/Yb); (b) La- (La/Yb) que ilustra los efectos de fusión parcial y cristalización fraccionada. Abreviaciones: LMVC–La Mesa Virgen Calerilla, CVP–Complejo Volcánico Pinos, CSSM–Complejo Sierra San Miguelito, R–riolita, T–traquita, D–dacita, TD–traquidacita. 73

Figura 31. (c) Diagrama Y-(Dy/Yb) muestra un modelo cuantitativo de fusión parcial para las rocas félsicas del LMVC. Se generaron curvas de fusión parcial (líneas azul, naranja y verde) al grado de fusión $F = 0.05-0.95$ (5–95%), aplicando “batch melting” ecuación de Zou (2007). El símbolo de diamantes negro corresponde a los valores de granulitas máficas (G1), metasedimento granulito (G2) y corteza continental superior (UCC). Los valores de granulitas se toman de Schaaf et al. (1994.) El valor de la corteza continental superior se toma de Rudnick y Gao (2003). 74

Figura 32. Diagrama de discriminación tectónica multidimensionales (Verma et al., 2013) aplicadas para las rocas de LMVC, CVP y CSSM. Abreviaciones: LMVC– La Mesa Virgen Calerilla, CVP–Complejo Volcánico Pinos, CSSM–Complejo Sierra San Miguelito, R–riolita, T–traquita, D–dacita, TD–traquidacita, IA–Arco de Isla, CA–Arco-Continental, CR–Continental Rift y OI–Isla de Oceánico..... 77

RESUMEN

La Mesa Virgen Calerilla (LMVC) está localizada al sureste de las ciudades de Zacatecas y Guadalupe en el estado de Zacatecas, México. Forma parte de un gran bloque levantado de orientación NE, que expone parte de un basamento formado por rocas marinas del Triásico superior con bajo grado de metamorfismo, cubiertas discordantemente por una secuencia de rocas volcanosedimentarias asociadas a un arco volcánico oceánico del Jurásico Superior-Cretácico Inferior. Sobre este basamento, en forma discordante, se exponen depósitos continentales y productos de actividad volcánica tanto efusiva como explosiva, en un mismo tiempo en donde se desarrollaban cuencas tectónicas importantes durante el Eoceno superior; la más importante de estas es en donde se ubican las Ciudades de Zacatecas y Guadalupe. El vulcanismo más intenso, ocurrido durante el Oligoceno, en donde se formaron extensos depósitos de ignimbritas intercaladas en algunas partes con derrames de lava de composición riolítica. El cuál es el vulcanismo félsico que conforma la denominada LMVC.

El área de LMVC cubre un espectro compositivo que va desde dacita, traquita y riolita con alto contenido en sílice. En esta tesis, se realizó un estudio geológico, mineralógico y geoquímico para abordar la petrogénesis y la configuración tectónica de las rocas riolíticas de LMVC. La petrografía y el ensamblaje mineral indica que las rocas riolíticas están compuestas por feldespatos potásicos (sanidino), plagioclasa, cuarzo y biotita. Las rocas riolíticas son caracterizadas por 64–78 wt%, $(\text{SiO}_2)_{\text{adj}}$, 0.11–0.69 wt%, $(\text{TiO}_2)_{\text{adj}}$ and 0.02–0.82 wt% $(\text{MgO})_{\text{adj}}$ con número de Mg de 19-84 [$\text{Mg\#} = 100 \times (\text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+}))$]. Estas rocas volcánicas están enriquecidas en elementos litófilos de ion grande (LILE) y elementos ligeros de tierras raras (LREE; $\text{La/Nb} = 1.89\text{--}7.87$), y se reducen en elementos de alta intensidad de campo (HFSE; $\text{Th/Yb ratios} < 3.09$) y elementos de tierras raras pesadas [HREE; $(\text{Tb/Yb})_{\text{N ratios}} 0.35\text{--}1.84$], junto con anomalías negativas de Ba, Nb, Sr, P, Eu y Ti. Las características geoquímicas y el modelo petrogenético indican que las rocas volcánicas se derivan de la fusión parcial de una corteza continental media-superior. El modelo tectono-térmico y diagrama multidimensional de discriminación tectónica indican que un entorno extensional relacionado prevaleció para LMVC.

ABSTRACT

The Mesa Virgen Calerilla (MVC) is located southeast of the cities of Zacatecas and Guadalupe in the state of Zacatecas, Mexico. It is part of a large raised block facing NE, which exposes part of a basement formed by upper Triassic marine rocks with a low degree of metamorphism, discordantly covered by a sequence of volcano-sedimentary rocks associated with an oceanic volcanic arc from the Upper Jurassic to Lower Cretaceous. Discordantly over the basement, continental deposits and products of effusive and explosive volcanic activity are exposed, while major tectonic basins were developed during the Upper Eocene, where the cities of Zacatecas and Guadalupe are located. The most intense volcanism, which occurred during the Oligocene, formed extensive ignimbrites deposits exposed in some parts as lava spills of rhyolitic (felsic) composition. This felsic volcanism may take part to makes up the MVC.

The MVC covers a compositional spectrum ranging from dacite, trachydacite to high-silica rhyolite. In this thesis, a geological, mineralogical and geochemical study was undertaken to address the petrogenesis and tectonic setting of the rhyolitic rocks from the MVC. The petrography and mineral assemblages indicate that the rhyolitic rocks composed of the k- feldspar (sanidine), plagioclase, quartz and biotite. The rhyolitic rocks are composed of 64–78 wt% (SiO₂)_{adj}, 0.11–0.69 wt% (TiO₂)_{adj} and 0.02–0.82 wt% (MgO)_{adj} with 19–84 Mg number [$Mg\# = 100 \times (Mg^{2+}/(Mg^{2+} + Fe^{2+}))$]. These volcanic rocks are enriched in large-ion lithophile elements (LILE) and light rare earth elements (LREE; La/Nb = 1.89–7.87), and are depleted in high-field-strength elements (HFSE; Th/Yb ratios <3.09) and heavy rare earth elements [HREE; (Tb/Yb)_N ratios 0.35–1.84], along with negative Ba, Nb, Sr, P, Eu and Ti anomalies. The geochemical characteristics and petrogenetic modelling indicate that volcanic rocks are derived from partial melting of an upper-middle continental crust. The tectono-thermal model and multidimensional tectonic discrimination diagram indicate that an extensional related setting prevails for the MVC.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 Introducción

El estado de Zacatecas se ha posicionado en la historia del país como un distrito minero importante por su producción de Plata (Ag), Oro (Au), Plomo (Pb), Zinc (Zn) y cobre (Cu). Este se encuentra en el borde de las provincias fisiográficas de la Sierra Madre Occidental (SMOc) y la Mesa Central (MC). La SMOc es una de las provincias de rocas félsicas del Cenozoico más grandes (McDowell y Clabaugh 1979; Ferrari et al., 2002). La cubre un área expuesta de aproximadamente 300 000 km² y consiste predominantemente de rocas riolíticas, lavas e ignimbritas (McDowell y Clabaugh, 1979; Ward, 1995). Se han definido a estas rocas volcánicas como el “subgrupo volcánico superior” (McDowell y Keizer, 1977) las cuales presentaron actividad eruptiva entre los 38–20 Ma (McDowell y Clabaugh 1979; Ferrari et al., 2002). El área de estudio (La Mesa Virgen Calerilla-LMVC) se encuentra en la provincia de la SMOc. La LMVC cubre un espectro de composición de rocas volcánicas que abarcan dacitas, traquitas y riolitas las cuales muestran un alto contenido en sílice. Se han realizado distintos trabajos de la SMOc, los cuales se han enfocado a conocer la geología regional, estratigrafía, cartografía, geofísica, características geoquímicas, geocronología, metalogenia y evidencias tectónicas (McDowell y Clabaugh, 1979; Nieto-Obregón et al., 1981; Verma, 1984; Lang et al., 1988; Ponce y Clark, 1988; Webber et al., 1994; CRM, 1997; Nieto-Samaniego et al., 1999; Escalona-Alcázar et al., 2003; Ferrari et al., 2005; Zamora-Vega et al., 2018; Verma et al., 2019 y referencia en el mismo). Sin embargo, incluso con la amplia información documentada a lo largo de la SMOc, aún existen regiones donde falta información detallada, tal es el caso de LMVC, en donde la información estratigráfica, petrológica y geoquímica ha sido escasa. Dentro de LMVC, los trabajos previos realizados han sido los estudios propuestos por Ponce y Clark (1988), en donde propusieron un orden estratigráfico de las rocas volcánicas de LMVC, como a su vez, propusieron la primera edad para las rocas félsicas de esta región la cual marca una edad del Eoceno (36.8 Ma). Por otra parte, Escalona-

Alcázar et al. (2003), reporta información geológica que apoyan a las características litológicas propuestas previamente por Ponce y Clark (1988). Recientemente, Zamora-Vega et al. (2018), aportan nuevas edades para las rocas ígneas de la región como a su vez, proponen que las emisiones de las rocas volcánicas estuvieron controladas por las estructuras tectónicas (fallas y fracturas) regionales.

La generación de nueva información petrológica y geoquímica de las rocas volcánicas de LMVC ayudarán a comprender el origen y la evolución de la generación magmática, así como el conocer el ambiente tectónico al que se relacionaron. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio es presentar análisis geoquímicos y petrográficos detallados de rocas volcánicas en el área de LMVC.

1.2 Proyecto de estudio

1.2.1 Justificación

Se han propuestos diversos trabajos para el área de la Mesa Virgen Calerilla, estos principalmente enfocados en la descripción estratigráfica y geológica de las distintas litologías y rasgos estructurales presentes en el área (Ponce y Clark, 1988; Escalona-Alcázar et al., 2003, 2010; Tristán-González et al., 2012). Sin embargo, debido a la escasa información petrográfica, mineralógica y geoquímica de las rocas volcánicas no se ha definido de manera formal el origen y ambiente tectónico del magmatismo del área, por lo tanto, se propone establecer la evolución a partir de información petrográfica, composición geoquímica y datos petrológicos, como de modelos petrogenéticos de las rocas félsicas de LMVC.

1.2.2 Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo es el definir la génesis de la secuencia de las rocas volcánicas que conforman la Mesa Virgen Calerilla, Zacatecas, permitiendo conocer el origen y evolución magmática a partir de información y su distribución regional.

1.2.3 Objetivos específicos

Los objetivos específicos para el presente estudio son:

1. Reportar las características petrográficas (mineralogía y texturas) de las unidades félsicas que forman a LMVC apoyado por un análisis petrográfico clásico junto con un análisis de difracción de Rayos X (DRX).
2. Elaborar estudios geoquímicos de las unidades empleando las técnicas (i) Fluorescencia de Rayos X (FRX) para elementos mayores; (ii) ICP-MS para elementos traza y tierras raras.
3. Interpretación de los resultados geoquímicos a través de la elaboración de diversos diagramas y generación de modelos petrogenéticos para las unidades volcánicas que ayuden a determinar el origen del magma.

1.2.4 Hipótesis

Para el presente trabajo se han planteado las siguientes hipótesis:

1. El origen de las rocas volcánicas de composición félsica de LMVC se relaciona a un proceso de fusión parcial cortical.
2. El magmatismo félsico se originó en un ambiente transicional, de acuerdo con la localización fisiográfica de la zona de estudio, es muy probable que en el origen del magma estuvo en interacción directa una de las cortezas.
3. Es posible que el tipo de corteza (se asume una corteza oceánica compleja) es atravesada por el magma se refleje en las rocas de LMVC.

1.2.5 Localización y vías de acceso

El área de estudio se encuentra en la inmediación de las ciudades de Zacatecas y Guadalupe. Sin complicaciones de acceso y partiendo de la capital zacatecana, la LMVC se encuentra aproximadamente a 20 km al sur de esta y a 30 km al este del municipio de Jerez de García Salinas.

La principal vía de acceso desde la ciudad de San Luis Potosí es tomando la Carretera Federal No. 49 San Luis Potosí-Zacatecas, incorporarse a la Carretera Federal No. 45 Trancoso-Guadalupe hasta interceptar con la Avenida Jesús Reyes Heróles, para después entrar por la calle Camino a las Antenas a un costado de la colonia Lomas Bizantinas (Figura 1). Presenta un área aproximada de 86 km², las coordenadas UTM son indicadas en la tabla 1 de la sección de resultados.

Es conocido como el Cerro de las Antenas por los zacatecanos, ya que en ese lugar se encuentran en operación varias antenas microondas transmisoras de radiodifusoras, televisoras y empresas digitales, por lo que el área cuenta con caminos de terracería y algunos tramos de camino pavimentado.

Simbología

- ★ Ciudades
- Área de estudio
- Carretera Federal 54
- Carretera Federal 49
- Carretera Federal 45

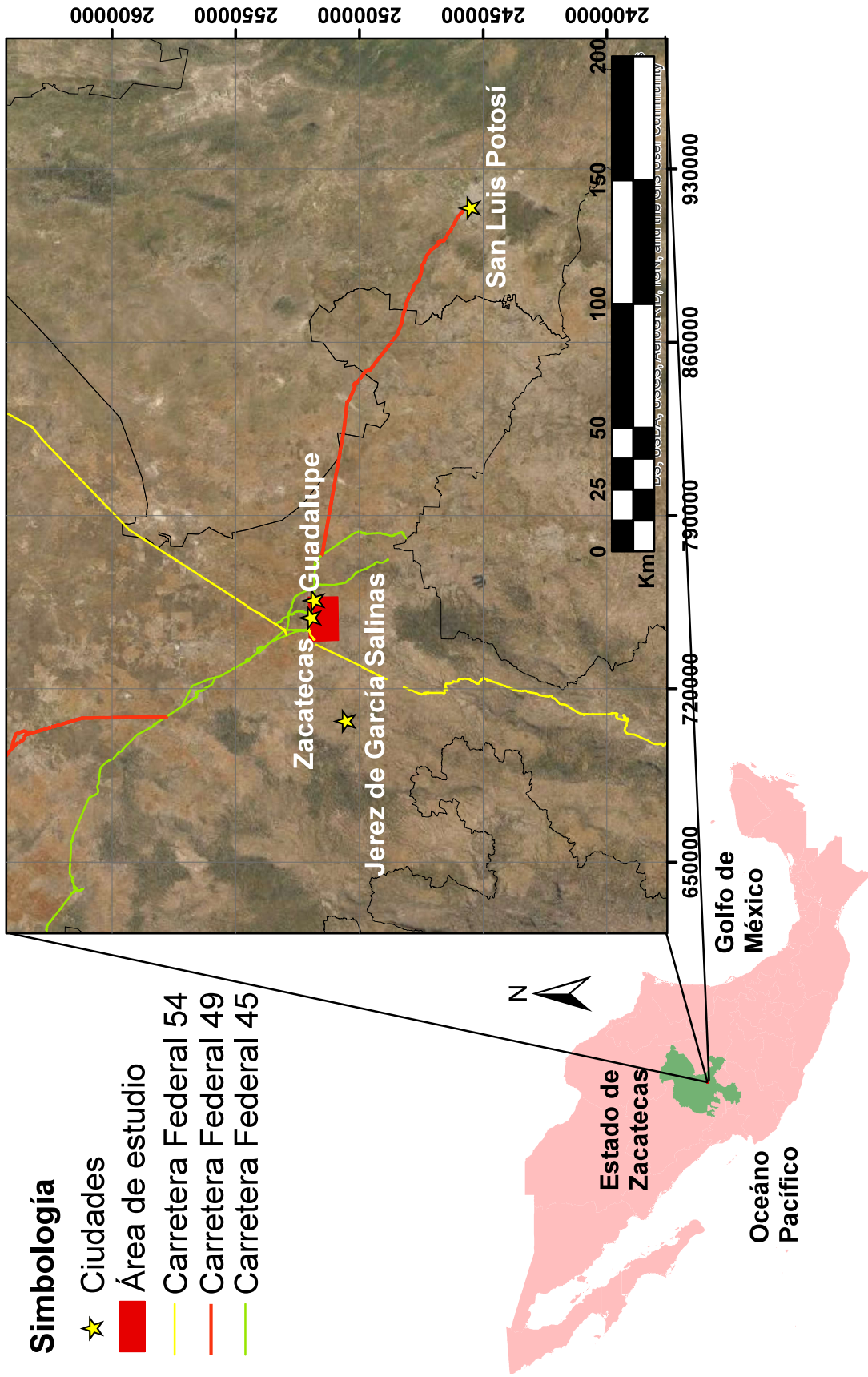


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio, mostrando las principales vías de acceso que conectan al estado de San Luis Potosí con Zacatecas, se muestra que la carretera federal 49 conduce de la ciudad de San Luis Potosí a la zona de estudio.

CAPÍTULO 2

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1 Antecedentes y geología regional

Conformado por una geología compleja, el estado de Zacatecas ha sido reconocido como uno de los mayores distritos mineros de la república y este podría ser el motivo para encontrar poca información petrogenética de sus secuencias estratigráficas principalmente de las rocas del Terciario, donde los trabajos geológicos están enfocados a la descripción de los yacimientos minerales (Escalona-Alcázar et al., 2003). LMVC se encuentra ubicada al sur de la ciudad de Zacatecas, justo en los bordes de la MC y la SMOc, provincias donde se han realizado diversos estudios, sin embargo, el interés y el contexto varía según los diferentes objetivos.

Nieto-Samaniego et al. (2005), propone que Zacatecas es afectado por fallas normales, como parte del sistema de fallas San Luis-Tepehuanes, dividiéndolo en cinco tramos. Este sistema de fallas abarca una franja de 30 km de ancho que va desde San Luis de la Paz, Guanajuato hasta Tepehuanes, Durango. Este sistema de fallas tiene estructuras muy conspicuas justo en el Distrito Minero de Zacatecas y ejerció un control importante en la mineralización (Tristán-González et al., 2012, 2015).

La estratigrafía de la Mesa Central no registra rocas paleozoicas, solamente se ha reportado un pequeño afloramiento (esquistos de moscovita) hacia los bordes de esta, al suroccidente de San Juan del Río, Durango (Nieto-Samaniego et al., 2005). En la MC los afloramientos cubren desde el Triásico Superior, siendo esta la etapa más antigua y ha sido determinada por el contenido fósil. En Zacatecas, las rocas triásicas son sedimentos clásticos con grados bajos de metamorfismo, hacia la base se presenta esquisto y filita con intercalaciones de arenisca y conglomerado; encima de esas rocas hay una secuencia de filita con arenisca y mármol (Nieto-Samaniego et al., 2005).

De acuerdo a los diferentes estudios de cartografía y datos geocronológicos publicados, las rocas félsicas del Terciario estuvieron asociadas a varios pulsos magmáticos que la SMOc experimentó a partir del Eoceno y culminaron con una actividad volcánica paroxismal en el Oligoceno (Ponce y Clark, 1988). Durante el Mioceno, el vulcanismo félsico en la parte sur de la Mesa Central fue muy limitado (Torres-Hernández, 2006; Tristán-González et al., 2009), y fue seguido tardíamente por un volcanismo intraplaca y acompañado por una extensión cortical, (Aranda-Gómez et al., 2000; Ferrari et al., 2005).

Ponce y Clark (1988), Escalona-Alcázar et al., (2003) y en la Carta Geológica a Escala 1: 50 000 editada por el Consejo de Recursos Minerales (1991) mencionan que los rasgos estructurales del distrito minero de Zacatecas son pertenecientes al Cenozoico y están asociados a dos eventos principales: el primero por la evolución de una caldera entre 46.8 y 36.8 Ma y el segundo provocado durante el periodo extensional del “*Basin and Range*”. Escalona-Alcázar et al. (2003) relaciona a este último evento con el fallamiento normal orientado de ENE-NE en la Sierra de Zacatecas.

Nieto-Samaniego et al. (2005), propone que Zacatecas es afectado por fallas normales, como parte del sistema de fallas San Luis-Tepehuanes, dividiéndolo en cinco tramos. Este sistema de fallas abarca una franja de 30 km de ancho que va desde San Luis de la Paz, Guanajuato hasta Tepehuanes, Durango. Este sistema de fallas tiene estructuras muy conspicuas justo en el Distrito Minero de Zacatecas y ejerció un control importante en la mineralización (Tristán-González et al., 2012, 2015).

2.1.1 Mesa Central (MC)

Esta provincia se localiza en la parte central de México, está flanqueada al norte y oriente por la Sierra Madre Oriental (SMOr), al oeste por la Sierra Madre Occidental (SMOc) y al sur con la provincia del eje Neovolcánico. Se distingue por sus amplios terrenos llanos interrumpidos por algunas sierras plegadas producto de

la Orogenia Laramide, y de bloques, producto de los eventos de extensión ocurridos en el Paleógeno. Ha sido estudiada en diferentes áreas con diversos fines, principalmente cartográfico-económico (publicaciones de Síntesis Geológico-Mineros por estados del Servicio Geológico Mexicano; y Cartografías 1: 50 000, y 1:250 000 por la misma institución), y en trabajos de investigación (p. ej., Carrillo-Bravo, 1982; Centeno-García y Silva-Romo, 1997; Hoppe, et al., 2002; Barboza-Gudiño 2012). Esta Provincia Geológica tiene una geología muy compleja, la cual ha sido excelentemente sintetizada por Nieto-Samaniego et al. (2005).

Nieto-Samaniego et al. (2005), divide a la MC en dos regiones de acuerdo a sus características topográficas y geológicas, la región sur con cotas por arriba de los 2000 msnm, siendo una zona montañosa cubierta en su mayor parte por rocas volcánicas cenozoicas. La región norte de mayor extensión con cotas menores a 2000 msnm, muestra un estado de erosión mucho más avanzado y cuenta con grandes cuencas continentales rellenas de sedimentos aluviales y lacustres.

En la porción oriental de la MC se encuentran las secuencias de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, las cuales consisten principalmente de rocas sedimentaria calcáreas marinas de edad Jurásico superior a Cretácico superior. Su geología se comparte con la SMOr. Hacia la parte central, aparecen rocas de cuenca marina que constituyen secuencias potentes de lutita y areniscas calcáreas, a esta porción se le conoce como la Cuenca Mesozoica del Centro de México. Justo en el margen con la SMOc, aparecen conjuntos volcanosedimentarios marinos en los que se reconocen espesores grandes de basaltos almohadillados con componentes sedimentarios que consisten principalmente en lutita, arenisca y unidades discontinuas de caliza; en algunas localidades con lavas intercaladas, (Nieto-Samaniego et al., 2005).

En la porción sur y suroriental de la MC se localizan varios campos volcánicos, donde sobresalen el Campo Volcánico de San Luis Potosí (CVSLP), Guanajuato, Río Santa María y Charcas (Labarthe-Hernández et al., 1982; Aranda-Gómez et al., 2007; Rodríguez-Ríos et al., 2007; Aguillón-Robles et al., 1994, 2014; López-García, 2010; Tristán-González et al., 2009, 2015). Estos campos son el resultado de los

diferentes pulsos volcánicos que iniciaron con un vulcanismo andesítico y que en su continuación en el Oligoceno son representados con un vulcanismo voluminoso de lavas y flujos piroclásticos de composición félsica. La característica más significativa del suroeste de la MC es la litología de rocas volcánicas de composición félsica, que regionalmente comparte con la SMOc.

2.1.2 Sierra Madre Occidental (SMOc)

Siendo una de las provincias más grandes e importantes para la república mexicana donde se asientan los principales distritos mineros y la más grande de composición silícica en el planeta, no ha sido tan estudiada como sus vecinas la MC y la SMOOr (Ferrari et al., 2002, 2005). Es una amplia meseta que se forma en el margen occidental, compuesta por impresionantes secuencias de ignimbritas, sin embargo, hacia la parte sur de esta es coronada por rocas volcánicas más jóvenes de mitad del Terciario, además es limitada por fallas a lo largo del noreste y suroeste McDowell y Clabaugh (1979). Trabajos previos han documentado la historia tectono-magmática de la SMOc (McDowell y Keizer, 1977; McDowell y Clabaugh, 1979; Henry y Fredrikson, 1987; Aguirre y McDowell, 1991; Aguirre-Díaz y Labarthe-Hernández, 2003; Ferrari et al., 2005).

El desarrollo y su evolución se han registrado como el resultado de un intenso magmatismo que tuvo más de dos ciclos y/o eventos de inyección de magma, este evoluciona como derrames intermedios y ácidos a través de un intenso fracturamiento y sistema de estructuras complejas de fallamientos, (Aranda-Gómez et al., 2000). Además, presenta un claro emplazamiento de batolitos de tipo granítico o diorítico característicos de las zonas montañosas. Varios han sido los trabajos que resaltan la importancia de la estrecha relación entre fallas normales y la actividad volcánica de la SMOc (Aguirre-Díaz y McDowell, 1993; Aranda-Gómez et al., 2000; Nieto-Samaniego et al., 1999; Orozco-Esquivel et al., 2002; Ferrari et al., 2002, Aguirre-Díaz y Labarthe-Hernández, 2003; Aranda-Gómez et al., 2007).

Nieto-Samaniego (1999) propone que las variaciones en la deformación y en el vulcanismo desde el Oligoceno en la porción sur de la provincia volcánica es consecuencia de la diferencia de grosor y composición de los principales bloques corticales que constituyen la SMOc y la MC. Lo que, en relación con los previos estudios en el resto de la provincia, se indica un desplazamiento hacia el oeste de la zona máxima de actividad volcánica y tectónica del Oligoceno-Mioceno, la evolución geológica asocia las rocas ígneas a diferentes episodios magmáticos que tentativamente se relacionan a la variación a lo largo de la subducción de la placa Farallón debajo de la Placa Norteamericana (Ferrari et al., 2005).

A partir del Eoceno los eventos más relevantes para la SMOc han sido vulcanismo y fallamiento, donde la actividad magmática asociada a la subducción dio origen a esta extensa provincia geológica. La composición silíceo-alcalina de la SMOc es debida al origen de los magmas que dan origen al llamado Supergrupo Volcánico Superior. Se deduce, que los magmas que originan a la SMOc son producto de una fusión parcial de la corteza causada por el emplazamiento de magmas basálticos provenientes del manto, esta idea está relacionada al contenido químico e isotópico de los xenolitos corticales del centro y norte de la república (Ruíz et al., 1988; Aranda-Gómez et al., 2000).

Las rocas volcánicas del Eoceno se han extendido a lo largo de la SMOc, sin embargo, en algunas áreas se encuentran ocultas bajo la extensa cubierta riolítica del Oligoceno (Nieto-Samaniego et al., 1999). Localmente en Zacatecas surgen ignimbritas expuestas y domos riolíticos del Eoceno y hacia la porción sur de la ciudad zacatecana donde se encuentra la zona de estudio (Figura 2), le corresponden a LMVC una serie de secuencias de flujos piroclásticos y lavas riolíticas coronadas por potentes ignimbritas bien soldadas que se encuentran sobreyaciendo al Conglomerado Rojo de Zacatecas (CRZ). La edad de las unidades que conforman esta secuencia en esta región ha sido establecida como Eoceno-Oligoceno debido a los trabajos de datación que han sido realizados por Ponce y Clark (1988) y Tristán-González et al. (2012).

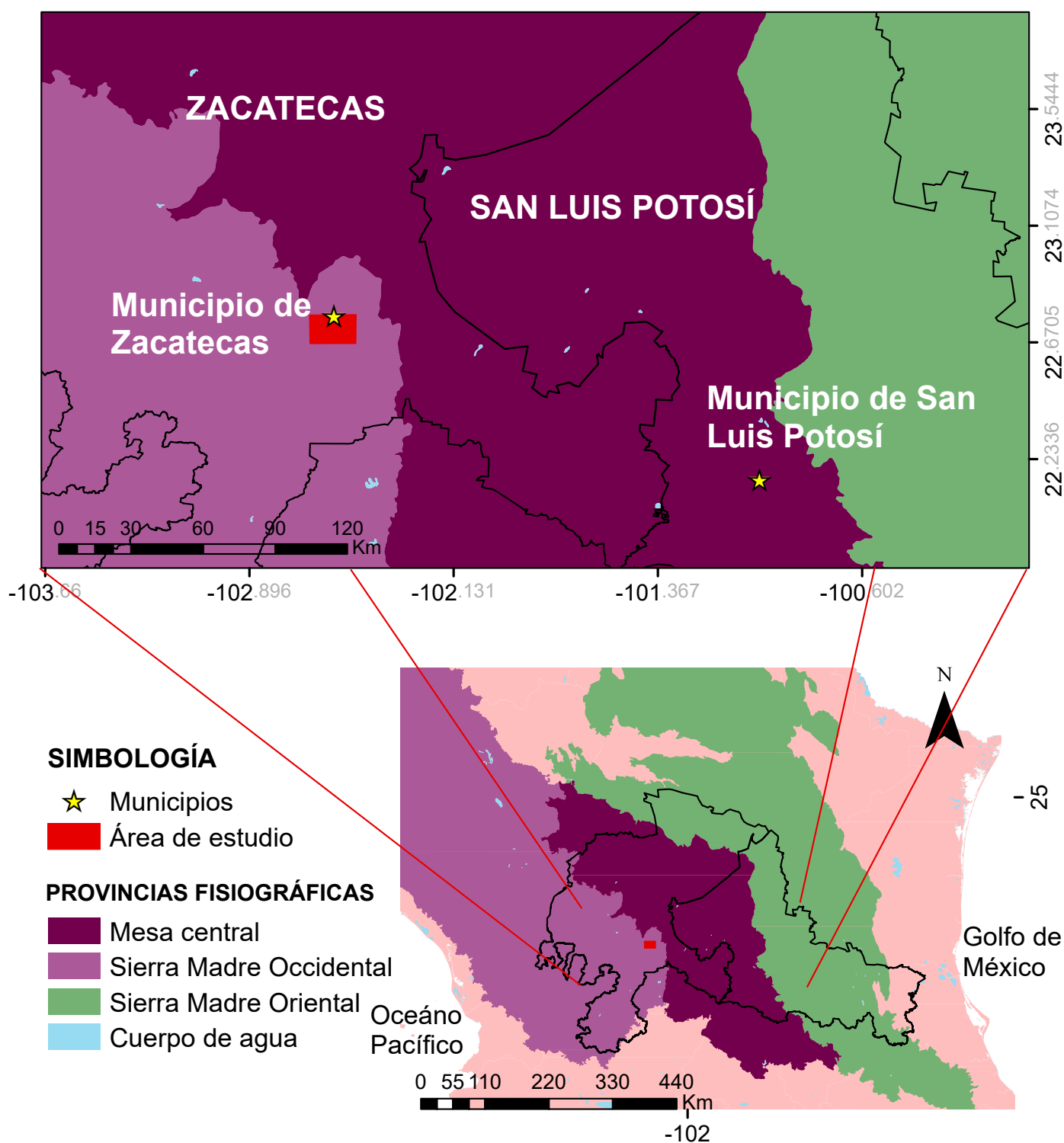


Figura 2. Mapa de las provincias fisiográficas que cubren el estado de Zacatecas. La ubicación de la zona de estudio está marcada en cuadro color rojo en el borde de la provincia fisiográfica SMOc.

2.1.3 Sistema de fallas San Luis-Tepehuanes

A través de diferentes autores, el Sistema de fallas San Luis-Tepehuanes (Sistema de Fallas SL-T) ha sido seccionado en varios trazos; la porción oriental abarcando desde San Luis de la Paz, Guanajuato, hasta Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí. En esta se encuentran algunas fosas tectónicas delimitadas por fallas normales con rumbo NW-SE y un buzamiento al SO, que han desplazado a rocas del oligoceno temprano, (Labarthe-Hernández et al., 1982; Tristán-González et al., 1986, 2015). Las principales fallas de Zacatecas (Figura 3) son estudiadas y propuestas por Nieto-Samaniego et al. (2005) como fallas normales que pertenecen al sistema de fallas SL-T. La información geológica de mayor interés es la que corresponde a la zona de las inmediaciones de la ciudad de Zacatecas, donde Tristán-González et al. (2012) realizan un estudio con un enfoque estructural en el Cerro la Virgen estudiando a detalle las fallas más grandes, encontrando como fallas más antiguas aquellas con dirección NO-SE y con un buzamiento que va de 50°-70° al SO con unas longitudes de 4 a 16 km, alojándose en ellas las vetas mineralizadas. Ponce y Clark (1988), Tristán-González et al. (2012, 2015) mencionan a las fallas La Plomosa, Tajos de Pánuco, Veta Grande, Mala Noche, Note, Cantera y San Rafael, éste último ubicado dentro de la zona urbana.

2.1.4 Fallas en el área LMVC

Escalona-Alcázar et al. (2003) en un estudio sobre los procesos geomorfológicos de posible riesgo geológico relacionado con las estructuras y características litológicas de las unidades afectadas por las fallas que delimitan a La Mesa Virgen Calerilla en la parte norte (Figura 4), describe la secuencia volcánica terciaria al sur de la ciudad de Zacatecas como relacionadas con las fallas extensionales de orientación NW-SE de la región. En esta zona han sido identificadas cuatro fallas normales mayores (Escalona-Alcázar et al., 2003; Loza-Aguirre et al., 2008; Tristán-González et al., 2012). Se les asocia el desnivel topográfico y el cambio de las secuencias visibles en campo, cuentan con un rumbo particular N70°W que buza hacia el NE, cortando las rocas félsicas del Eoceno-Oligoceno, y exponen también al basamento del Mesozoico (Loza-Aguirre et al., 2008).

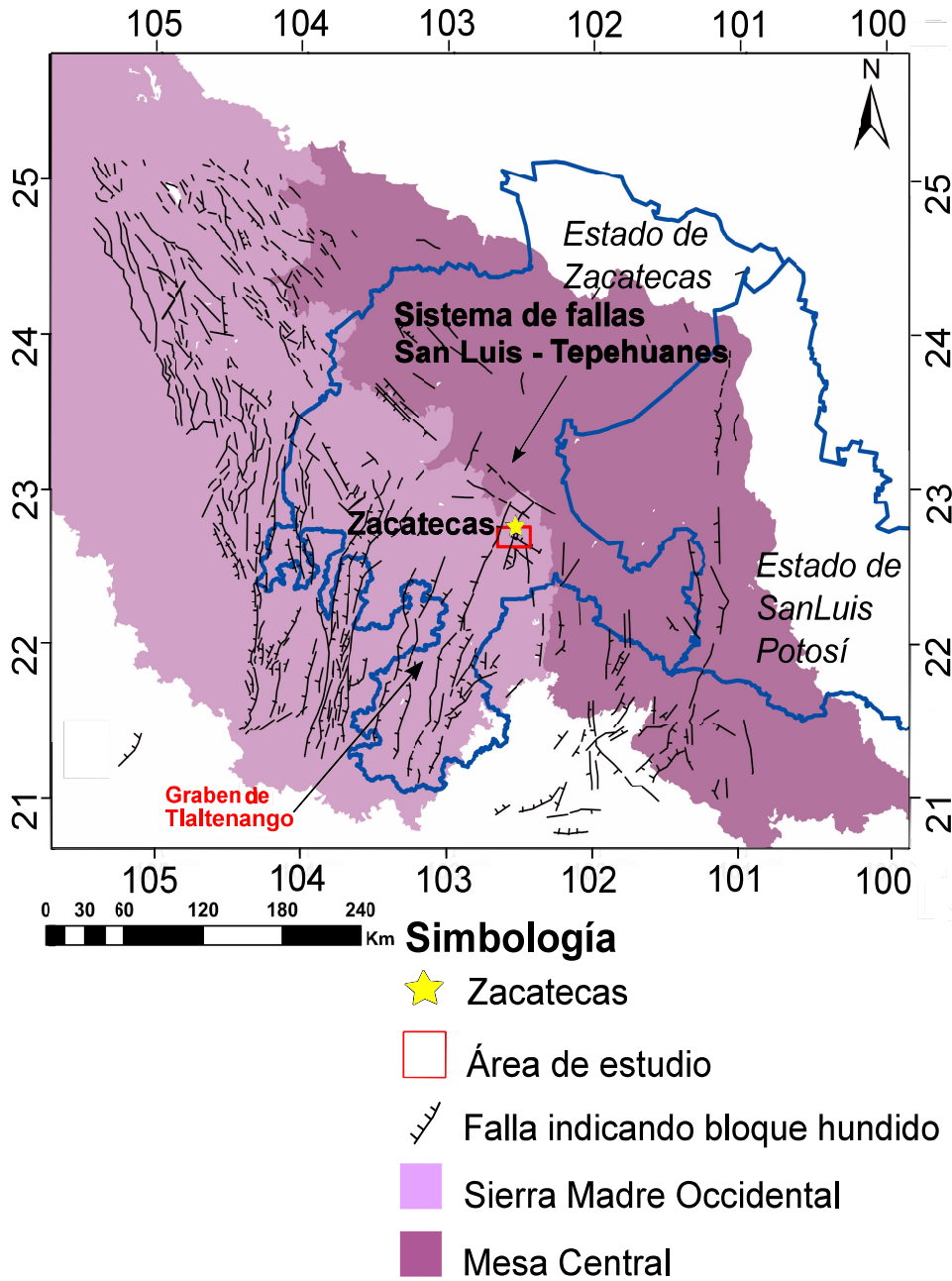


Figura 3. Esquema del sistema de fallas San Luis-Tepehuanes (SL-T) separa las porciones septentrional y meridional de la Mesa Central y marca el límite de las provincias SMOC y MS (tomado y modificado de Loza Aguirre et al., 2008). El área de estudio es marcada en el cuadro color rojo y se encuentra en intersección con el sistema de fallas SL-T.

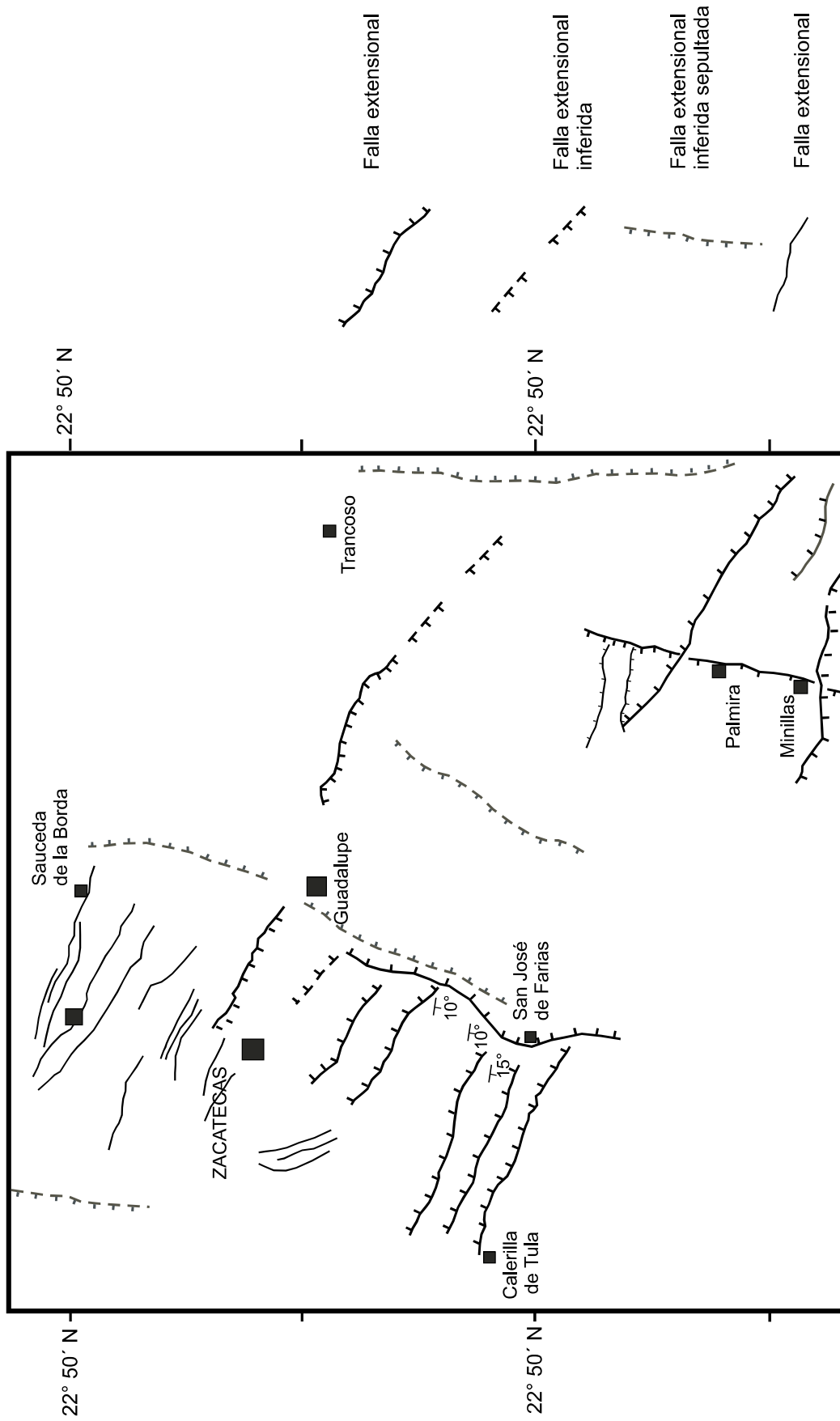


Figura 4. Esquema estructural del Cerro La Virgen basado en Loza-Aguirre et al., 2008.

2.2 Fisiográfica de Zacatecas

El área que cubre la carta Mesillas, queda ubicada en la provincia fisiográfica de la SMOc (Figura 2). La morfología de la SMOc, consiste principalmente de una superficie de mesas de riolitas que constituyen una amplia franja orientada al noreste y un conjunto de cañones profundos, producto del corte vertical por acción de las corrientes fluviales.

Los rangos morfológicos más sobresalientes en el área, corresponden a los cerros Grande, Rincón de Pérez, Los Gavilanes, Magdalena, El Petate y La Gloria con elevaciones promedio de 2,800 msnm; hacia la parte este de la carta se tienen los cerros: Las Pelusas, Cordón Los Arrieros, Los Escalones y El Venadito con altitudes de entre 2,300 a 2,500 msnm. En uno de los valles se encuentra el cañón de Juchipila con una altura mínima de 1,000 metros. En la ciudad de Zacatecas se encuentra el cerro de La Bufa con una altitud de 2650 msnm.

De acuerdo con la clasificación de provincias fisiográficas de INEGI (2011), la carta Mesillas forma parte de la Provincia SMOc, quedando casi la totalidad de la superficie en la subprovincia de Sierras y Valles Zacatecanos (SVZ) y solo en la esquina NW de la carta se presenta una pequeña superficie de la Subprovincia de Sierras y Llanuras de Durango (SLLD).

2.3 Actividad volcánica de la región de Zacatecas

Después de uno de los eventos más significativos para la geología mexicana, la orogenia Laramide, sucede el desplazamiento del arco magmático hacia el occidente durante el Terciario, afectando con intrusiones plutónicas y vulcanismo del occidente de México. De manera particular, la SMOc (Figura 5) está asociada a la evolución de la subducción Cretácico-Cenozoico de la placa de Farallón subduciendo debajo de la Placa Norteamericana. El magmatismo asociado a este proceso silícico dio origen a una de las más grandes provincias orográficas de México y su estudio está relacionado con la tectónica global.

McDowell y Clabaugh (1979) describe a la cubierta como ignimbritas silíceas de edad Oligoceno, sin embargo, el trabajo de Ferrari et al. (2002) comprobó que en esta región existieron dos pulsos ignimbríticos: uno del Oligoceno temprano y otro del Mioceno temprano. Las primeras se encuentran dominando la parte oriental distribuidas entre Zacatecas y Aguascalientes como secuencias de tobas de flujo de cenizas, depósitos piroclásticos e intercalaciones de ignimbritas altamente soldadas.

Estudios geofísicos han reportado la presencia de una corteza con espesor de 40 km, el manto superior por debajo de la SMOc. tiene una anomalía de baja velocidad que se extiende desde la provincia *Basin and Range* de Estados Unidos (Ferrari et al., 2005).

El área de estudio (LMVC) está ubicada dentro de la región de Cuencas y Sierras (CyS), esta provincia es caracterizada por la presencia de fosas, semifosas y pilares tectónicos, dichos sistemas fueron desarrollados durante el Oligoceno temprano (Tristán-González et al., 2012).

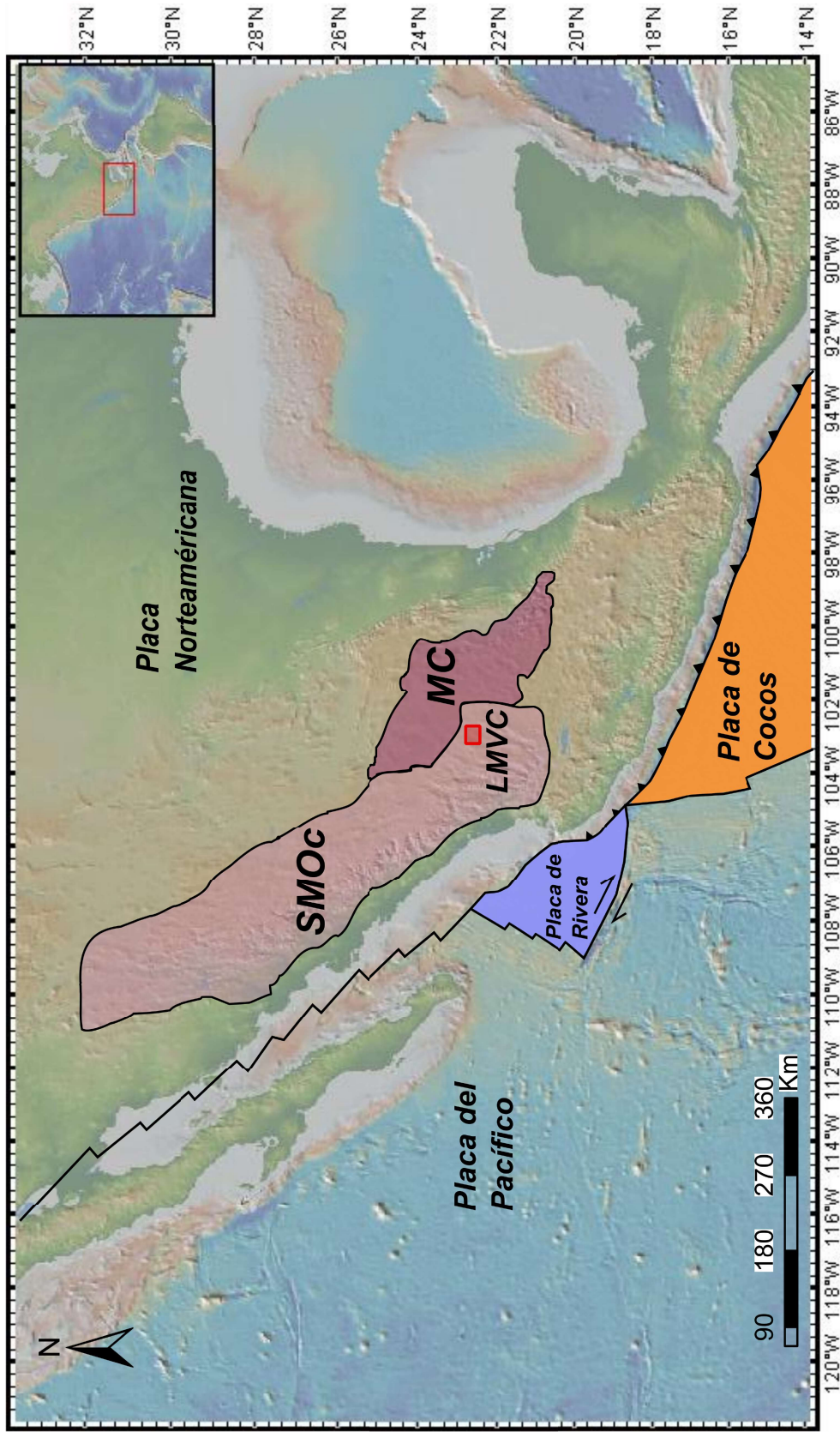


Figura 5. Esquema dinámico donde se muestra a la placa de Rivera en contacto con la placa Norteamericana (tomado y modificado de Loza-Aguirre et al., 2008), además de mostrar la fisiografía dónde se muestran los límites de las provincias Sierra Madre Occidental (SMOC) y Mesa Central (MC), en color rojo se ubica La Mesa Virgen Calerilla (LMVC).

Una porción de LMVC es parte de la Sierra de Zacatecas y se ha contemplado a lo largo de sus descripciones como un horst limitado por varias fallas normales, hacia el sur de la ciudad de Zacatecas se observan las elevaciones más altas de la dicha estructura. El distrito Zacatecano muestra estructuralmente una dirección preferencial N-S y NW-SE, bajo la cual se ha dirigido la mineralización de las vetas más grandes de Au-Ag relacionadas con el origen y evolución de la SMOc (Zamora-Vega et al., 2018).

Los sistemas de fallas en la región norte de la Sierra de Zacatecas se encuentran trazadas a lo largo por el emplazamiento de domos, producto de la actividad volcánica explosiva. El sur de la ciudad de Zacatecas en particular, se encuentra seccionada por cuatro fallas relevantes para la zona de estudio; La cantera, Mala Noche, Veta Grande y Pánuco con orientación NW-SE (Figura 6; Pérez Martínez et al., 1961; Ponce y Clark 1988; Tristán-González et al., 2012).

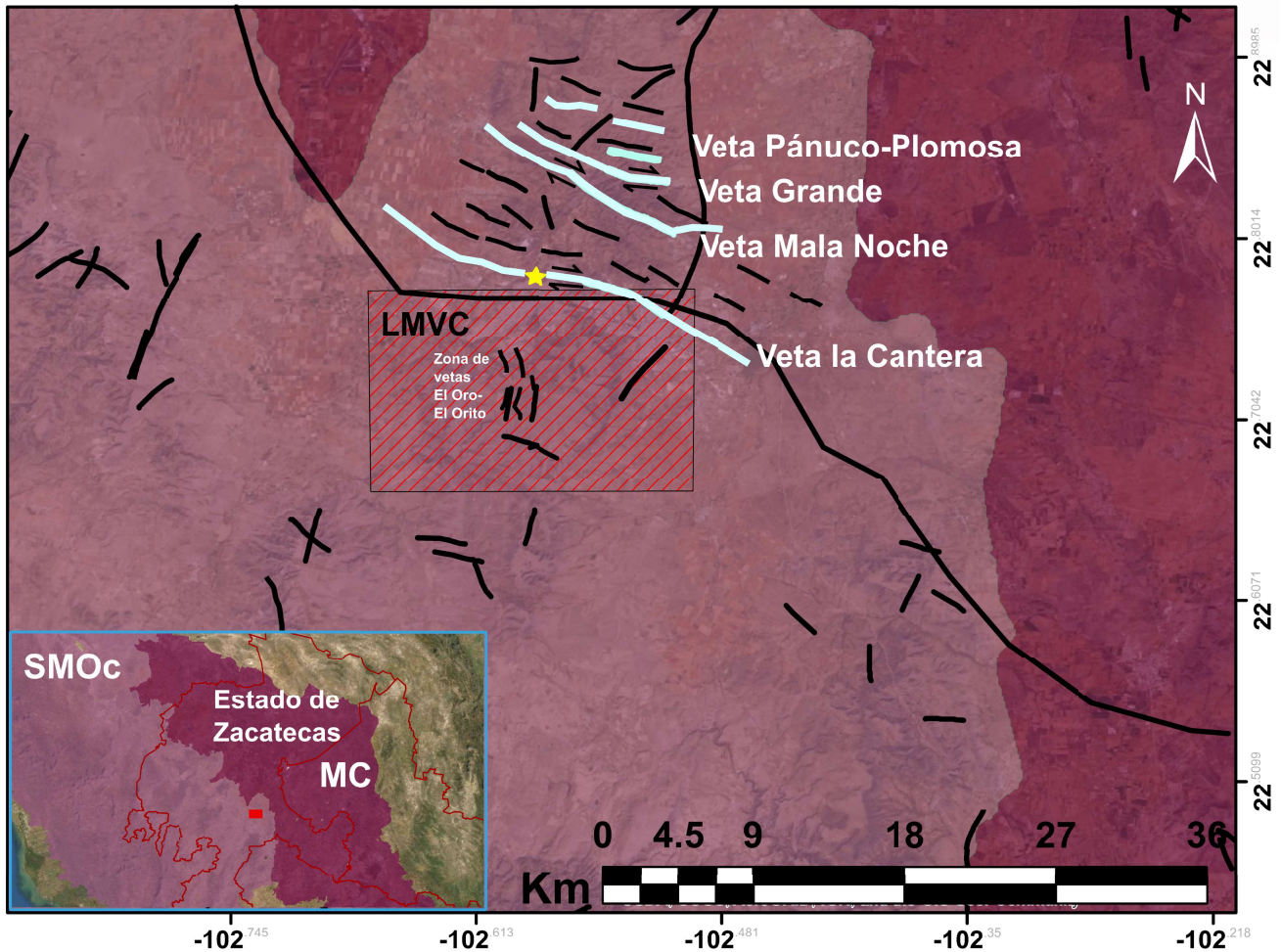


Figura 6. Localización de la zona de estudio al sur de la ciudad de Zacatecas, además de mostrar la parte estructural del distrito minero de zacatecas, en color rojo se ubica La Mesa Virgen Calerilla (LMVC), en color azul las vetas La Cantera, Veta Mala Noche, Veta Grande y Veta Pánuco-Plomoso (tomado y modificado de Tristán-González et al., 2012)

CAPÍTULO 3

MARCO GEOLÓGICO LOCAL

3.1 Geología local

La Mesa Virgen-Calerillas (LMVC) se localiza justo al sur de la ciudad de Zacatecas (Figura 7), dentro de la porción central de la Sierra de Zacatecas (SZ); constituye la porción más elevada de la misma, pues en su porción NW alcanza 2,494 msnm y en el NE 2,703 msnm (Tristán- González et al., 2012). Una síntesis de los trabajos realizados de la región hasta 1999 es descrita en el trabajo de cartografía hecho por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) expuesto en la carta geológica F13-B64 llamada Hoja Guadalupe, Zacatecas. Esta síntesis y trabajos de cartografía e investigación reciente (p.ej. Escalona-Alcázar, 2010; Escalona Alcázar et al., 2016), permiten delinear el siguiente marco geológico de LMVC.

En esta estructura afloran, en su base, rocas de origen volcano-sedimentario de edad Jurásico-Cretácico plegadas que forman parte del basamento regional, junto con las formaciones del Triásico que afloran en el arroyo del Ahogado al oeste de la ciudad de zacatecas. Sobre este basamento, en discordancia, y de forma dispersa, afloran sedimentos continentales de característico color rojo por lo que se denominan Conglomerado Rojo de Zacatecas. A este conglomerado y de forma transicional lo cubre la secuencia de ignimbritas y lavas félsicas que coronan a LMVC. A ambos márgenes del bloque levantado otras lomas muestran esta misma disposición de unidades, pero no alcanzan el mismo relieve y, estructuralmente, solo comparten el estar segmentadas por fallas extensionales de orientación NW, sin que se no las grandes estructuras NE como las que levantaron el gran bloque de la Sierra de Zacatecas.

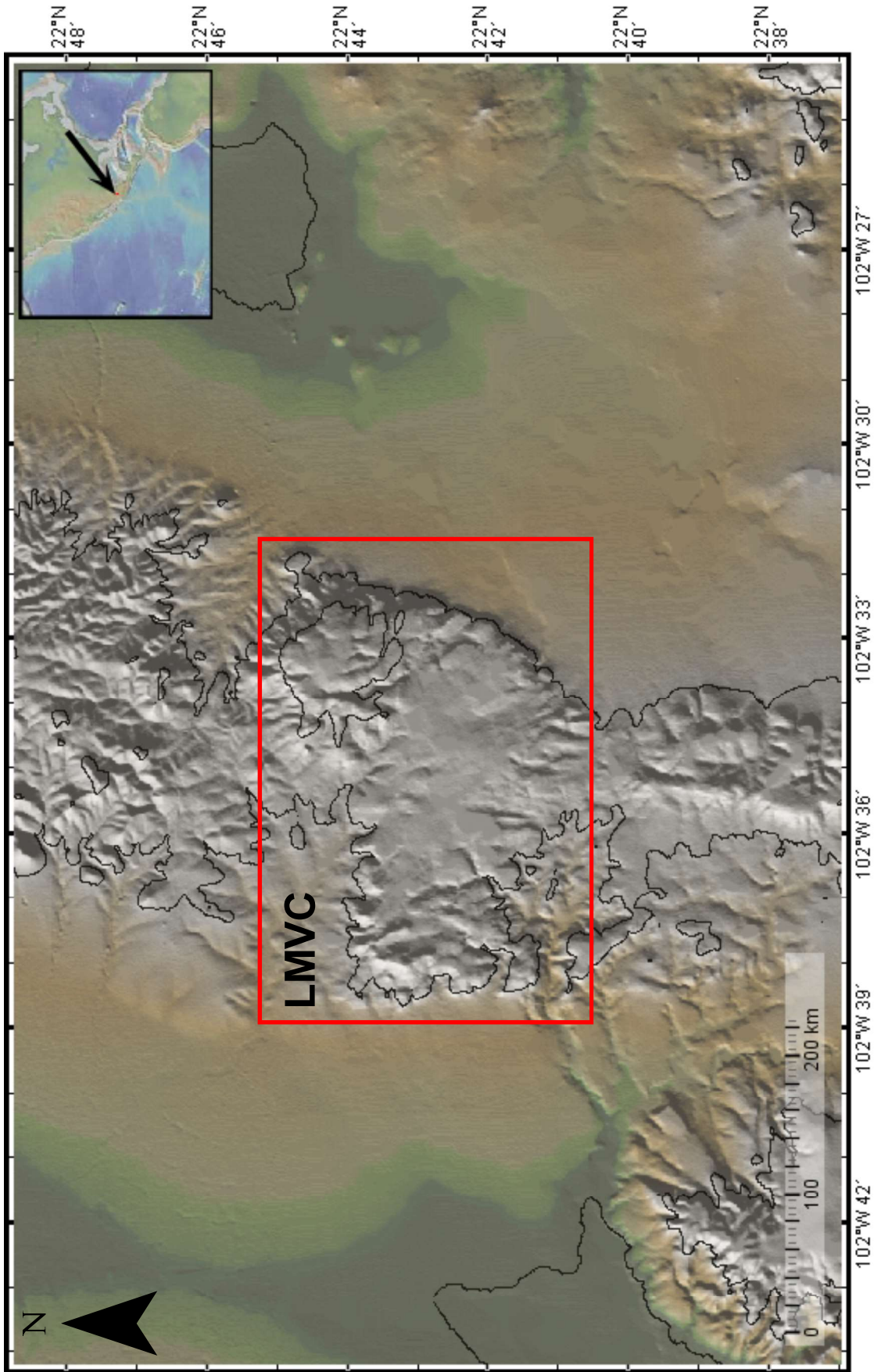


Figura 7. Modelo de Elevación del área de estudio LMVC. Hecho en GeoMapApp.

3.2 Estratigrafía local

3.2.1 Basamento

Se depositó sobre el talud continental y es considerado parte de la porción oriental del Terreno-Guerrero Centeno-García y Silva Romo (1997), es compuesto por la Formación Zacatecas y la secuencia Volcano-Sedimentaria Las Pilas. La interpretación de las secuencias ha sido descrita por varios autores como Burckardt (1906), McGhee (1976), Ponce y Clark (1988), Escalona-Alcázar Escalona-Alcázar et al. (2003), Escalona-Alcázar (2010) definiéndola en muchas ocasiones informalmente, es a partir del trabajo de Burckardt (1906) cuando se establece la edad Triásica por medio de estudios paleontológicos de la base de la secuencia Mesozoica de la Sierra de Zacatecas.

La Formación Zacatecas ha sido descrita y nombrada por McGhee (1976) subdividiéndola en 5 unidades a las que definió con letras A) rocas pelíticas, filita en gran parte con variaciones de esquisto y pizarra; B) capas de cuarcita gris, filita y meta-arenisca; C) metapedernal, filita gris-verde y esquisto negro; D) capas delgadas de meta-arenisca gris, filita; E) Filita/esquisto gris claro, esquisto blanco y gris, esquisto negro y capas de meta-arenisca; encontrándose en contacto con un intrusivo lacolítico llamándolo “Roca Verde” (Escalona-Alcázar, 2010). Pérez-Martínez (1961) describe a la “Roca Verde” como una andesita intrusiva alterada de edad terciaria, encontrándose dentro de las capas de rocas metamórficas.

Yta (1992) nombra a las rocas verdes que sobreyacen discordantemente a la secuencia metamórfica como Unidad Vulcano-Sedimentaria (UVS), compuesta principalmente por una secuencia de lavas andesíticas que cuentan con estructuras almohadilladas además de ser cortada por diques.

Ponce y Clark (1988) renombran a las unidades Mesozoicas son: Metasedimentos La Pimienta subdividiéndola en dos unidades informales, además de encontrarse cortada por la Microdiorita Zacatecas. Posteriormente Monod y Calvet (1992) describen al basamento en tres unidades de la base a la cima Formación La Pimienta, Metasedimentos La Pimienta o Metasedimentos Zacatecas. La formación la Pimienta está formada por esquistos, filitas y pizarras, además de

ser cubierto por la Microdiorita Zacatecas, Formación Chilitos o Diorita del cretácico superior formada por lavas andesíticas almohadilladas, (Escalona-Alcázar et al., 2003).

Las rocas del Complejo Volcanosedimentario Las Pilas (CVS Las Pilas) se caracterizan por la abundancia de secuencia de lavas de andesita basáltica que tienen intraestratificadas grauvacas, wackas y arenisca de grano fino con escaso pedernal y caliza (Escalona-Alcázar et al., 2016). A demás es cortada por cuerpos máficos e intrusionada por lacóliticos de la misma composición (Roca Verde), los flujos son divididos en estructuras masivas y almohadilladas (Escalona-Alcázar et al., 2009). Afloran discontinuamente por la Carretera Zacatecas-Fresnillo, a unos tres kilómetros de la ciudad Zacatecana correlacionándose con la Formación Chilitos que se identifica en algunas partes del Arroyo hacia Fresnillo (McGhee 1976; De Cserna 1976). A menos de un kilómetro de la ciudad se hace visible una secuencia de pizarra/ filita morada y metaconglomerado con cantidades de esquisto/ filita gris, meta-arenisca y metacaliza.

3.2.2 Conglomerado Rojo de Zacatecas

A los alrededores de las ciudades de Zacatecas y Guadalupe se encuentra en discordancia con la secuencia del Cretácico de la Sierra de Zacatecas, subyaciendo a los volcaniclásticos, los alamitos, riolita la Bufa e ignimbrita la Virgen, y nombrado por Ponce y Clark (1988) como Conglomerado Rojo de Zacatecas (CRZ) (Tristán-González et al., 2012). Esta secuencia sedimentaria clástica continental es reportada como del Paleoceno-Eoceno temprano por el método de palinología por Nájera-Garza (1997) y está constituida por clastos subangulares a subredondeados de Microdiorita, esquisto cuarcita y granitoides, ocupa una cuenca orientada E-W limitada al norte por la falla de la Veta La cantera y al sur por pequeñas fallas normales que buzcan al norte (Escalona-Alcázar et al., 2003; Escalona-Alcázar 2010). En su mayoría el CRZ se deriva de la Formación Zacatecas y del CVS Las Pilas, es una secuencia de conglomerado polimíctico y está soportado por matriz,

cuenta con estratos de limo y arcilla, además cuenta con un alto contenido de hierro que le da un color característico rojo a morado (Tristán-González et al., 2008, 2012).

En general, el CRZ va de moderadamente consolidado a bien consolidado, sus clastos varían de subangulares a subredondeados, con tamaños entre 2 mm y 5 cm, (Escalona-Alcázar, 2010). Los primeros metros del CRZ está formado por guijarros con diámetro de entre 2 y 10 cm en abundancia decreciente, además muestra brechas volcánicas, calcedonia, caliza y arenisca, (Tristán-González et al., 2012). En la Figura 8 se puede observar en fotografía el acomodo de la secuencia del CRZ.

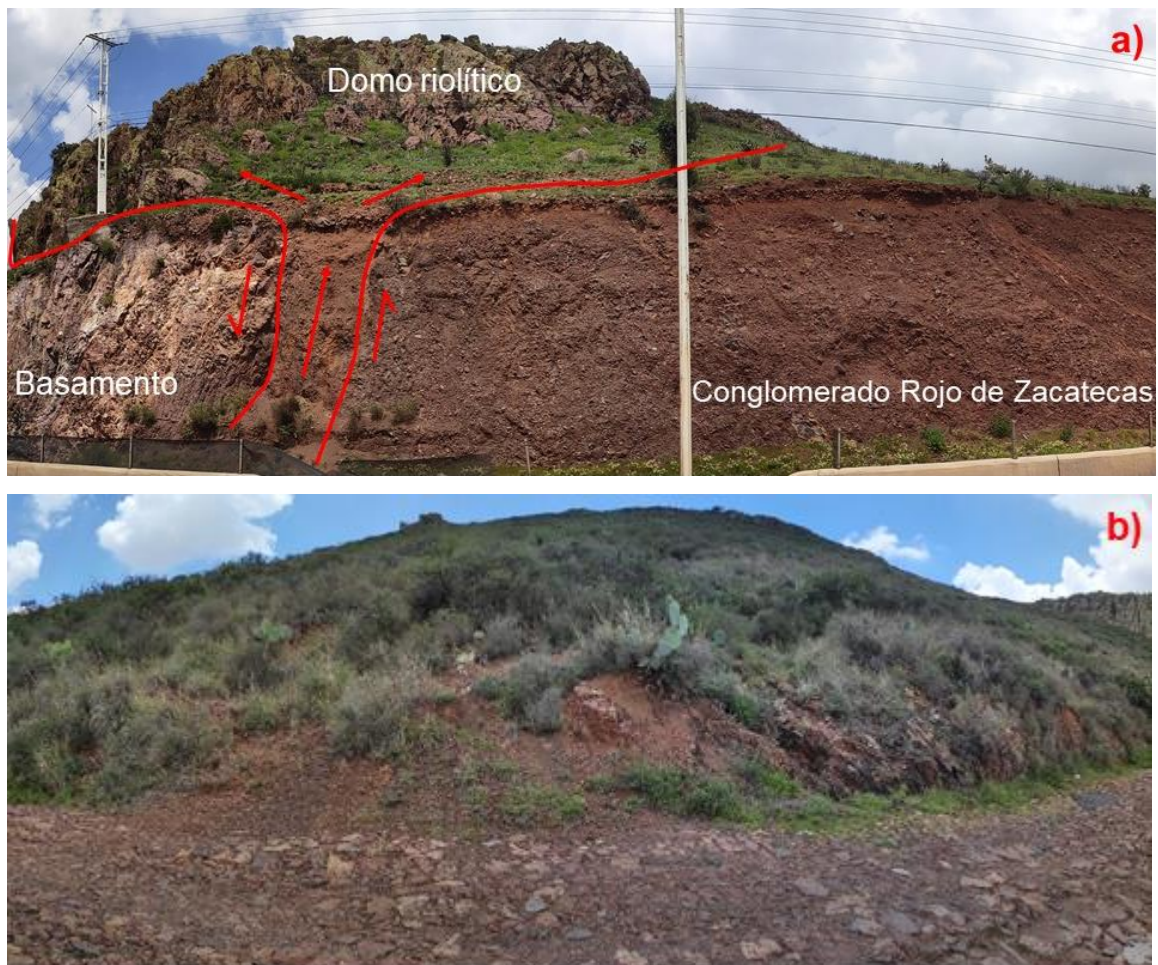


Figura 8. a) Conglomerado Rojo de Zacatecas (CRZ), se muestra con color de intemperismo rojizo además de estar intrusionado por un domo riolítico. Se observa en las inmediaciones de la zona de estudio a un costado de la carretera, b) CRZ visible en la zona norte del área de estudio, en contacto con el depósito de las rocas riolíticas.

3.2.3 Ignimbrita la Virgen

Es parte de los principales afloramientos volcánicos del Terciario, se encuentra en las inmediaciones de Guadalupe y Zacatecas y sobre la riolita la Bufa, el CRZ y la ignimbrita la Virgen, fue nombrado y descrito como un conjunto de secuencias de riolitas por Pérez-Martínez et al., (1961). Posteriormente es denominada como Formación la Virgen por Ponce y Clark (1988) describiéndola como un conjunto de ignimbritas y tobas riolíticas. Estos autores obtuvieron una edad de 36.8 Ma (método K-Ar en sanidino), la cual la ubica en el Oligoceno inferior.

Aunque ha sido pobremente descrita, los detalles de esta secuencia varían drásticamente de un autor a otro, lo que da como resultado la misma descripción de la unidad con diferentes nombres. El trabajo de Tristán-González et al. (2012) divide a las secuencias en dos, describiendo a la inferior como depósitos de oleadas piroclásticas con presencia de algunos líticos pequeños; esta evoluciona como un flujo de ceniza y pómez sin compactar a brecha lítica. Y en comparación la parte superior evoluciona desde un flujo de ceniza parcialmente soldado a secuencias con un alto grado de soldamiento y presenta evidencias de reomorfismo. Una de estas muestras fue datada por el método K-Ar en roca entera, obteniendo la edad de 37.1 Ma, presenta estructura fluidal y matriz desvitrificada. La secuencia es de color grisáceo en fractura fresca, que varía de un color fresco rosa pardo por intemperismo, el cual se puede observar en la Figura 9a y 9b.



Figura 9. a) Unidad de la ignimbrita la Virgen intemperizada. b) Recolección de muestra de la ignimbrita la Virgen.

A principios del Terciario y hasta el Terciario medio (Eoceno-Oligoceno) en la región donde se ubica el área de estudio ocurrieron una serie de eventos volcánicos que dieron origen a las unidades de LMVC, y se definieron también los principales rasgos tectónicos que la delimitan. Se han reportado dos edades isotópicas para la denominada ignimbrita La Virgen, una de 36.8 Ma (K-Ar en sanidino) por Ponce y Clark (1988) y otra de 37.1 ± 0.9 Ma (K-Ar en roca entera) por Tristán-González et al. (2012).

Antes de este trabajo de tesis lo que se conoce es que en El Cerro La Virgen (CLV) se exhibe una secuencia volcánica, formada por intercalaciones de tobas, derrames riolíticos, domos, brechas y depósitos epiclásticos (Figura 10a y 10b) cuyo origen ha sido asociado a una caldera (Ponce y Clark, 1988; Escalona-Alcázar et al., 2003). Informalmente las unidades volcánicas del CLV que sobreyace al Conglomerado Rojo de Zacatecas y a la Riolita la Bufa, son descritas y nombradas como tobas de pómez y líticos, tobas cristalinas, tobas líticas, derrames riolíticos, tobas de lapilli, tobas brechadas y domos por Escalona-Alcázar et al. (2003).

Estos últimos corresponden a una composición félsica, de textura porfídica, cuyo color va de rosa a negro verdoso (en donde se conserva una condición de vidrio u obsidiana de color negro debido a los cambios texturales y grados de alteración conforme se aleja de la fuente (Escalona-Alcázar et al., 2003). La mineralogía corresponde a fenocristales de plagioclasa y escasos de cuarzo y biotita envueltos en una matriz que varía de vítrea a afanítica. A continuación, se describe las dos unidades volcánicas estudiadas en las secuencias de la parte noreste y suroeste de LMVC.

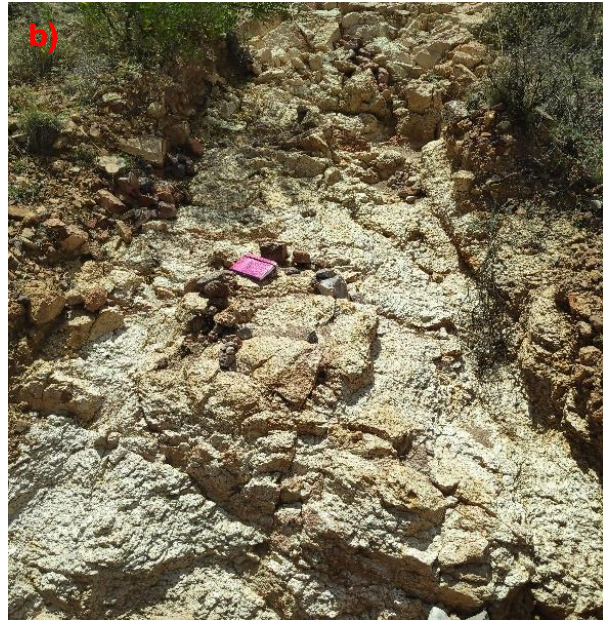


Figura 10. Características de los tipos de roca en las zonas: a) Ignimbrita masiva con presencia de líticos de la zona NE. b) Depósito piroclástico de la zona SO.

Era	Período	Época	Columna
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Qhoal
		Pleistoceno	
		Plioceno	
		Mioceno	
Mesozoico	Paleógeno	Oligoceno	To R
		Eoceno	IgV
		Paleoceno	CRZ CgpAr
	Cretácico	Superior	
		Inferior	KIVs
		Superior	JsVs
		Inferior	
	Triásico	Superior	TR s F-Ar
		Inferior	

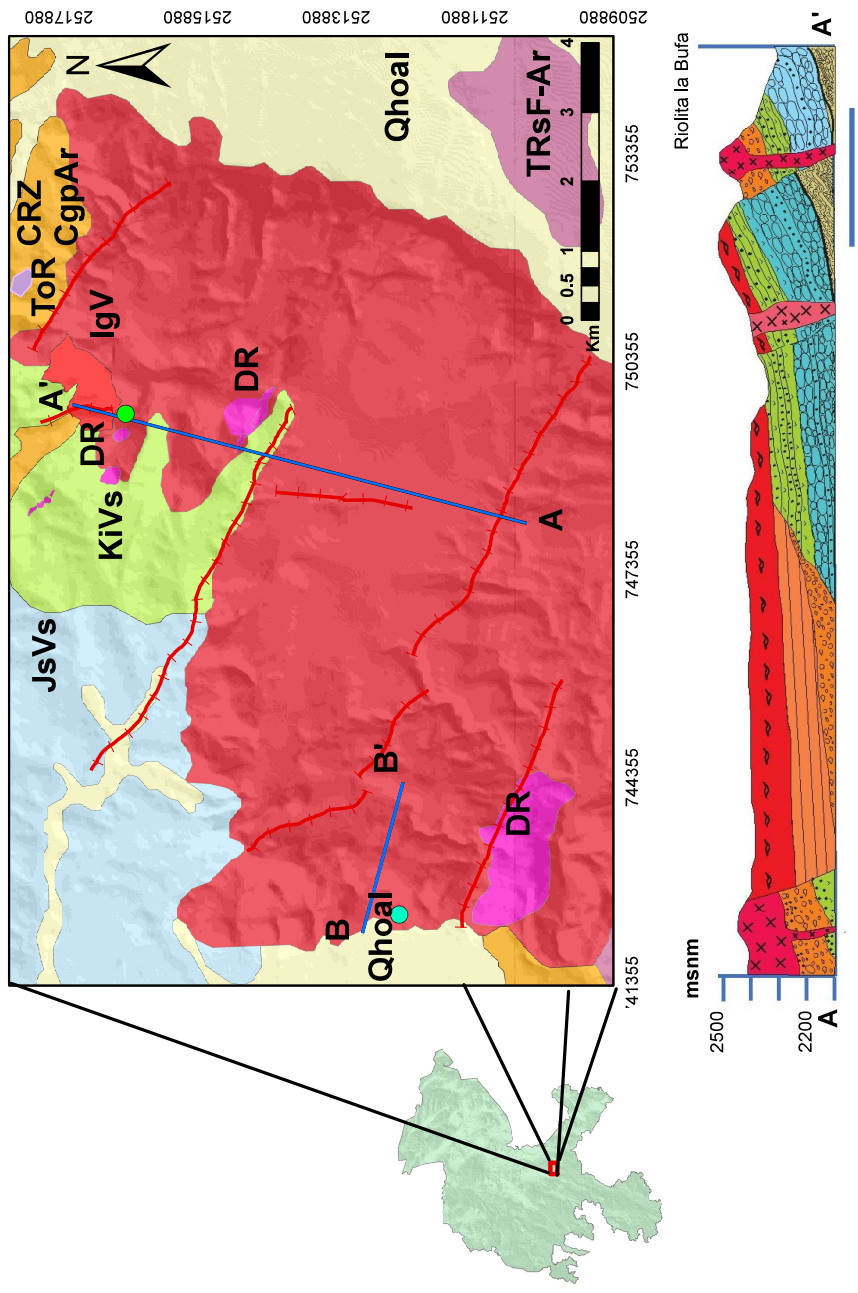


Figura 11. Mapa geológico de LMVC, A-A' y B-B' correspondientes a la zona NE y SO, respectivamente. Los puntos de muestreo (verde) NE y (azul) SO también indican la ubicación de las columnas estratigráficas mostradas más adelante.

3.3 Estratigrafía de LMVC

3.3.1 Zona Noreste (NE)

En general, la columna estratigráfica de las rocas volcánicas de la zona NE (Figura 12) de LMVC está caracterizada en su base por secuencias de lavas de composición riolítica, las cuales sobreyacen al basamento compuesto de metasedimentos (Formación Las Pilas) y/o al Conglomerado Rojo de Zacatecas (conglomerado polimíctico) (Figura 8). Las lavas riolíticas presentan una textura fanerítica, con cristales pequeños de sanidino, plagioclasa y cuarzo; se observan pequeñas vesículas. Contiene también líticos aislados que van de 0.2 mm a 2 cm de diámetro.

Conforme se asciende en la columna se hace presente un grupo de ignimbritas de aspecto masivo, que corresponden a la Ignimbrita la Virgen, estudiada por Pérez-Martínez et al. (1961) y posteriormente datadas por Ponce y Clark (1988), quienes determinaron edades (K-Ar) del Eoceno-Oligoceno para la secuencia, y a la cual, posteriormente Escalona-Alcázar et al. (2003, 2009) aportaron otras observaciones de sus características físicas.

En contacto discordante se aprecian algunos diques riolíticos encajonados por el CRZ (Figura 8) cortando también a los flujos de lava, Los derrames de lava y la composición de los diques son ampliamente similares (Escalona-Alcázar et al., 2009; Escalona-Alcázar, 2010).

Coronando la columna se encuentra una serie de flujos de lavas riolíticas de edad Oligoceno con claras líneas de flujo, gran cantidad de vesículas y algunas vetillas de sílice, las cuales están cristalizadas. Estas unidades presentan una dirección NE-SO con alto grado de intemperismo. La mineralogía principal consta de sanidinos (Sn), plagioclasas (Pl), cuarzo (Qz) y ferromagnesianos.

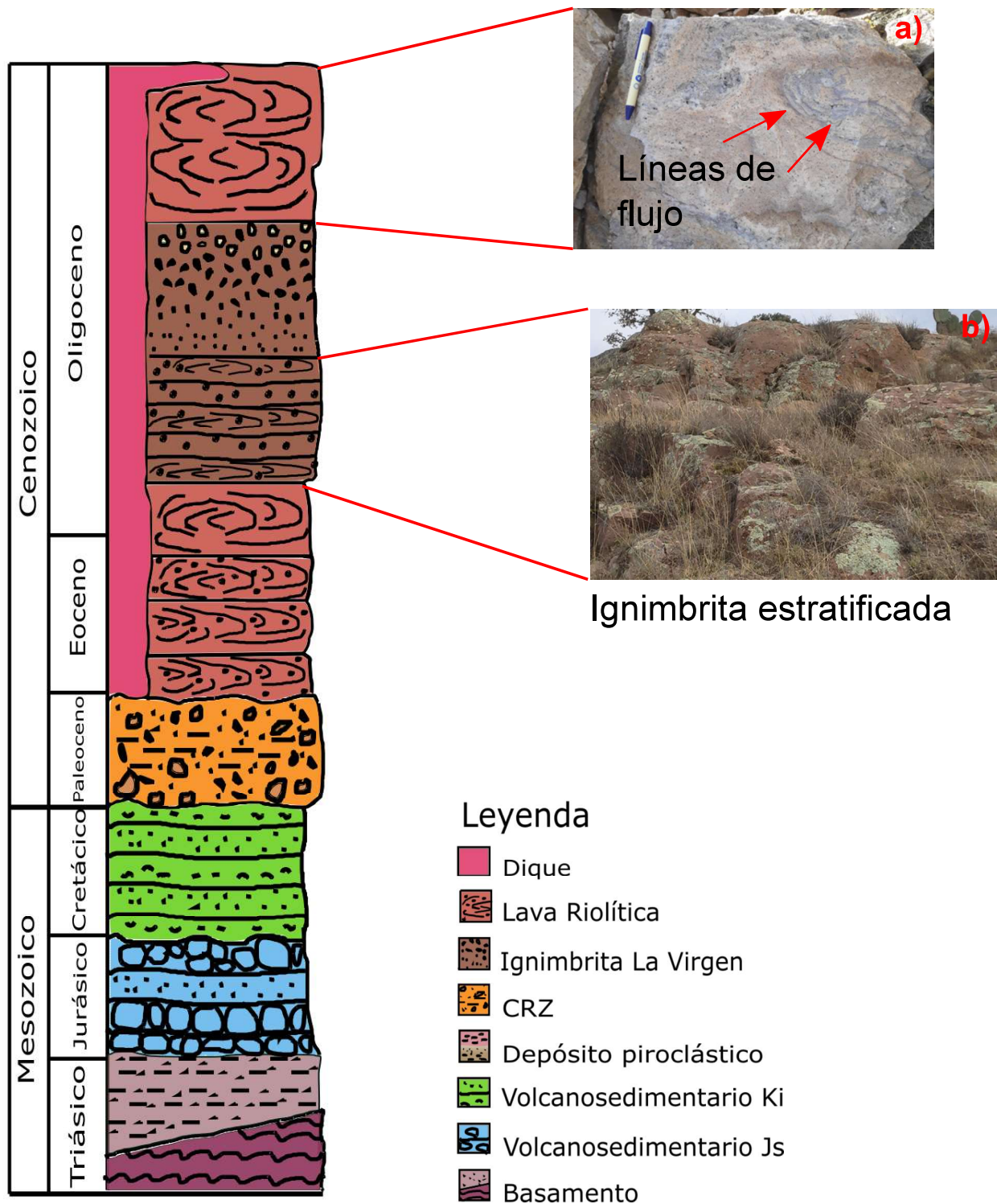


Figura 12. Columna estratigráfica correspondiente a la zona NE de LMVC (Figura 10, representada con marca verde en el mapa geológico), la ignimbrita la Virgen es comprendida en esta porción, presentando un grupo de ignimbritas estratigráficas (imagen b) y masivas, cuenta con líticos y clastos de pómez de variados tamaños. La parte superior de la zona es una lava riolítica con claras líneas de flujo (imagen a).

3.3.2 Domos

Las estructuras de diques y domos félsicos referidas en otras partes del Distrito Minero de Zacatecas, también están presentes en LMVC, en especial se encuentran distribuidos en el Cerro la Virgen. Su ubicación está estrechamente relacionado a las fallas normales y fracturas generadas por dos eventos extensionales (el primero transtensional), las cuales funcionaran como conductos alimentadores de magma del que están compuestas las riolitas de LMVC, dando origen a la riolita La Bufa. Las fallas del segundo evento con indicadores cinemáticos (estrías, surcos, grietas) indican un fallamiento de normal a oblicuo.

La zona de LMVC presenta una serie de domos (Figura 11) con dirección NW-SE (Figura 13 a-c). Sus lavas son de color de rosa a negro verdoso posiblemente por efectos de diferente grado de alteración (oxidación, hidratación) por intemperismo. Presentan textura porfídica (unidades rosas) o hialofídica (unidad negro verdoso), perlítica y ocasionalmente esferulítica, (Escalona-Alcázar et al., 2003).



Figura 13. a) Domo riolítico encajonando al conglomerado rojo de Zacatecas intemperizado. B) Mismo domo riolítico desde el norte de LMVC se observa la continuación de la estructura y la relación con la falla a su paso, c) Domo riolítico perteneciente a la zona NE.

3.3.3 Zona Suroeste (SO)

Por las características que presenta esta sección, se relaciona con la secuencia inferior que reporta Tristán-González et al., (2012). Este trabajo la define como la zona SO (Figura 11, representada con marca azul en el mapa geológico de la porción SO). En comparación con la zona NE predominan intercalaciones de ignimbritas y depósitos piroclásticos con flujos de ceniza; en estos últimos se identifican variaciones en el tipo de pómez (sin compactar y “fiames”), además de contar con gran contenido de líticos.

La columna estratigráfica de la zona suroeste (Figura 14) tiene en su base espesores gruesos de ignimbrita de color rojizo, petrográficamente muy alterada, y además presenta algunas vesículas rellenas de cristales. Conforme se asciende en la columna se observa un depósito piroclástico de flujos de pómez y ceniza, en general las unidades pasan de color blanco a rosa claro con gran cantidad de pómez subredondeada a redondeada. Se puede subdividir en dos espesores, el primero formado de ceniza blanca y presentando algunas fiames que van de 0.5 mm a 4.5 cm y líticos negros de 0.3 mm a 1 cm (Figura 11). La segunda de color rosa, se encuentra rica en pómez sin colapsar de hasta 10cm, y comprende en su unidad una brecha. Coronando la columna se observa una unidad de lava riolítica de color rojizo con una mineralogía de sanidinos, cuarzo y plagioclasa.

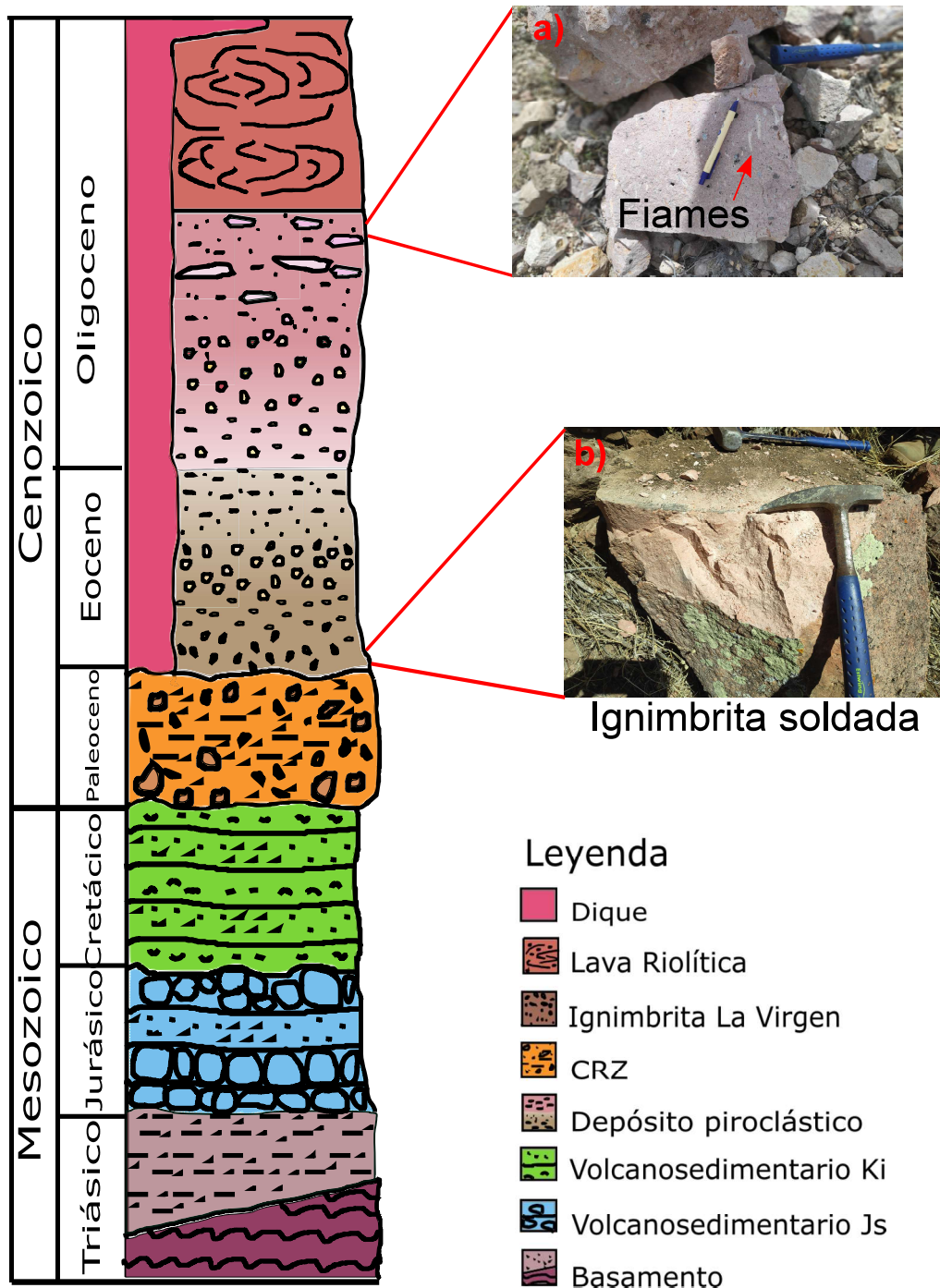


Figura 14. Columna estratigráfica correspondiente a la Zona SO de LMVC (Figura 10, representada con marca verde en el mapa geológico), presenta potentes depósitos piroclásticos de edad Oligoceno con variados tamaños de líticos negros y pómez además de ignimbritas bien soldadas (imagen b), la parte superior presenta secuencias con fiames (imagen a).

3.3.4 Estructura

El bloque levantado de la Sierra de Zacatecas es seccionado por fallas extensionales de orientación NW-SE, y está delimitado por fallas de la misma naturaleza, pero de orientación NE. El primer sistema comúnmente ha sido asignado al sistema de fallas de la provincia extensional de "*Basin and Ranges*", la cual constituye el ejemplo clásico de "rift ancho" (Kearey et al., 2009) abarcando desde la parte norte de Norteamérica, hasta la Faja Volcánica Transmexicana, aunque algunos autores la extienden más al sur (Henry y Aranda, 1992). En México, es común asociar el sistema de fallas extensionales de orientación NW-SE, como perteneciente a la provincia de "*Basin and Range*". El sistema de fallas extensionales de orientación NE-SO en la parte sur de la Mesa Central es interpretado por Nieto-Samaniego et al. (1999) como formada al mismo tiempo que el fallamiento NW-SE, en un evento de deformación tridimensional. Sin embargo, otra posible interpretación ha sido planteada por Torres-Hernández (2009) asumiendo que se formaron en eventos diferentes, siendo primero el que formó estructuras NW-SE, y fueron cortadas en una segunda etapa de fallamiento que formó las fallas de orientación NE-SO. En su trabajo sobre la Mesa Central, Nieto Samaniego et al. (2005) discutiendo sobre los sistemas de fallas en la Sierra de Zacatecas, consideran también edades diferentes para la formación de esos sistemas de fallas de orientación conjugada. En ese trabajo consideran al sistema de fallas NW-SE como parte del Sistema de Fallas SLT, lo cual es apoyado por Tristán-González et al. (2012) (Figura 3) que además proponen que las fallas y fracturas se generaron por esfuerzos transtensivos, y estas estructuras formaron los conductos para el ascenso del magma que originó a los diques y domos félsicos de la Riolita Bufo, y que después se dio una reactivación de las fallas normales en el que se da una segunda etapa de mineralización en la zona de la ignimbrita la Virgen (Figura 9). Sin embargo, en esos trabajos no se aporta nuevos argumentos sobre la posible relación de la secuencia volcánica de LMVC con la evolución de un centro volcánico, que Ponce y Clark (1988) proponen como una posible caldera de edad Eoceno-Oligoceno.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

4.1 Muestreo

La primera etapa dentro del presente estudio fue la recolección de información y muestreo representativo de la zona de estudio. Para este caso de estudio se recolectaron 21 muestras las cuales presentan moderada alteración y consisten en secuencias de lavas, ignimbritas masivas en donde algunas muestran presencia de pómez y depósitos piroclásticos. Estas muestras de roca se utilizaron para la realización de análisis petrográfico, mineralógico y geoquímico.

Para una mejor descripción estratigráfica las muestras fueron separadas en NE (muestras ZAC-01 a ZAC-10) y SO (muestras ZAC-11 a ZAC-21). En la Figura 15 se muestra el área de estudio y la distribución de los puntos de muestreo. En cada punto de muestreo se tomaron las coordenadas geográficas (en formato UTM disponibles en la tabla 1), la descripción de muestra de mano, fotografía interpretativa del afloramiento y/o unidad y descripción general de este.

La concentración de la información siguiendo a la metodología se divide en dos direcciones; análisis petrográfico y análisis geoquímico presentando dos columnas estratigráficas de las zonas NE y SO, además de dos perfiles geológicos (Figura 11) A-A' y B-B'.

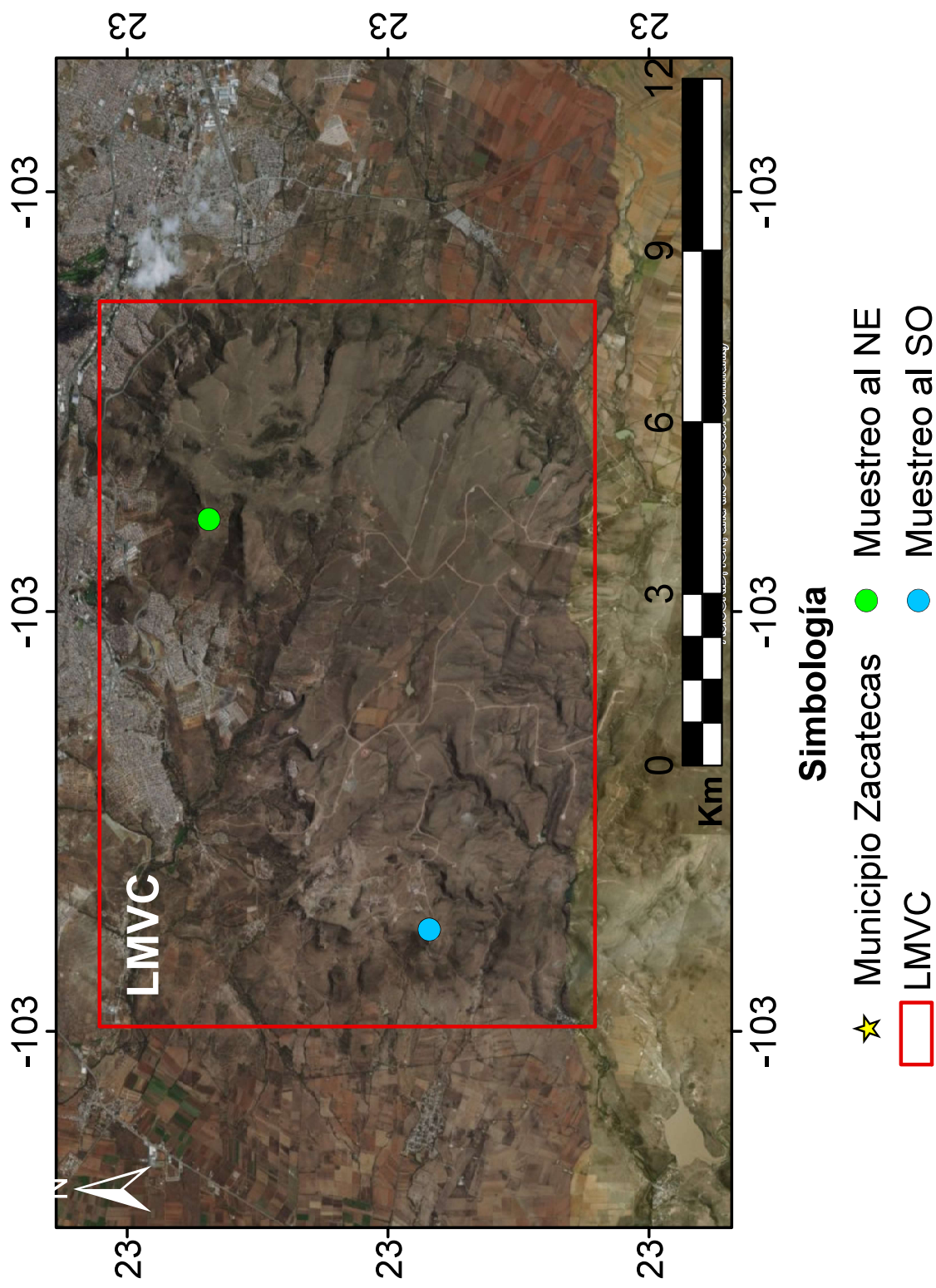


Figura15. Imagen satelital del área de estudio donde se muestra los puntos de muestreo. Al norte de la imagen en la parte central, se encuentra la ciudad de Zacatecas. (Imagen satelital fuente Esri Digital Globe GeoEye Earthstar Geographics CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and THE GIS User Community).

4.2 Análisis petrográfico

El análisis petrográfico pretende obtener una descripción de la matriz y la mineralogía correspondiente de las rocas volcánicas de las muestras recolectadas. Esto se logra al observar bajo el microscopio petrográfico de una sección o lámina delgada. Se seleccionaron 10 muestras representativas de las unidades litológicas que se encuentran en LMVC. La preparación de muestras para el análisis petrográfico se llevó a cabo en el Laboratorio de Petrografía de la División de Geociencias Aplicadas, IPICYT.

A continuación, se describe el procedimiento para la elaboración de las secciones delgadas:

a) Primer corte de la muestra:

Se escogió la parte más fresca de la muestra para que fuera cortada con una sierra de disco diamantado para obtener cubos

b) Pulido de la muestra:

Se eligió una de las caras mejor cortadas del cubo, para ser pulidas con polvos abrasivo de SiC (Carburo de Silicio) de granulometría #400, #600 y #800, sucesivamente sobre placas de vidrio del mismo número.

c) Pegado de la roca:

La superficie debe estar perfectamente pulida ya que será pegada sobre un cubreobjetos y si presenta irregularidades en la superficie puede entrar aire y desprender al cubreobjeto. Es pegado con una resina cementante que se obtiene de la mezcla de los dos componentes de la resina tipo epoxirresinas. El cubo debe reposar con la resina por al menos 48 horas.

d) Desbaste de la sección:

Se procede con el desbastamiento de la muestra en un disco de diamante que ayude a obtener un grosor de máximo 3mm.

e) Pulido final:

La sección ya desbastada pasa por un pulido final (se repite en el inciso c), donde se busca principalmente que el cubreobjeto se quede con una parte de la roca y el espesor sea de entre 25-30 μm . El pulido se completa hasta que los colores de interferencia de los minerales base cambien al correcto.

4.3 Análisis geoquímico

La preparación de muestras para análisis geoquímicos se llevó a cabo en el laboratorio de petrografía de la División de Geociencias Aplicadas, IPICYT siguiendo un proceso de triturado y molienda clásica el cual se describirá en las siguientes secciones.

La composición de elementos mayores se determinó a partir de Fluorescencia de rayos X (FRX) en el laboratorio LINAN (Laboratorio Nacional de Investigaciones en Nanociencias y Nanotecnología), IPICYT. Siguiendo los procedimientos y condiciones propuestas por (Verma et al., 2018).

Los elementos trazas y tierras raras fueron determinados en el Laboratorio ALS Chemex (Vancouver, Canadá) usando el método ME.MS81. Para más detalle de este método se puede consultar en: www.alsglobal.com/geochemistry.

La composición mineralógica se determinó a partir de Difracción de rayos (DRX) en el laboratorio LINAN (Laboratorio Nacional de Investigaciones en Nanociencias y Nanotecnología), IPICYT. Siguiendo los procedimientos y condiciones propuestas por (Verma et al., 2019).

Trituración y molienda

Para llevar a cabo la trituración en primera instancia se selecciona la porción más fresca de cada muestra ya que es preciso que se encuentre libre de alteración. La trituración fue llevada a cabo en un triturador Baldor Reliancer (Figura 16) para reducir a fragmentos de tamaño gravilla de 0.5 mm a 1 cm y obtener de este cerca de 200-300g de muestra.

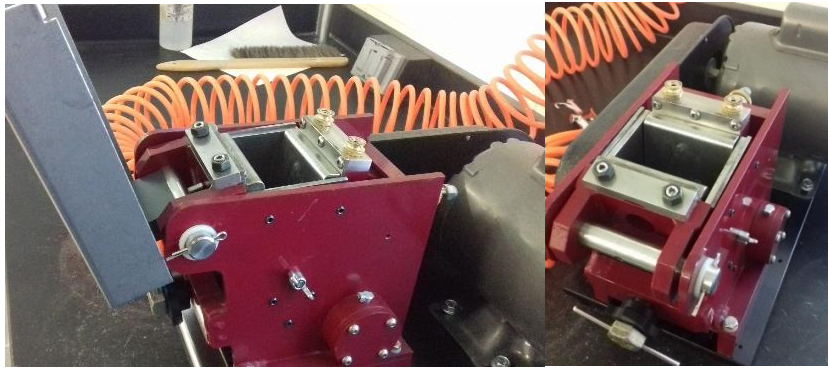


Figura 16. Triturador del laboratorio de petrografía de la División de Geociencias Aplicadas, IPICYT.

La molienda de las muestras se preparó en un molino planetario Pulverisette 6 de ágata de marca Fritsch (Figura 17), el cual permite la molienda fina de sustancias. Para este caso las muestras fueron sometidas a 250 revoluciones por 30 minutos, quedando de un tamaño de arcilla (<math><1 \mu\text{m}</math>).

El equipo en conjunto está diseñado para que los impactos de alta energía y por fricción entre las esferas de la molienda resulte continua. El molino imprime un movimiento rotatorio al recipiente haciendo que las esferas actúen mecánicamente sobre la sustancia reduciéndola a un fino polvo de 75-38 μm (malla 200-400). El conjunto comprende el recipiente de ágata, tres esferas del mismo material, el aro de plástico de protección y el candado que se coloca para asegurar al recipiente dentro de la máquina.



Figura 17. Molino planetario Pulverisette 6 de ágata marca Fritsch.

4.3.1 Pérdida de ignición (LOI)

La pérdida de ignición o *loss on ignition* (LOI), es la representación de la masa de humedad y el material volátil que la muestra tiene entre sus poros y por lo tanto va perdiendo peso, el total de volátiles en una roca son determinados bajo este proceso, (Santisteban et al., 2004).

En la implementación de esta metodología se considera el LOI a partir de que se llega la temperatura de 950°C y se transcurrieron dos horas de su secado. Los gramos recomendados son de 3.5 gr por muestra. Es importante mencionar que para todas las mediciones tomadas con la balanza Sartorius se tiene un error de ± 0.0001 gramos.

Procedimiento

El proceso de LOI es el calentamiento secuencial de las muestras, realizada en las muestras recolectadas para la zona de estudio. Esta se realiza de la siguiente manera:

1. Para la pérdida de agua en las muestras se elaboró mediante el calentamiento específico a 105°C en un horno por 24hrs, y dejar enfriar.

$$H_2O^{\text{lost}} = 100 (WS - DW^{105^\circ}) / WS,$$

donde WS es el peso de la muestra secada al aire y DW^{105° es el peso seco de la muestra calentada a 105°C.

2. El control de la información obtenida paso a paso debe estar controlada bajo estricto orden tomando en cuenta el tiempo y peso, como también: código de muestra, peso de crisol de porcelana, peso de crisol más muestra y peso después de 105°C.
3. Obtenido el peso total después de lo realizado en el punto 1, se toma cerca de 1gm de muestra que se coloca en crisoles de porcelana para llevarse a la mufla en una temperatura de 950° por un lapso de dos horas.

$$LOI^{950^\circ} = 100 (DW^{105^\circ} - DW^{950^\circ}) / WS,$$

donde LOI^{950° es el porcentaje de pérdida por ignición en 950°C y DW^{950° es el peso de la muestra después de calentar a 950°C.

4. Transferir las muestras al desecador con tenazas de metal y guantes de protección, permitiendo su enfriamiento a temperatura medio ambiente.
5. El peso total de la muestra vuelve a ser tomado, aquí se observa la comparación de los volátiles perdidos entre la primera medición y está última, permite determinar el peso de la muestra seca después de la ignición. La muestra restante es el residuo.

El calentamiento de la muestra producirá la desaparición de los carbonatos con una emisión de CO_2 y/o los materiales volátiles que exista en la muestra. Con los resultados obtenidos de LOI se puede estimar si los resultados son confiables o si la roca presenta algún grado de alteración, estimándose que las rocas volcánicas pueden llegar a presentar alteración si estas muestran un valor de LOI mayor a 3%.

Pastillas (Pellets)

Este procedimiento requiere una exactitud en pesos totales de las rocas y acondicionar las muestras para su análisis en un entorno libre de contaminación. En un inicio se procede a obtener el peso de 6.5 gr en donde se separa 3 gr de polvo de muestra y 3.5 gr de la cera (N,N'-Ethylene bis (stearamide)) que funciona como aglutinante. Como segundo paso, los polvos de las pastillas deben estar finamente mezclados en donde se debe evitar la contaminación y desaparecer los grumos hasta alcanzar completamente la homogeneidad, por lo tanto, entre más fina sea su granulometría mayor será la homogeneidad (Figura 18). El tercer y último paso es el de pasar esta mezcla por una prensa hidráulica en donde se ejerce una presión de 177kN (18 toneladas) por 60 segundos.



Figura 18. A la izquierda tamaño ideal de las pastillas. A la derecha se muestra las pastillas dentro de los contenedores para su análisis bajo fluorescencia.

4.4 Incertidumbres y limitaciones

Incertidumbres

Fluorescencia de Rayos X (FRX)

En este apartado se exponen las posibles restricciones de los análisis geoquímicos realizados para las muestras de La Mesa Virgen-Calerilla (LMVC). La forma y ajustes de calibración para la FRX se reportan por Verma et al. (2018, 2019). Las incertidumbres obtenidas durante la medición fueron procesadas en el programa MECUX el cual se encuentra en <http://tlaloc.ier.unam.mx>. En el trabajo Verma et al. (2018) se explica la forma de calibración basada a partir de un modelo de regresión lineal ponderado (WLR). Se tiene un 99% de confianza en que el valor verdadero estará dentro del intervalo de incertidumbre en la Tabla A1. Las unidades por las cuales se representa la concentración obtenida al procesar las incertidumbres en el programa MECUX se expresa en % m/m, es decir, porcentaje masa/masa. En la Tabla 1 se expresa el porcentaje de incertidumbre para cada elemento mayor dentro del nivel de confianza en las muestras de LMVC.

Tabla 1. Incertidumbre en la medición para cada elemento mayor en términos de %.
Elaboradas en el programa Igrocs <http://tlaloc.ier.unam.mx/igrocs>.

Muestra		SIO2	TIO2	AL2O3	FE2O3T	MNO	MGO	CAO	NA2O	K2O	P2O5	LOI
Zac-01	Media	66	0.06	19.18	0.67	0.02	0.03	0.08	0.7	12.29	0.02	0.244
	Incertidumbre	1.9	0.01	0.35	0.23	0.003	0.39	0.07	0.07	0.08	0.006	
Zac-02	Media	70	0.048	16.36	0.69	0.01	0.02	0.03	0.40	11.32	0.02	0.307
	Incertidumbre	2.0	0.012	0.34	0.23	0.003	0.4	0.07	0.06	0.08	0.006	
Zac-03	Media	75	0.11	13.28	1.34	0.02	0.06	0.07	0.05	8.52	0.10	0.376
	Incertidumbre	2.0	0.01	0.31	0.23	0.003	0.4	0.07	0.06	0.06	0.006	
Zac-04	Media	64	0.05	21.1	0.58	0.04	0.04	0.14	0.73	11.9	0.03	0.709
	Incertidumbre	1.9	0.01	0.36	0.23	0.003	0.4	0.07	0.07	0.08	0.006	
Zac-05	Media	72	0.26	14.25	2.08	0.03	0.12	0.05	0.05	9.21	0.05	0.820
	Incertidumbre	2.0	0.01	0.33	0.23	0.003	0.40	0.07	0.06	0.07	0.006	
Zac-06	Media	75	0.10	14.16	0.83	0.02	0.02	0.04	0.04	8.91	0.03	0.484
	Incertidumbre	1.9	0.01	0.31	0.23	0.003	0.4	0.07	0.06	0.06	0.006	
Zac-07	Media	76	0.13	11.90	1.39	0.02	0.23	0.03	0.06	8.85	0.01	0.525
	Incertidumbre	2.2	0.01	0.32	0.23	0.003	0.4	0.07	0.06	0.07	0.006	
Zac-08	Media	70	0.33	14.96	2.32	0.05	0.25	0.08	0.7	10.56	0.05	1.032
	Incertidumbre	2.0	0.01	0.33	0.23	0.003	0.4	0.07	0.06	0.08	0.006	
Zac-09	Media	71	0.08	16.30	0.86	0.02	0.02	0.12	1.05	9.4	0.02	0.789
	Incertidumbre	2.1	0.01	0.34	0.23	0.003	0.4	0.07	0.07	0.07	0.006	
Zac-10	Media	70	0.05	16.3	0.8	0.01	0.025	0.06	0.55	11.6	0.02	0.389
	Incertidumbre	2	0.01	0.33	0.23	0.003	0.4	0.07	0.07	0.081	0.006	
Zac-11	Media	66	0.38	19.62	3.63	0.02	0.34	0.2	0.05	4.32	0.05	4.589
	Incertidumbre	2.1	0.01	0.4	0.23	0.003	0.4	0.07	0.06	0.05	0.006	
Zac-12	Media	66	0.47	19.59	3.03	0.02	0.22	0.27	0.06	4.52	0.08	4.605
	Incertidumbre	2.0	0.01	0.38	0.23	0.003	0.4	0.07	0.06	0.049	0.006	
Zac-13	Media	69	0.07	16	1.08	0.01	0.01	0.13	0.14	11.51	0.05	1.032
	Incertidumbre	2.0	0.01	0.34	0.23	0.003	0.4	0.07	0.06	0.09	0.006	
Zac-14	Media	68	0.06	17.85	0.27	0.008	0.01	0.09	0.30	11.55	0.04	0.770
	Incertidumbre	2.0	0.01	0.34	0.23	0.003	0.4	0.07	0.06	0.08	0.006	
Zac-15	Media	71	0.1	16	2.86	0.01	0.13	0.05	0.4	6.82	0.01	2.218
	Incertidumbre	2.4	0.01	0.4	0.23	0.003	0.4	0.07	0.07	0.07	0.006	
Zac-16	Media	69	0.12	17.83	0.39	0.006	0.01	0.08	0.81	10.41	0.02	0.635
	Incertidumbre	2.0	0.01	0.35	0.23	0.003	0.4	0.07	0.07	0.08	0.006	

Zac-17	Media	66	0.19	24	3.71	0.006	0.01	0.07	0.02	0.07	0.06	4.185
	Incertidumbre	2.0	0.01	0.4	0.23	0.003	0.4	0.07	0.06	0.03	0.006	
Zac-18	Media	71	0.09	15.2	1.55	0.03	0.68	0.31	1.80	6.8	0.01	2.250
	Incertidumbre	2.3	0.01	0.4	0.23	0.003	0.4	0.07	0.07	0.07	0.006	
Zac-19	Media	71	0.1	15.7	1.35	0.03	0.4	0.18	1.06	8.1	0.01	1.824
	Incertidumbre	2.3	0.01	0.4	0.23	0.003	0.4	0.07	0.07	0.07	0.006	
Zac-20	Media	69	0.06	17	0.7	0.03	0.04	0.28	0.91	10.4	0.03	0.728
	Incertidumbre	2	0.01	0.34	0.23	0.003	0.4	0.07	0.07	0.07	0.006	
Zac-21	Media	67	0.07	18.09	1.01	0.03	0.3	0.16	1	8.50	0.01	2.453
	Incertidumbre	2.0	0.01	0.4	0.23	0.003	0.4	0.07	0.07	0.07	0.006	

Elementos traza y Tierras Raras

Las concentraciones de elementos traza se determinaron en ALS Laboratorios Chemex en Vancouver, Canadá, bajo el método ME-MS81 (para mayor información visite <https://www.alsglobal.com/geochemistry>) los datos de las 21 muestras de LMVC se obtuvieron por Espectrometría Masa Plasmática Acoplada Inductivamente (ICP-MS). Se compilaron bajo el software IgRoCS (Verma y Rivera-Gómez, 2013) en el cuál automáticamente se realizaron las clasificaciones de la roca, con ajustes de la relación hierro-oxidación propuestos por Middlemost (1989). Este proporciona valores normativos altamente precisos.

El laboratorio les realiza a las muestras a una fusión de Borato de litio antes de la disolución ácida y análisis ICP-MS mejorando cuantitativamente el análisis (Tabla A2). La incertidumbre en las mediciones caracteriza a la dispersión y al comportamiento de los valores y amplía la información sobre el análisis cuantitativo bajo un enfoque estadístico.

Limitaciones

En previos trabajos de petrogénesis para rocas volcánicas se ha visto que esta metodología expone parámetros confiables, esta metodología no sería confiable si se aplicará a rocas no volcánicas.

Fluorescencia de Rayos X (FRX)

El cálculo de los elementos mayores en la base de datos es calculado bajo las sensibilidades y concentraciones ya corregidas (Tabla A1), estadísticamente se somete a un ajuste válido para la intensidad corregida realizada por el programa. Algunas de las limitaciones que presenten los resultados sería la consecuencia de un tratado de muestras incorrecto en el cuál hubo contaminación. Las situaciones de las rocas alcalinas se tratan el comportamiento bajo el diagrama TAS de Le Bas et al. (1986) como clasificación de las rocas.

Como limitante cuantitativa para la concentración o resultado de los elementos mayores, sería obtener un valor LOI por encima del 4% que indique alguna alteración en las muestras medidas y que en su procesamiento modifique los parámetros.

Elementos traza y Tierras Raras

Las posibles limitaciones con la metodología ICP-MS para elementos traza y tierras raras aparece cuando se sabe que no todos los elementos trazas son detectables. Las mejores condiciones suceden en muestras de roca fresca y del peso recomendable, la primera limitante o la razón por la cual los valores varíen del rango establecido bajo el método, sería tener una muestra con cierto grado de contaminación.

Dentro de la metodología el ICP-MS trabajo bajo un rango lineal limitado, especialmente cuando se trabaja en disímiles niveles de concentración donde la alta sensibilidad para elementos ultra traza podría saturar la señal de mayoritarios. La aplicación de esta metodología funciona mejor en rocas volcánicas, en este caso de composición ácida.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de los análisis petrográficos, mineralógicos y geoquímicos realizados en las muestras de La Mesa Virgen-Calcerilla (LMVC).

Los resultados se resumen en dos zonas NE y SO de LMVC, en la parte central de la Sierra de Zacatecas. La zona NE muestra paquetes masivos de ignimbrita e ignimbrita estratificada, intrusionadas por domos de composición riolítica, en esta secuencia de paquetes se encuentra la Ignimbrita La Virgen. Estos paquetes ignimbríticos con contenido de líticos de tamaño variado, pómez bien compactada y con presencia de fenocristales de cuarzo, sanidinos y biotita, además de que esta zona cuenta con derrames de lava riolíticos. En cambio, la zona SO, se caracteriza por paquetes de depósitos piroclásticos de color blanco a gris rosado mucho más débiles al intemperismo e ignimbritas con presencia de fiames y un claro paquete de ceniza de color blanco a café claro sin compactar.

5.1 Análisis petrográfico

Los análisis petrográficos muestran como objetivo principal definir la composición mineralógica tanto principal como secundaria de láminas delgadas representativas de una muestra de roca. En estos análisis se pueden describir la composición de la matriz, características mineralógicas y texturales que a simple visto no es posible, de igual manera se pueden identificar si existen alteraciones o desequilibrios dentro de las rocas.

5.1.1 Grupo Traquitas

El grupo de las traquitas corresponden a las muestras Zac-01 y Zac-04, ambas pertenecen a la estratigrafía de la zona NE de LMVC (Figura 12). De igual forma se puede apreciar una matriz microcristalina de cuarzo. Las texturas principales que presenta las rocas traquíticas de LMVC son porfídica y porfídica vítrea, además de apreciarse una tendencia fluidal de los cristales en ambas muestras.

El ensamblaje mineralógico principal del grupo de traquitas de LMVC (Figura 19 y Figura A1) incluye feldespatos potásicos (Kfs) de forma anhedral con 0.3–0.5 mm, presenta vetillas formadas de sericita (Ser) con grado de alteración moderado que va de forma anhedral y subhedral con 0.3mm. Las plagioclasas (Pl) existentes en las traquitas tienen macla simple de forma subhedral a anhedral de 2–3mm. Además, se identifica la presencia de cuarzo (Qz) con forma subhedral de 0.5 – 1mm y algunos minerales opacos de 0.2mm. Como componente mineralógico secundario se encuentra la biotita alterada con formas subhedral a anhedral de 0.5-2mm. Dentro de la mineralogía secundaria se aprecian varias formas semicirculares rellenas de sericita. A su vez, la muestra Zac-04 tiene un corte transversal en donde se corta una vetilla de sericita moderadamente alterada. Esta en comparación con la muestra Zac-01, presenta un número mayor de vetillas compuestas de sericita.

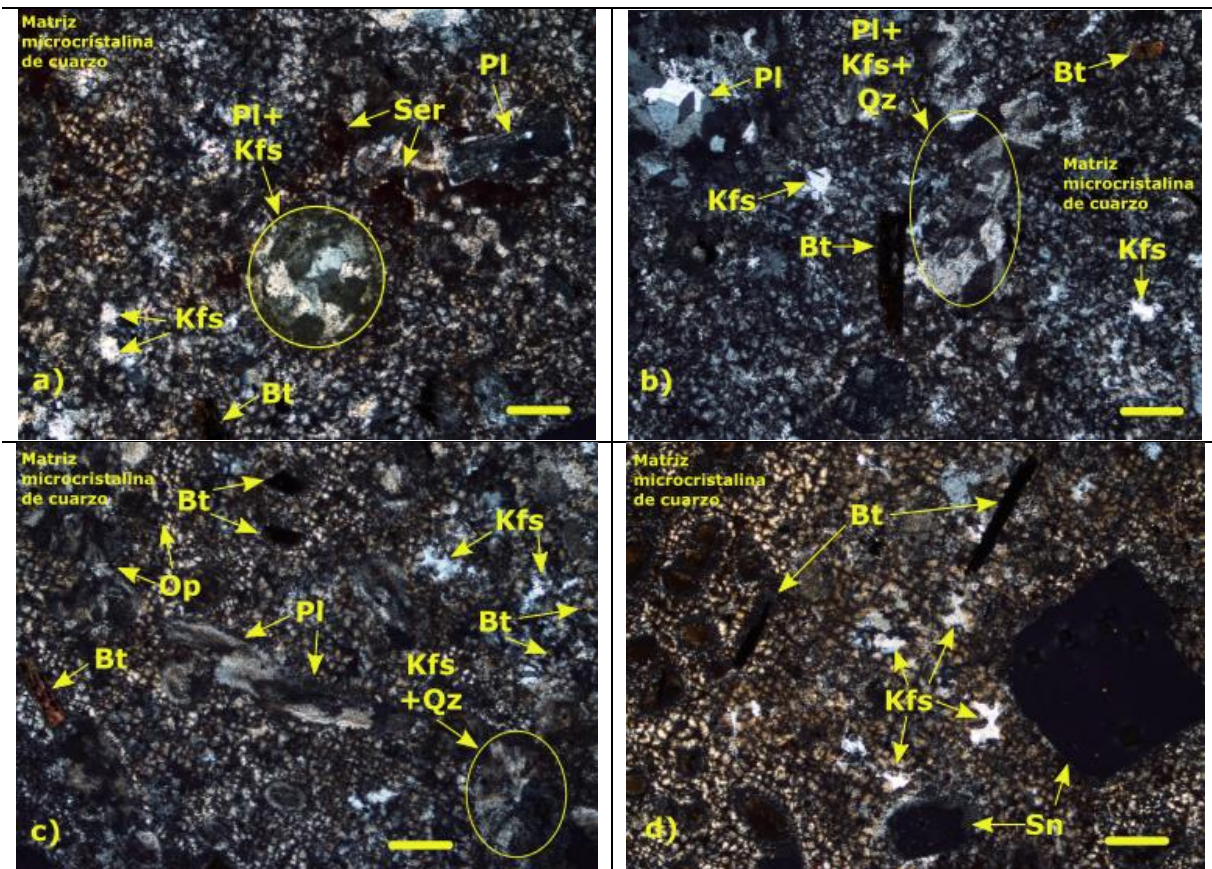


Figura 19. Fotomicrografía de las muestras traquitas, utilizando el objetivo 4.0/0.10X en nicoles cruzados (NX). La línea color amarillo en la parte inferior derecha representa 1cm de escala. Las fotomicrografías de la parte superior corresponden a la muestra ZAC-01 y las de la parte inferior a la muestra ZAC-04. Abreviaciones: Kfs–feldespato potásico, Pl–plagioclasa, Qz–cuarzo, Sn–sanidino, Bt–biotita, Op–minerales opacos.

5.1.2 Grupo Dacitas

Las muestras que corresponden a las dacitas son ZAC-11, ZAC-12 y ZAC-17, este grupo de rocas es correspondiente a la columna estratigráfica de la zona SO (Figura 14). En general para petrografía, presenta una mayor alteración en la matriz y en los cristales a la del grupo anterior, esto puede ser apreciado desde la identificación de la unidad, la muestra de mano descrita y la observación a microscopio.

Para este caso, se caracterizan por una textura porfirítica con una matriz microcristalina de cuarzo en donde se observa un grado alto de oxidación que se ha identificado como hematita, esto para las tres muestras, como a su vez, las muestras presentan orientación en el acomodo de sus minerales.

Las muestras presentan (Figura 20 y Figura A2), feldespato potásico diseminado en toda la lámina de forma subhedral a euhedral de 0.6–1.2 mm, los feldespatos con forma euhedral fueron identificados en las dacitas como sanidinos. Las plagioclasas identificadas cuentan con forma subhedral a euhedral con macla simple de 0.6–1.2 mm. El cuarzo presente se encuentra acompañado de sericita alterada en acumulación de vetillas, teniendo medidas de 0.2 mm y 0.5 mm. Esta muestra presenta una mayor proporción de mineral biotita de forma con medidas de 0.5–2 mm, se aprecia un mejor desarrollo de estos y a la vez una gran alteración del mineral.

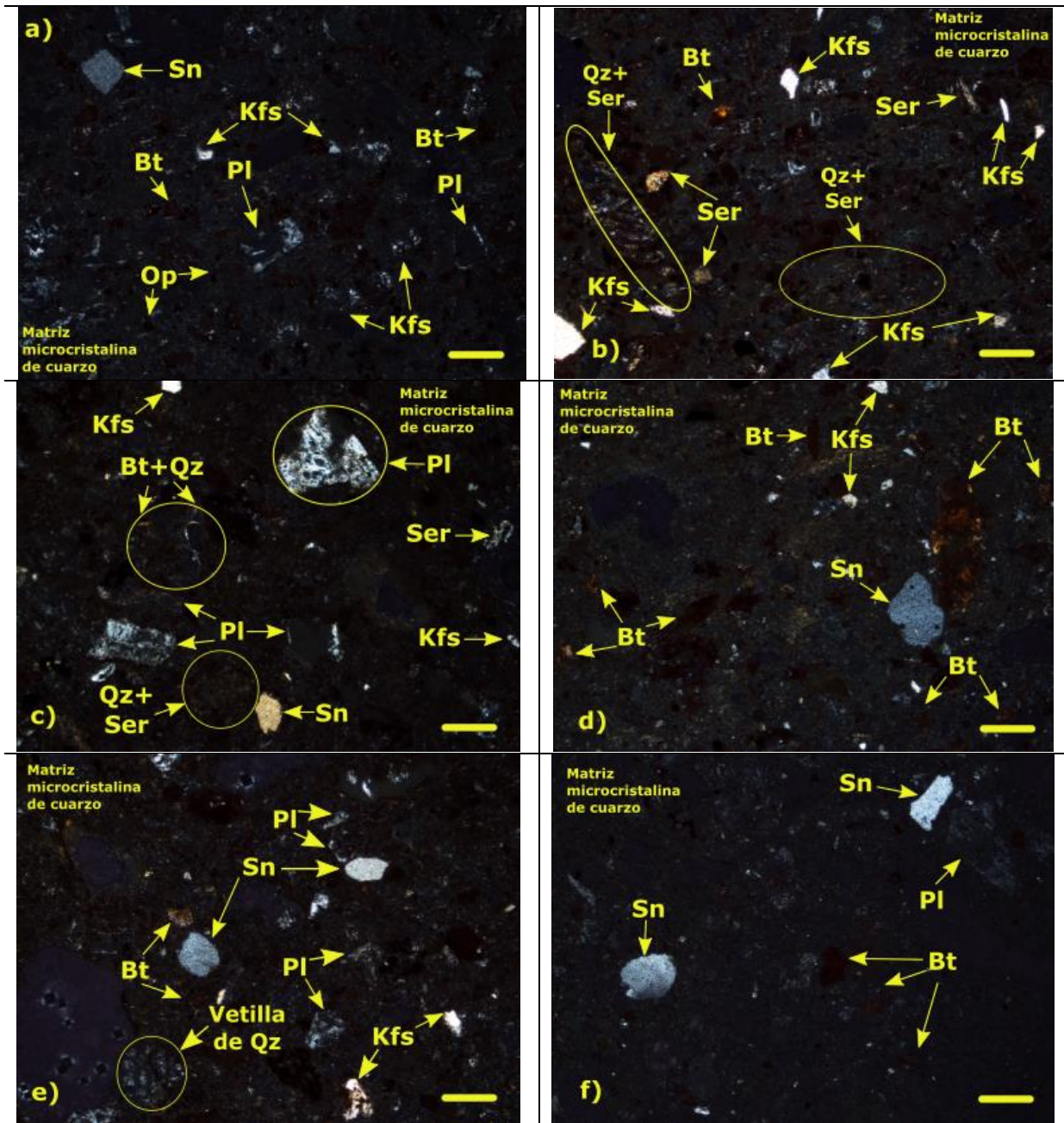


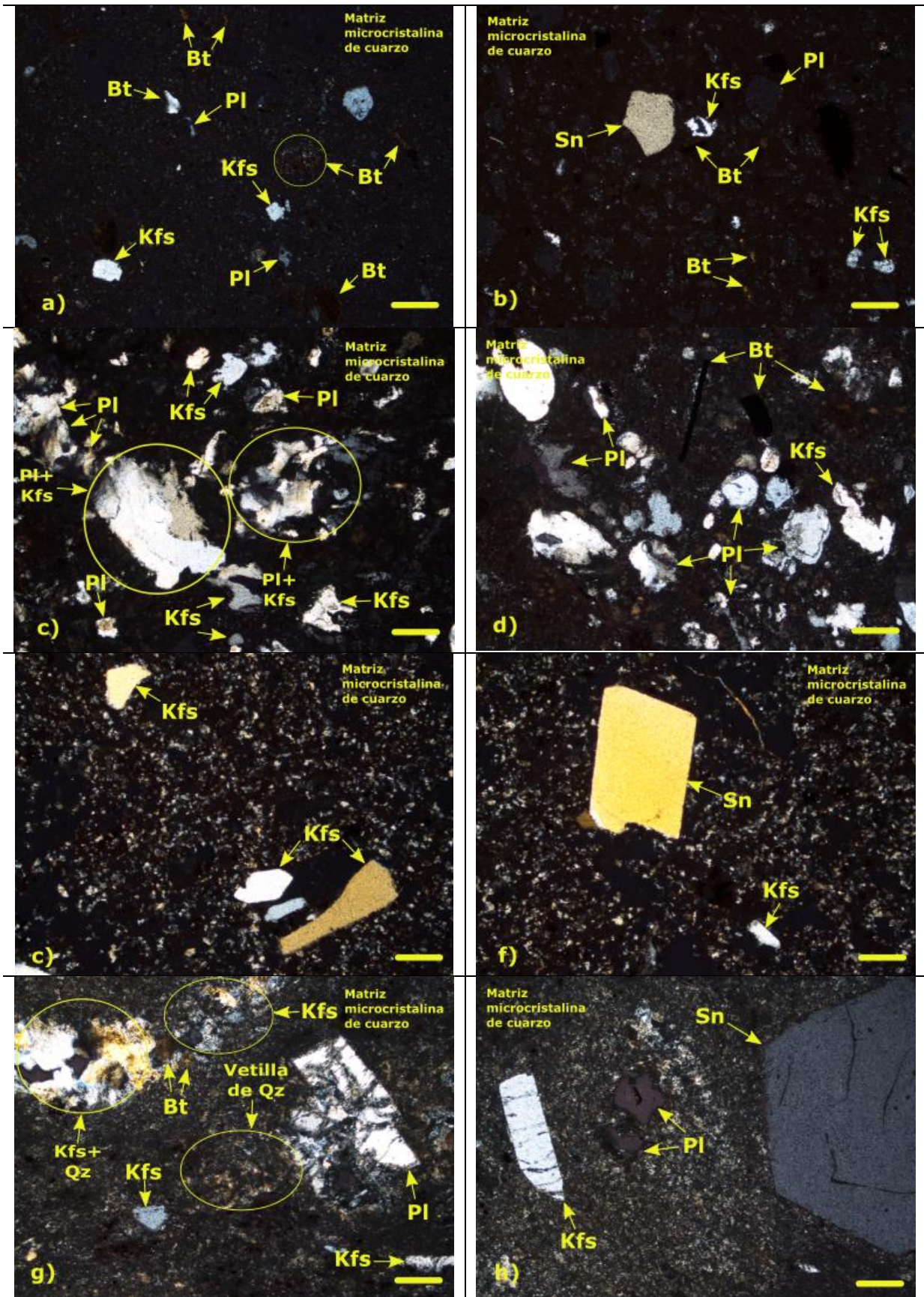
Figura 20. Fotomicrografía del grupo de las muestras dacitas, utilizando el objetivo 4.0/0.10X en nicols cruzados (NX). La línea color amarillo en la parte inferior derecha representa 1cm de escala. Las fotomicrografías de la parte superior corresponden a la muestra ZAC-11, las intermedias son pertenecientes a la muestra ZAC-12 y las de la parte inferior a la muestra ZAC-17. Abreviaciones: Kfs–feldespato potásico, Pl–plagioclasa, Qz–cuarzo, Sn–sanidino, Bt–biotita, Op–minerales opacos.

5.1.3 Grupo Riolitas

Este grupo se caracteriza por presentar texturas porfirítica y porfirítica vítrea con una matriz microcristalina de cuarzo. Las muestras de este grupo son: ZAC-07, ZAC-10, ZAC-15, ZAC-16 y ZAC-18, las cuales se encuentran tanto en la zona NE como en el SO (Figuras 12 y 14). Conforme se avanza en la columna estratigráfica de la zona SO la petrografía se observa de manera más amplia y con cristales con formas casi euhedral.

El ensamblaje mineralógico principal (Figura 21 y Figura A3) presenta feldespato potásico de forma euhedral en todas las láminas con una presencia mayor de 0.8–3 mm, es de importancia recalcar que para este grupo los sanidinos se encuentran mejor formados que en las demás láminas, con excepción de la muestra ZAC-10 ya que sus cristales son de menos longitud (aproximadamente 0.2 mm) de forma subhedral, muchos de los feldespatos son de micras pequeñas. En estas riolitas es ya poco frecuente la plagioclasa, las presentes están caracterizadas por la clásica forma tabular alargada con macla simple y algunas de macla doble, de 0.8–1.2mm. Se identifica el cuarzo con forma anhedral a subhedral expresado en forma de vetillas (Figura 21).

Se aprecia como componente mineralógico sericita lo que permite interpretar un poco de alteración, esto para la ZAC-10 y ZAC-15. Las últimas muestras de este grupo, ZAC-16 y ZAC-18 cuentan con mejor formación en los sanidinos de forma ya euhedral y mayor tamaño al igual que las plagioclasas. La muestra ZAC-18 muestra además oxidación, identificado como hematita y de pocos opacos.



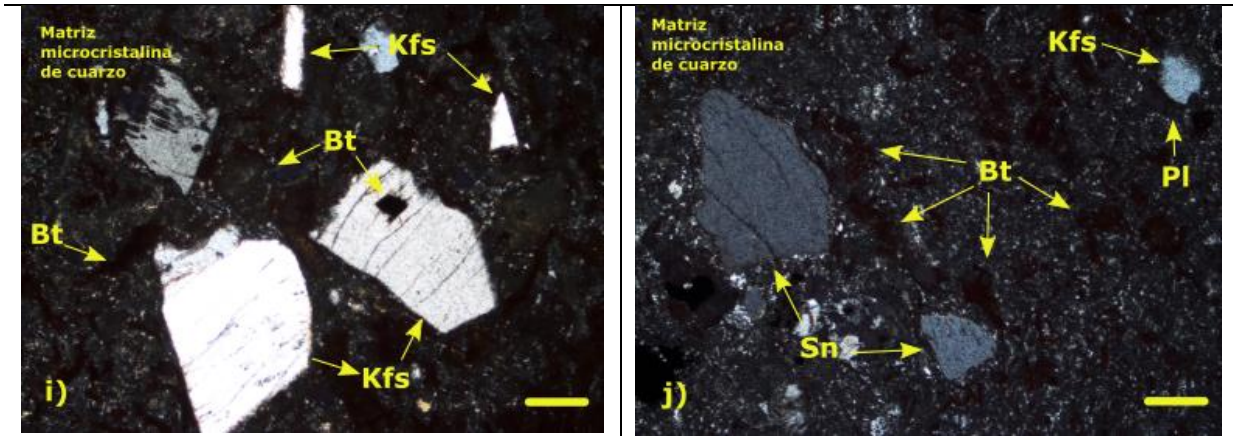


Figura 21. Fotomicrografía del grupo de las muestras riolitas, utilizando el objetivo 4.0/0.10X en nicols cruzados (NX). La línea color amarillo en la parte inferior derecha representa 1cm de escala. Las fotomicrografías de la parte superior corresponden a la muestra ZAC-1, las intermedias son pertenecientes a la muestra ZAC-12 y las de la parte inferior a la muestra ZAC-17. Abreviaciones: Kfs–feldespato potásico, Pl–plagioclasa, Qz–cuarzo, Sn–sanidino, Bt–biotita, Op–minerales opacos.

5.2 Análisis de mineralogía

El análisis de Difracción de Rayos X (DRX) es una técnica que permite identificar el contenido mineralógico con exactitud, para esto los minerales deben encontrarse en una abundancia mayor al 1%. Este porcentaje se determina mediante el método de relación de intensidad de referencia (RIR). El análisis se llevó a cabo mediante la técnica de difracción en polvo, donde es posible la identificación de los minerales por la estructura cristalina. Los rayos difractados son un fenómeno de dispersión que son representados mediante picos de Bragg que muestran ese contenido mineralógico en las muestras.

Los tres grupos de roca de LMVC fueron analizados para determinar los minerales que no fueron detectados en el estudio petrográfico. La identificación de los minerales primarios (Figuras 19–21) que se han confirmado en el análisis son sanidino, plagioclasa, cuarzo y hematita, confirmando la oxidación en las muestras, se ha hecho presente como mineral primario la moscovita. Como mineralogía secundaria, se encuentran presentes algunos minerales de alteración y variación de plagioclasa como; caolinita, anortita y un porcentaje de nontronita. Dentro del grupo de rocas riolitas se encuentra presente una considerable cantidad de zircón, mineral característico de la corteza.

En mayor abundancia está presente el cuarzo y las variaciones de plagioclasa, el desarrollo de los minerales y su alteración a fases secundarias sugieren una movilización de elementos como el K y Na de la composición original del magma que formó la roca, lo que también puede demostrarse en los anteriores diagramas. Los difractogramas (Figura 22) presentan a las muestras Zac-02, Zac-12, Zac-17 y Zac-18 donde se ve una alteración que va incrementando de manera significativa alterando el porcentaje de los minerales. Finalmente, los componentes mineralógicos de las rocas de LMVC son presentados (Tabla 1) observando su contenido para cada grupo.

Tabla 2. Contenido mineralógico de las rocas ácidas de LMVC, identificadas mediante la técnica de Difracción de Rayos X.

Muestra	Tipo de roca	Mineral identificado en orden creciente de abundancia (%)
ZAC-01	Traquita	Sanidino (71), Cuarzo (18), Microclina (6), Moscovita (3), Nontronita (2)
ZAC-02	Riolita	Sanidino (62), Cuarzo (31), Nontronita (3), Moscovita (2), Pirita (1), Goethita (1)
ZAC-04	Traquita	Sanidino (73), Cuarzo (17), Adularia (6), Moscovita (2), Nontronita (2)
ZAC-05	Riolita	Sanidino (56), Cuarzo (38), Microclina (3), Moscovita (2), Nontronita (1)
ZAC-07	Riolita	Sanidino (52), Cuarzo (41), Nontronita (3), Moscovita (2), Microclina (2)
ZAC-08	Riolita	Sanidino (58), Cuarzo (37), Moscovita (2), Nontronita (3), Alanita (1)
ZAC-10	Riolita	Sanidino (63), Cuarzo (29), Adularia (4), Moscovita (2), Nontronita (2)
ZAC-11	Dacita	Cuarzo (48), Sanidino (32), Caolinita (15), Nontronita (5)
ZAC-12	Dacita	Cuarzo (47), Sanidino (33), Caolinita (16), Nontronita (4)
ZAC-13	Riolita	Cuarzo (32), Sanidino (64), Microclina (3), Nontronita (1)
ZAC-15	Riolita	Cuarzo (32), Sanidino (64), Microclina (3), Nontronita (1)
ZAC-16	Riolita	Sanidino (65), Cuarzo (29), Nontronita (3), Ortoclasa (3)
ZAC-17	Riolita	Cuarzo (75), Caolinita (17), Hematita (5), Nontronita (3)
ZAC-18	Riolita	Cuarzo (36), Sanidino (42), Anortita (18), Nontronita (2), Adularia (2), Circón
ZAC-19	Riolita	Sanidino (61), Cuarzo (29), Caolinita (5), Moscovita (2), Microclina (2)
ZAC-21	Riolita	Cuarzo (32), Sanidino (58), Nontronita (3), Adularia (5), Microclina (2), Circón

5.3 Análisis geoquímico

La información geoquímica de las rocas de LMVC se analizó aplicando la metodología geoquímica típica para procesos y rocas magmáticas el cual involucra: (i) el cálculo de la norma CIPW con ayuda de software SINCLAS (Verma et al., 2002); (ii) elaboración de diagramas de clasificación de álcalis totales-sílice (TAS; $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$; Le Bas et al., 1986); (iii) elaboración de diagramas normalizados para elementos traza y tierras raras (lantánidos normalizados a condrita y multi-elementos normalizados a manto primordial).

La información analítica se capturó en el paquete comercial software STATISTICA® versión 7. La información de los datos analizados (elementos mayores, trazas y tierra raras) en el presente trabajo se reporta en las Tablas 2 y 3.

Tabla 3. Composiciones representativas de elementos mayores (en wt. %) de las rocas ácidas de LMVC. Las coordenadas se encuentran en datum WGS 84, Z 13 N.

Muestra	ZAC-01	ZAC-02	ZAC-03	ZAC-04	ZAC-05	ZAC-06	ZAC-07	ZAC-08	ZAC-09	ZAC-10
Roca	Traquita	Riolita	Riolita	Traquita	Riolita	Riolita	Riolita	Riolita	Riolita	Riolita
Coord. X (UTM)	749246	749259	749601	749606	749772	749805	749848	749972	750160	750619
Coord. Y (UTM)	2517008	2516993	2516914	2516909	2516867	2516891	2516821	2516444	2517043	2516871
SiO ₂	66	71	76	63	73	75	78	70	72	70
TiO ₂	0.14	0.11	0.27	0.15	0.52	0.26	0.21	0.63	0.15	0.11
Al ₂ O ₃	18.11	15.13	11.73	20.23	12.48	12.87	10.67	13.14	15.02	15.00
Fe ₂ O _{3t}	2.45	1.85	3.77	2.69	4.40	3.11	1.99	4.61	1.65	2.32
MnO	0.06	0.03	0.08	0.15	0.08	0.06	0.04	0.12	0.04	0.05
MgO	0.11	0.05	0.48	0.25	0.47	0.29	0.45	0.81	0.03	0.08
CaO	0.20	0.07	0.15	0.38	0.10	0.10	0.05	0.15	0.23	0.15
Na ₂ O	1.29	0.66	0.07	1.54	0.08	0.07	0.06	0.09	1.58	0.95
K ₂ O	11.01	10.44	7.42	10.39	8.35	7.83	8.30	9.15	8.78	10.58
P ₂ O ₅	0.10	0.09	0.06	0.01	0.03	0.11	0.06	0.03	0.07	0.09
LOI	0.24	0.31	0.38	0.71	0.82	0.48	0.53	1.03	0.79	0.39
Total	100.00	100.01	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Valores ajustados										
SiO _{2(adj)}	67	72	76	64	73	75	78	71	72	71
TiO _{2(adj)}	0.14	0.11	0.27	0.15	0.52	0.26	0.21	0.64	0.15	0.12
Al ₂ O _{3(adj)}	18.19	15.20	11.81	20.41	12.62	12.96	10.74	13.32	15.15	15.08
Fe ₂ O _{3(adj)}	0.76	0.58	1.18	0.84	1.38	0.97	0.62	1.45	0.52	0.72
FeO _(adj)	1.53	1.15	2.36	1.68	2.76	1.94	1.24	2.90	1.03	1.45
MnO _(adj)	0.06	0.03	0.08	0.15	0.08	0.06	0.04	0.12	0.05	0.05
MgO _(adj)	0.11	0.05	0.49	0.25	0.47	0.29	0.45	0.82	0.03	0.08
CaO _(adj)	0.20	0.07	0.15	0.39	0.10	0.10	0.05	0.15	0.23	0.15
Na ₂ O _(adj)	1.30	0.66	0.07	1.56	0.08	0.07	0.06	0.09	1.59	0.95
K ₂ O _(adj)	11.06	10.48	7.47	10.48	8.45	7.89	8.35	9.27	8.86	10.64
P ₂ O _{5(adj)}	0.10	0.09	0.06	0.01	0.03	0.11	0.06	0.03	0.08	0.09
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Norma CIPW										
Q	15.41	26.85	44.82	12.07	38.43	43.20	44.50	32.25	28.21	23.32
Or	65.34	61.94	44.12	61.93	49.93	46.60	49.36	54.80	52.35	62.89
Ab	10.98	5.59	0.58	13.16	0.64	0.62	0.51	0.75	13.49	8.06
An	0.39		0.35	1.84	0.28			0.52	0.63	0.13
C	3.94	2.76	3.48	5.83	3.24	4.30	1.60	2.94	2.71	1.94
Hy	2.33	1.63	4.26	3.03	4.40	3.16	2.61	5.34	1.39	2.17

Continuación de la Tabla 3

Muestra	ZAC-11	ZAC-12	ZAC-13	ZAC-14	ZAC-15	ZAC-16	ZAC-17	ZAC-18	ZAC-19	ZAC-20
Roca	Dacita	Dacita	Riolita	Riolita	Riolita	Dacita	Riolita	Riolita	Riolita	Riolita
Coord. X (UTM)	742439	742439	742737	742737	742499	742500	742472	742631	742823	742976
Coord. Y (UTM)	251340	251340	2513646	2513646	2513349	2513271	2513167	2512953	2512965	2512970
SiO ₂	69	69	71	70	71	70	70	71	72	69
TiO ₂	0.46	0.66	0.14	0.15	0.12	0.25	0.26	0.11	0.13	0.15
Al ₂ O ₃	17.29	16.58	14.38	16.95	15.13	16.78	20.65	14.68	14.91	15.75
Fe ₂ O _{3t}	3.95	4.27	2.18	0.75	2.64	0.87	5.09	1.70	1.51	2.08
MnO	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.04	0.04	0.10
MgO	0.57	0.59	0.02	0.04	0.12	0.04	0.03	0.71	0.43	0.17
CaO	0.25	0.39	0.25	0.23	0.06	0.18	0.09	0.38	0.22	0.62
Na ₂ O	0.05	0.09	0.21	0.54	0.45	1.33	0.02	2.09	1.22	1.65
K ₂ O	4.05	4.15	11.01	10.87	6.59	9.80	0.04	6.44	7.74	9.47
P ₂ O ₅	0.03	0.06	0.04	0.01	0.04	0.08	0.02	0.05	0.05	0.01
LOI	4.59	4.61	1.03	0.77	2.22	0.64	4.19	2.25	1.83	0.73
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Valores ajustados										
SiO₂(adj)	72	72	71	70	74	70	73	73	73	70
TiO₂(adj)	0.48	0.69	0.14	0.15	0.12	0.25	0.27	0.12	0.13	0.15
Al₂O₃(adj)	18.17	17.44	14.55	17.09	15.51	16.89	21.64	15.04	15.20	15.89
Fe₂O₃(adj)	1.10	1.19	0.68	0.24	0.84	0.27	1.41	0.54	0.48	0.65
FeO(adj)	2.75	2.97	1.37	0.47	1.68	0.54	3.53	1.08	0.95	1.30
MnO(adj)	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.04	0.04	0.10
MgO(adj)	0.60	0.62	0.02	0.04	0.13	0.04	0.03	0.73	0.44	0.17
CaO(adj)	0.27	0.41	0.26	0.23	0.06	0.18	0.09	0.39	0.23	0.63
Na₂O(adj)	0.06	0.09	0.21	0.55	0.46	1.34	0.02	2.14	1.24	1.66
K₂O(adj)	4.26	4.37	11.15	10.96	6.76	9.86	0.04	6.60	7.89	9.55
P₂O₅(adj)	0.03	0.06	0.04	0.01	0.04	0.08	0.02	0.05	0.05	0.01
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Norma CIPW										
Q	52.70	51.71	26.39	24.38	44.70	24.61	70.25	33.11	34.40	21.25
Or	25.16	25.81	65.87	64.76	39.92	58.29	0.24	39	46.63	56.45
Ab	0.48	0.77	1.80	4.63	3.87	11.32	0.18	18.15	10.49	14.08
An	1.12	1.60	1.01	1.06	0.001	0.35	0.30	1.60	0.80	3.07
C	13.05	11.98	1.76	3.94	7.44	3.88	21.44	3.78	4.32	1.68
Hy	4.90	4.95	1.81	0.57	2.53	0.46	4.94	3.24	2.9	2.20

Continuación de la Tabla 3

Muestra	ZAC-21
Roca	Riolita
Coord. X (UTM)	743038
Coord. Y (UTM)	2512972
SiO₂	68
TiO₂	0.12
Al₂O₃	16.75
Fe₂O_{3t}	1.74
MnO	0.05
MgO	0.61
CaO	0.28
Na₂O	1.54
K₂O	7.87
P₂O₅	0.07
LOI	2.45
Total	100.00
Valores ajustados	
SiO₂(adj)	70
TiO₂(adj)	0.12
Al₂O₃(adj)	17.19
Fe₂O₃(adj)	0.55
FeO(adj)	1.11
MnO(adj)	0.05
MgO(adj)	0.63
CaO(adj)	0.29
Na₂O(adj)	1.58
K₂O(adj)	8.08
P₂O₅(adj)	0.07
Total	100
Norma CIPW	
Q	28.21
Or	47.74
Ab	13.36
An	0.96
C	5.49
Hy	3.03

Tabla 4. Composiciones representativas de elementos traza y tierras raras (ppm) de las rocas ácidas de LMVC. Las coordenadas se encuentran en datum WGS 84, Z 13 N.

Muestra	ZAC-01	ZAC-02	ZAC-03	ZAC-04	ZAC-05	ZAC-06	ZAC-07	ZAC-08	ZAC-09	ZAC-10
Roca	Traquita	Riolita	Riolita	Traquita	Riolita	Riolita	Riolita	Riolita	Riolita	Riolita
Coord. X (UTM)	749246	749259	749601	749606	749772	749805	749848	749972	750160	750619
Coord. Y (UTM)	2517008	2516993	2516914	2516909	2516867	2516891	2516821	2516444	2517043	2516871
La	37.8	30.2	50.1	47.8	22.6	18.2	13.8	33.1	54.2	42
Ce	77.4	58.8	49.9	81	39.5	35.5	31.8	58.4	105.5	75.1
Pr	8.45	6.56	8.1	9.78	4.18	3.79	2.73	5.83	11.3	9.29
Nd	30.8	23.3	27.2	34.3	15.1	12.5	9.7	21.1	40.2	33.6
Sm	5.63	3.98	4.35	6.15	2.97	2.36	1.82	3.74	6.16	5.31
Eu	0.69	0.45	0.61	0.59	0.44	0.33	0.24	0.67	0.34	0.53
Gd	4.6	3.19	3.04	4.89	2.92	2.08	1.59	3.6	4.23	3.67
Tb	0.74	0.56	0.45	0.69	0.43	0.34	0.23	0.53	0.66	0.59
Dy	4.22	3.35	2.91	4.4	2.59	2.15	1.64	3.22	3.81	3.56
Ho	0.88	0.64	0.41	0.86	0.5	0.41	0.36	0.62	0.67	0.71
Er	2.6	1.91	1.38	2.59	1.62	1.44	0.83	1.77	1.85	2.36
Tm	0.36	0.28	0.18	0.36	0.22	0.2	0.17	0.27	0.28	0.33
Yb	2.4	2.14	1.23	2.47	1.52	1.24	1.08	1.87	2.02	2.26
Lu	0.31	0.3	0.18	0.3	0.23	0.17	0.17	0.25	0.29	0.34
Ba	947	741	577	1025	549	682	318	878	436	1255
Co	1	1	4		3	1	2	6		
Cr	20	10	70	10	40	50	20	30	30	20
Cs	15.6	12.45	82.7	36.4	55.7	55	23	48.5	10.6	21.2
Cu	4	1	23	2	25	24	7	19	1	1
Ga	16	12.5	12.3	16.2	12.9	9.1	12.8	15.1	13.1	14.6
Hf	4.4	3.9	2.2	5.2	2.6	2.1	2.2	2.9	4.6	4.3
Li	60	60	140	60	110	130	90	100	70	20
Mo	6	7	16	7	5	12	2	3	9	8
Nb	11.6	9	6.5	12	7	6.9	7.3	7	7.4	11.6
Ni	4	1	10	2	7	5	5	10	1	2
Pb	22	16	23	20	20	15	4	32	11	25
Rb	514	463	346	564	358	379	316	376	305	616
Sn	5	3	5	6	5	5	6	3		6
Sr	25.6	20.3	43.7	54.3	86	16.9	8.5	78.9	21.3	38.9
Ta	1.5	1.3	1.1	1.6	1.2	1.3	1.4	0.9	0.8	1.5
Th	14.85	12.2	7.71	16.2	8.98	9.3	9.28	6.96	16.85	15.15
U	4.62	4.17	3.67	4.66	3.54	2.26	3.14	4.66	3.48	3.61
V	17	24	38	11	38	29	12	44	10	10
W	5	7	8	4	10	6	2	5	5	7
Y	23.7	18.5	11.9	23.8	14.6	12.9	10.3	16.7	19.2	20.3
Zn	19	8	38	29	27	16	26	81	23	12
Zr	132	118	64	151	80	66	68	103	152	126
(La/Yb) _{CN}	10.70	9.59	27.67	13.15	10.10	9.97	8.68	12.02	18.23	12.62
(La/Sm) _{CN}	4.19	4.74	7.19	4.85	4.75	4.82	4.74	5.53	5.49	4.94
(Gd/Yb) _{CN}	1.55	1.21	2.00	1.60	1.55	1.36	1.19	1.56	1.69	1.31
(La/Yb) _{PM}	10.72	9.60	27.72	13.17	10.12	9.99	8.70	12.05	18.26	12.65
(La/Sm) _{PM}	4.21	4.75	7.22	4.87	4.77	4.83	4.75	5.55	5.51	4.96
(Ga/Yb) _{PM}	1.55	1.21	2.00	1.60	1.56	1.36	1.19	1.56	1.70	1.32
Eu_Eu*	0.42	0.39	0.52	0.33	0.46	0.46	0.43	0.56	0.20	0.37
Nb_Nb*	0.17	0.17	0.12	0.15	0.17	0.15	0.31	0.11	0.14	0.13

Continuación de la Tabla 4

Muestra	ZAC11	ZAC12	ZAC13	ZAC14	ZAC15	ZAC16	ZAC17	ZAC18	ZAC19	ZAC20	ZAC21
Roca	Dacita	Dacita	Riolita	Riolita	Riolita	Dacita	Riolita	Riolita	Riolita	Riolita	Riolita
Coord. X (UTM)	742439	742439	742737	742737	742499	742500	742472	742631	742823	742976	743038
Coord. Y (UTM)	251340	251340	2513646	2513646	2513349	2513271	2513167	2512953	2512965	2512970	2512972
La	47.5	63.4	37.2	32.2	69.8	39.5	33.5	57.5	69.8	58.3	63.891
Ce	111.5	116.5	91.4	62.5	55.6	259	40.6	103.5	61.2	107	111.895
Pr	13.5	15.6	7.58	7.78	15.4	9.95	2.72	13.3	15.55	12.6	12.690
Nd	51.6	57	25.8	23.9	51.3	32.7	5.9	45.8	52.2	43.8	44.200
Sm	7.8	9.81	3.59	3.12	6.95	5.73	0.84	8.28	8.41	7.25	6.879
Eu	0.75	1.12	0.25	0.3	0.1	0.17	0.13	0.13	0.16	0.44	0.306
Gd	4.08	6.56	2.69	2.45	4.37	3.63	1.01	6.66	5.97	4.67	5.701
Tb	0.75	0.99	0.51	0.44	0.9	0.63	0.17	1.14	0.91	0.66	0.850
Dy	5.36	5.98	3.89	2.9	8.06	4.9	1.46	6.61	5.81	3.72	4.053
Ho	1.19	1.17	0.88	0.62	1.71	1.09	0.34	1.39	1.16	0.68	0.717
Er	3.86	3.18	2.88	2.46	5.58	3.83	1.54	3.96	3.5	2.27	2.111
Tm	0.58	0.45	0.45	0.38	0.82	0.62	0.26	0.6	0.51	0.26	0.314
Yb	3.97	3.18	3.36	3	5.59	4.65	2.17	4.38	3.49	2.01	2.059
Lu	0.59	0.46	0.53	0.42	0.71	0.65	0.36	0.6	0.49	0.27	0.318
Ba	475	471	645	699	252	167.5	63.5	79.8	89.7	653	156.714
Co	4	3	2		1						
Cr		10	20	10		10	10		10	20	8.687
Cs	34.1	45.2	13.35	18.5	9.03	14.65	3.8	14.15	10.75	12.85	12.408
Cu	4	5	3	2	2	1	3	3	2	1	
Ga	24.1	20.7	13.4	13.8	21	18	19.1	21.7	21.4	12.7	
Hf	7.9	6.8	6.4	5.4	7.4	10.9	10	8	7.9	4.9	3.730
Li	80	80	60	110	80	30	210	50	40	60	
Mo	6	1	5	5	1	4	1	2	2	8	
Nb	11.3	11	11.7	11.1	17.5	17.7	13.8	16.7	16.3	7.4	10.973
Ni	3	6	2		3	1	1	1	1	2	
Pb	14	22	11	6	11	8	14	16	16	11	14.966
Rb	297	291	446	425	258	357	3.6	305	438	313	348.017
Sn	4	3	1	2	3	3	19	2	2		
Sr	292	316	54.8	46.1	103.5	82.3	441	30	18.5	32	16.825
Ta	0.9	0.9	1.1	1	1.5	1.2	1	1.3	1.3	0.7	0.835
Th	12.3	13.4	18.7	16.95	18.1	17.95	15.15	21	21.4	16.05	20.368
U	3.39	5.07	5.05	3.65	5.4	3.75	3.38	4.29	4.05	3.91	3.196
V	26	44	7	5	32	15	10	5	15	25	9.58
W	14	23	10	4	11	3	6	2	2	2	5.642
Y	30	33	23	17.8	42.2	29.6	10.7	38.4	32	19.7	22.093
Zn	116	124	16	7	51	9	5	74	43	24	
Zr	307	234	185	167	212	429	430	249	247	165	113.411
(La/Yb) _{CN}	8.13	13.54	7.52	7.29	8.48	5.77	10.49	8.92	13.59	19.70	21.08
(La/Sm) _{CN}	3.80	4.04	6.47	6.44	6.27	4.30	24.90	4.34	5.18	5.02	5.80
(Gd/Yb) _{CN}	0.83	1.67	0.65	0.66	0.63	0.63	0.38	1.23	1.38	1.88	2.24
(La/Yb) _{PM}	8.14	13.57	7.53	7.30	8.50	5.78	10.51	8.93	13.61	19.74	21.12
(La/Sm) _{PM}	3.82	4.05	6.49	6.47	6.29	4.32	24.99	4.35	5.20	5.04	5.82
(Ga/Yb) _{PM}	0.83	1.67	0.65	0.66	0.63	0.63	0.38	1.23	1.39	1.88	2.24
Eu/Eu*	0.41	0.43	0.25	0.33	0.06	0.11	0.43	0.05	0.07	0.23	0.15
Nb/Nb*	0.23	0.19	0.22	0.21	0.35	0.60	0.66	0.48	0.39	0.11	0.26

CN = Valor normalizado en Condrita (tomado de McDonough and Sun, 1995)

PM = Valor normalizado en Manto Primitivo (tomado de McDonough and Sun, 1995)

Eu/Eu* = $Eu_{CN} / ((Sm+Gd)_{CN}/2)$

Nb/Nb* = $2 \cdot Nb_{PM} / (Ba+La)_{PM}$

b) Grupo Dacita

En contraste el grupo de las dacitas presenta de forma general composiciones con rangos de $(\text{SiO}_2)_{\text{adj}} = 72\text{--}73$ wt.%, $(\text{MgO})_{\text{adj}} = 0.02\text{--}0.62$ wt.%, $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{adj}} = 17.43\text{--}22$ wt.%, $(\text{TiO}_2)_{\text{adj}} = 0.27\text{--}1$ wt.%, $\text{FeO}^{\text{t}}/\text{MgO} = 6.21\text{--}176$ wt.%. A su vez presenta un $\text{Mg\#} = 67\text{--}68$, $\text{A/NK} = 3.91\text{--}342.47$, $\text{A/CNK} = 3.58\text{--}138.32$.

Los valores normalizados se establecen de $\text{Hy} = 4.90\text{--}4.95\%$, $\text{Ab} = 0.18\text{--}0.77\%$, $\text{Or} = 0.24\text{--}25.81\%$, $\text{An} = 0.30\text{--}1.60\%$.

c) Grupo Riolita

Este grupo presenta de forma general composiciones riolíticas, y cubre los siguientes porcentajes de elementos mayores: $(\text{SiO}_2)_{\text{adj}} = 70\text{--}78$ wt.%, $(\text{MgO})_{\text{adj}} = 0.02\text{--}1$ wt.%, $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{adj}} = 11\text{--}17$ wt.%, $(\text{TiO}_2)_{\text{adj}} = 0.22\text{--}1$ wt.%, $\text{FeO}^{\text{t}}/\text{MgO} = 2.13\text{--}93.32$ wt.%. A su vez presenta un $\text{Mg\#} = 34\text{--}84$, $\text{A/NK} = 1.27\text{--}2.14$, $\text{A/CNK} = 1.25\text{--}2.13$.

Los valores normalizados se establecen de $\text{Hy} = 0.46\text{--}5.34$, $\text{Ab} = 0.51\text{--}18.14$, $\text{Or} = 39.00\text{--}65.87$, $\text{An} = 0.001\text{--}3.07$.

5.3.3 Elementos traza y Elementos Tierras Raras (REE).

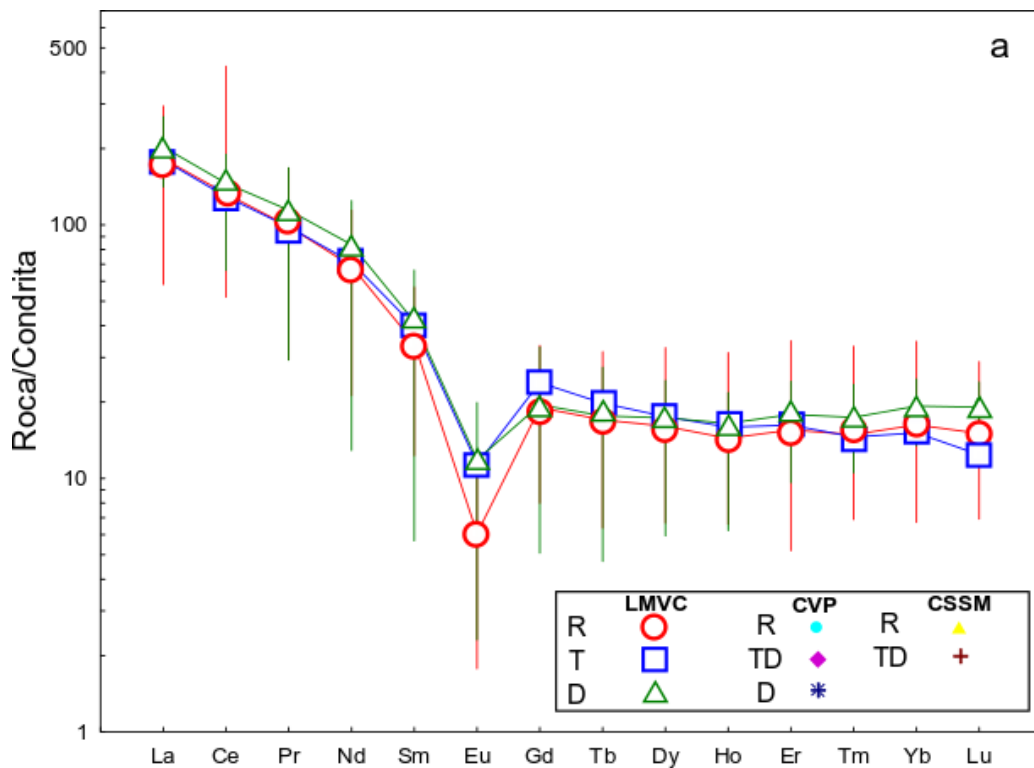
1. Diagrama de lantánidos

De acuerdo con la composición de lantánidos para las rocas volcánicas de LMVC, se presentan en diagramas de lantánido normalizados a condrita con valores tomados de (Tabla 3, Figura 24a–b; McDonough y Sun, 1995).

Los tres estilos de rocas volcánicas presentes en LMVC presentan un enriquecimiento en los elementos ligeros (LREE, por sus siglas en inglés), con un descenso que tiende a la horizontal en tierras raras pesadas, este valor puede ser evaluado por medio de la relación $[(\text{La}/\text{Yb})_{\text{CN}} = 5.77\text{--}27.67]$ y $(\text{Tb}/\text{Yb})_{\text{CN}} = 0.35\text{--}1.84]$. De igual forma la mayoría del enriquecimiento de tierras raras ligeras se presenta en niveles similares de valores roca (condrita, con excepción del grupo de riolitas las cuales muestran una movilidad mayor en es los elementos ligeros, lo

cual, puede llegar a interpretarse como una contribución cortical dentro de la génesis, de este grupo de rocas.

A su vez, en los tres grupos de roca se observa una anomalía pronunciada de Eu (Figura 24a), con valor de $((Eu/Eu^*) = 0.055-0.561)$ y lleva a interpretar como una generación o una alta fraccionación de plagioclasas y feldespatos, lo cual es congruente con la mineralogía principal presente en las rocas. A su vez, se observan concentraciones totales de tierras raras varían desde 64.52 a 362.15 ppm. El mismo patrón también se ha observado en las rocas volcánicas de la CVP y CSSM (Figura 24b).



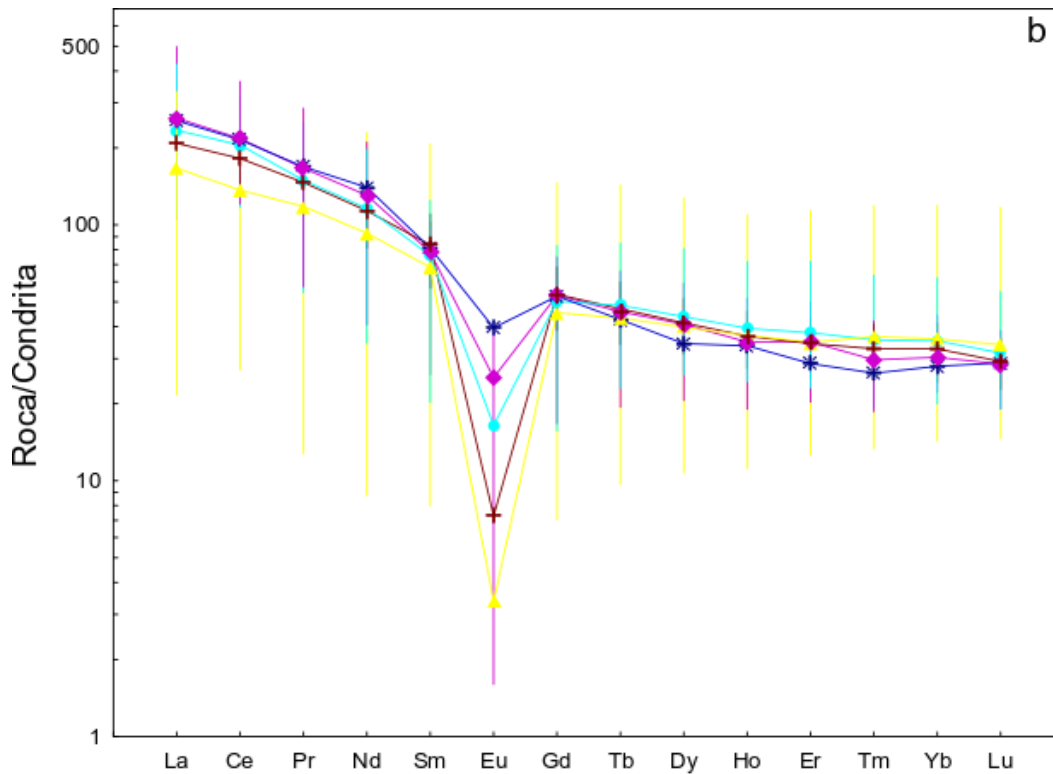


Figura 24. a) Diagramas de condrita normalizados (Valores de condrita tomados de McDonough y Sun, 1995) para las rocas volcánicas de LMVC, b) Diagramas de condrita normalizados para las rocas volcánicas de CVP y CSSM. Abreviaciones: LMVC– La Mesa Virgen Calerilla, CVP– Complejo Volcánico Pinos, CSSM–Complejo Sierra San Miguelito, R–riolita, T–traquita, D–dacita, TD–traquidacita.

2. Diagrama de Multi-elementos normalizados a manto primitivo

Los resultados de la composición de los elementos traza son representados en los diagramas multi-elementos normalizados a manto primitivo, los valores utilizados para la normalización son tomados de la Tabla 3, (Figura 25a–b; McDonough y Sun, 1995).

Esencialmente las principales características y patrones que se observan es un patrón muy similar para los tres grupos (riolitas, traquita y dacita): Los tres conjuntos de rocas volcánicas de LMVC presentan un patrón clásico para las rocas ácidas, se aprecia un pausado enriquecimiento, existiendo incrementos en los elementos incompatibles con algunos descensos y claras tendencias negativas en presentes en Nb, P, y Ti. Por último, el patrón para los elementos compatibles tiende a la horizontal en los tres grupos de rocas terminando con una clara anomalía en Nb

(Nb/Nb* = 0.11–0.65), Ta (Ta/Ta* = 0.20–1.08) y P (Figura 25a). El mismo patrón también se ha observado en las rocas volcánicas de la CVP y CSSM (Figura 25b).

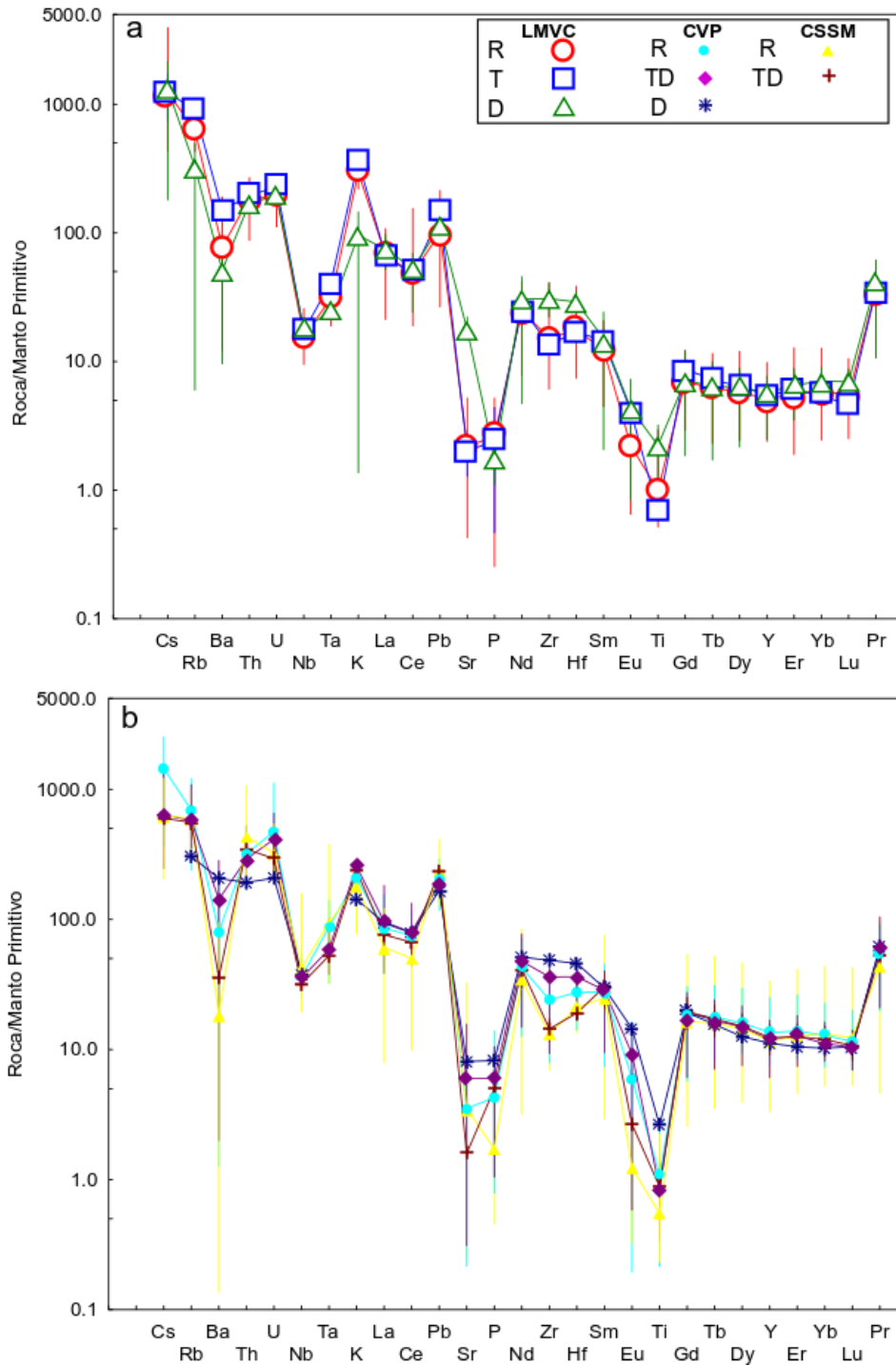


Figura 25. Diagramas multielementos normalizados a manto primitivo (datos de normalización en ppm, tomados de McDonough y Sun, 1995). (a) Diagrama para las rocas volcánicas de LMVC, (b) Diagrama para las rocas volcánicas de literatura CVP y CSSM. Abreviaciones: LMVC– La Mesa Virgen Calerilla, CVP–Complejo Volcánico Pinos, CSSM–Complejo Sierra San Miguelito, R–riolita, T–traquita, D–dacita, TD–traquidacita.

CAPÍTULO 6

DISCUSIÓN

6.1 Alteración

En general el estado de Zacatecas presenta distintos grados de alteración en sus afloramientos rocosos, a su vez dentro de los distintos paquetes piroclásticos presentes se llegan a observar un contenido alto en líticos y pómez, sin embargo, al observar las características geoquímicas de las rocas no se presenta algún grado de alteración, ya que los rangos de valores para elementos mayores y trazas, así como el resultado de LOI se encuentra dentro de los parámetros normales (4%). Para las rocas de LMVC los rangos de pérdida por ignición son: traquita (0.5%); dacitas (4.5%); riolitas (1%).

A su vez, el efecto de alteración post-emplazamiento en la movilidad de elementos pueden ser considerados para solo algunas de las muestras. Como un índice de alteración independiente por la diversidad geoquímica, las concentraciones de Zr implican una correlación significativa con algunos otros elementos (Pearce et al., 1992; Wang et al., 2016). Por lo tanto, elementos como Nb, Hf, Ce y Sm fueron graficados contra Zr para evaluar su movilidad durante la alteración (Figura 26), estos presentan una correlación entre los distintos elementos, esto implica que la alteración post-emplazamiento no es presente dentro de la evolución de las rocas ácidas de LMVC.

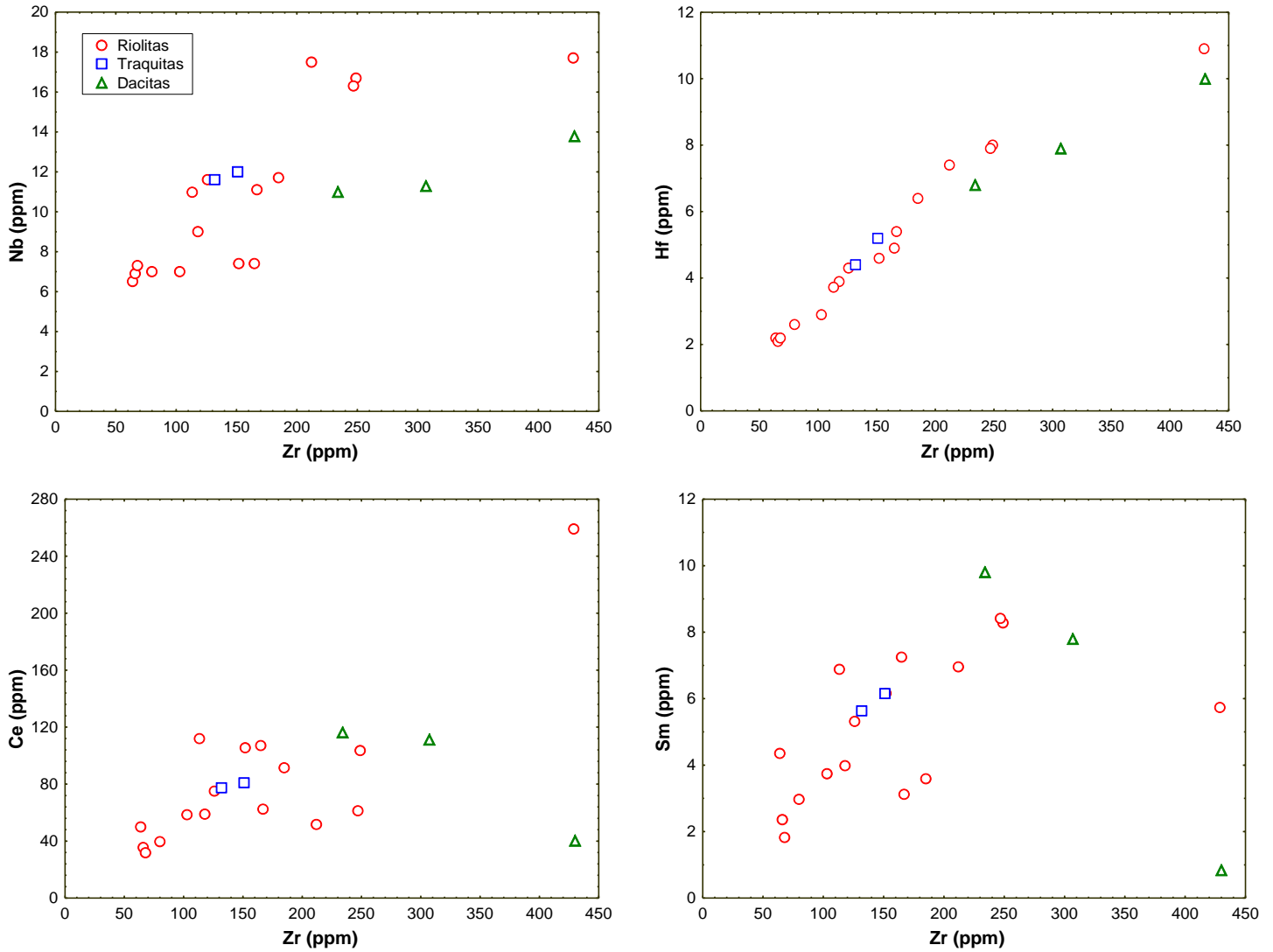


Figura 26. Diagramas basados en Zr en relación con los elementos traza Nb, Hf, Ce, Sm para mostrar si hay alteración completa en la roca. Se logra apreciar una tendencia normal, donde no se ve alteración alguna.

6.2 Procesos petrogenéticos

6.2.1 Fuente del magma

Para la investigación de la composición fuente de los magmas félsicos de La Mesa Virgen Calerilla (LMVC), se utilizaron las proporciones de elementos inmóviles e incompatibles (p.ej. Th, Yb, Nb) debido a su sensibilidad a la adición de la corteza, lo cual indica la interacción magma-corteza como también el reciclaje de la corteza (Pearce, 2008). Dentro del diagrama bivariado de Nb/Yb vs Th/Yb (Figura 27a), las rocas félsicas de LMVC se han trazado de forma paralela y cercana a las composiciones de la parte media superior de la corteza continental, lo cual representa una contribución de la corteza continental en su petrogénesis (Figura 27a).

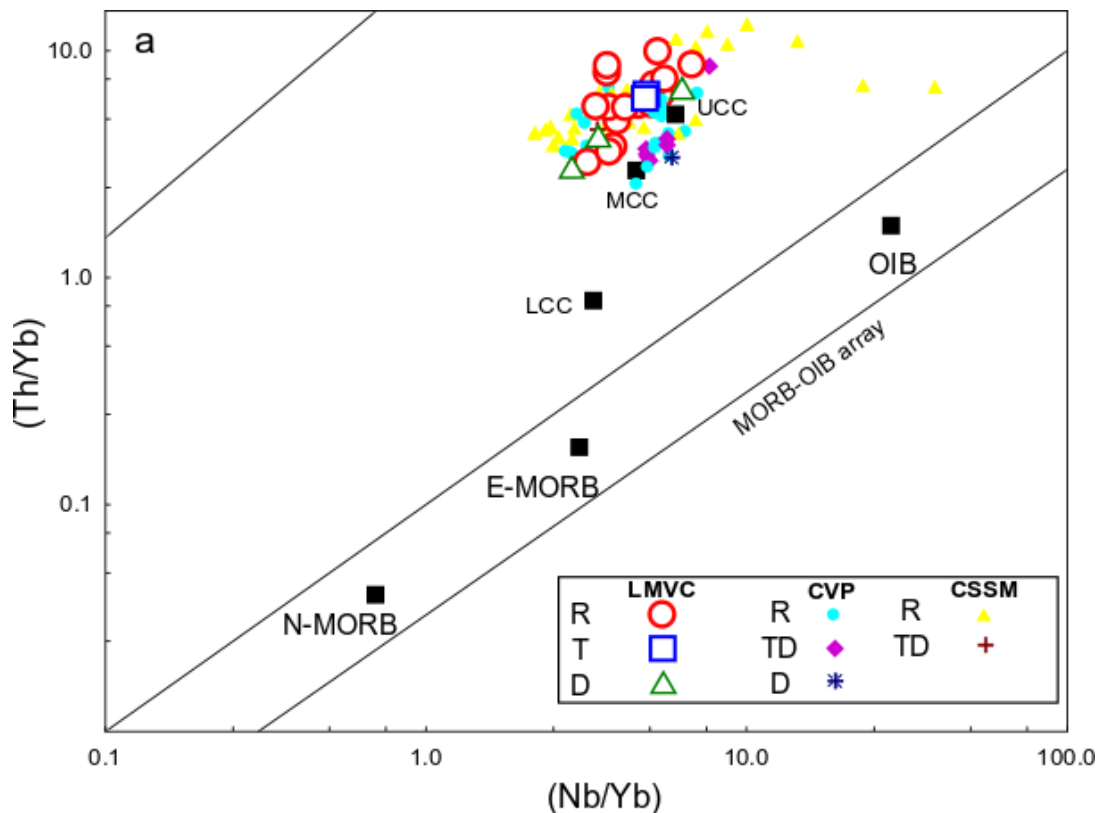
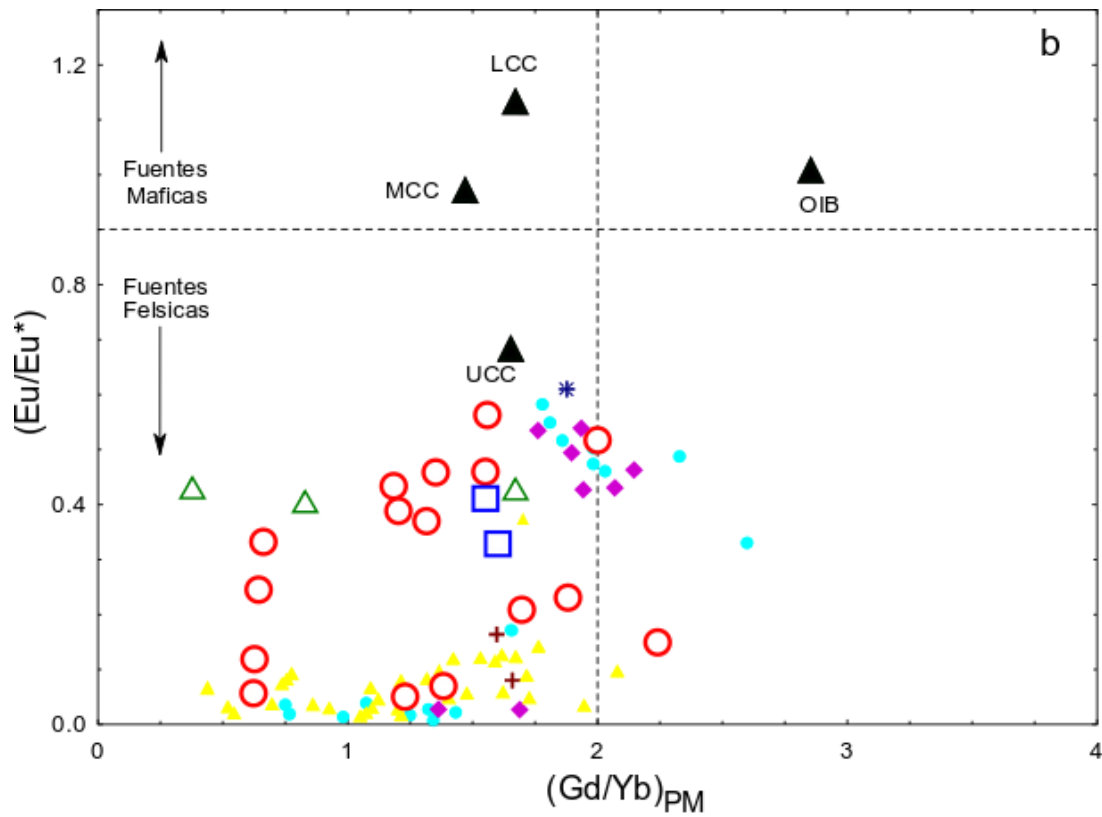


Figura 27. (a) Diagrama (Nb/Yb) con relación (Th/Yb) de variación geoquímica de rocas volcánicas de LMVC, CVP y CSSM. Abreviaciones: N-MORB–normal Mid-Ocean Ridge basalt, E-NORM–enriquecido Mid-Ocean Ridge basalt, OIB–Ocean Island basalt, LCC–Corteza continental inferior, MCC–Corteza continental media, UCC–Corteza continental superior, LMVC–La Mesa Virgen Calerilla, CVP–Complejo Volcánico Pinos, CSSM–Complejo Sierra San Miguelito, R–riolita, T–traquita, D–dacita, TD–traquidacita.

Además, esto puede ser comparable con el diagrama $(Gd/Yb)_{PM}$ contra Eu/Eu^* y el diagrama de relaciones Nb/Ta contra Th/Yb (Figura 28b–c) aplicado para las rocas félsicas de LMVC, se observa que los tres distintos grupos de rocas presentan una tendencia hacia composiciones de la corteza superior juntos con fuentes félsicas, lo cual indica una posible fuente de la corteza continental superior, lo cual es consistente en estos tres distintos diagramas.



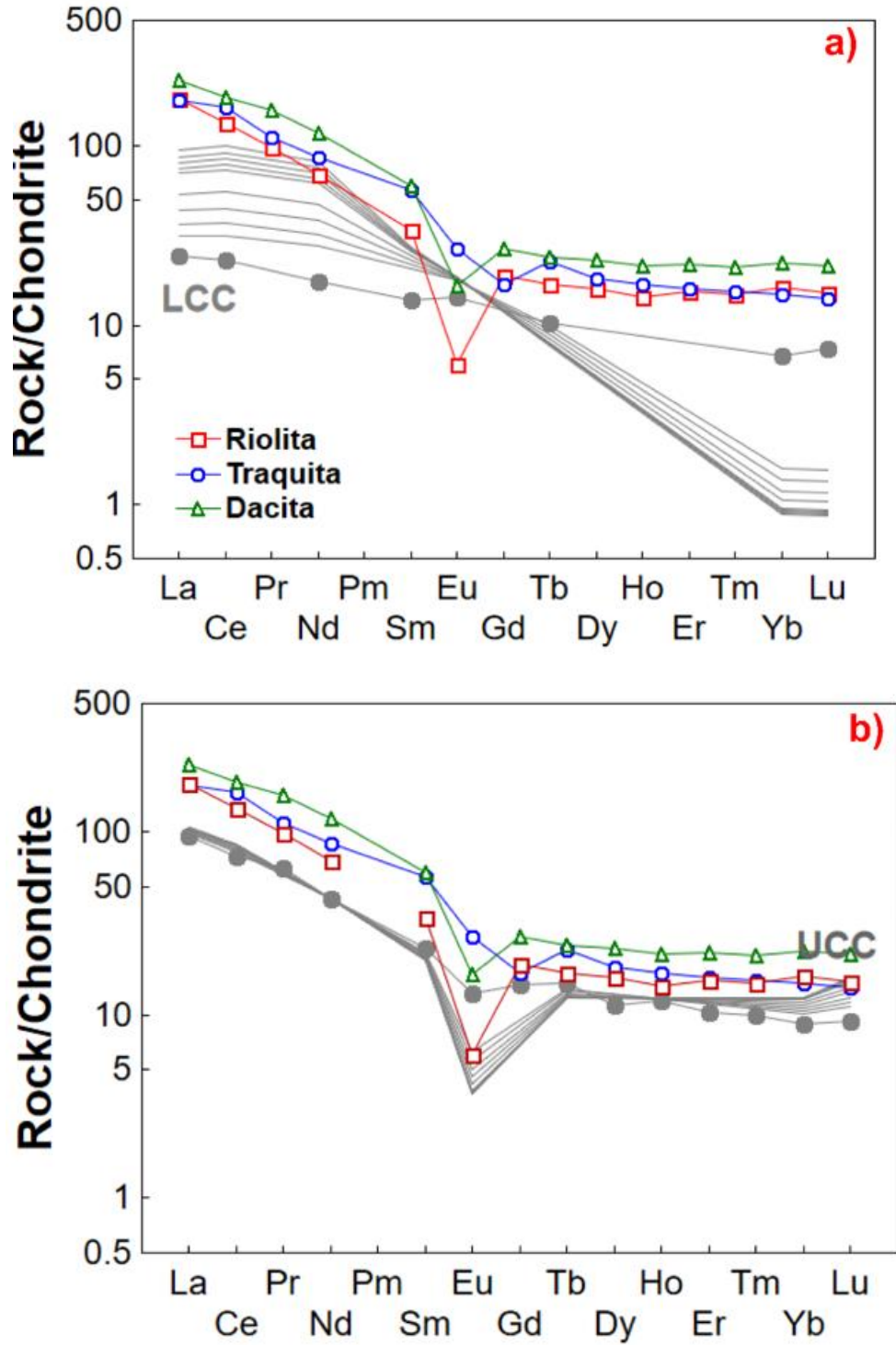
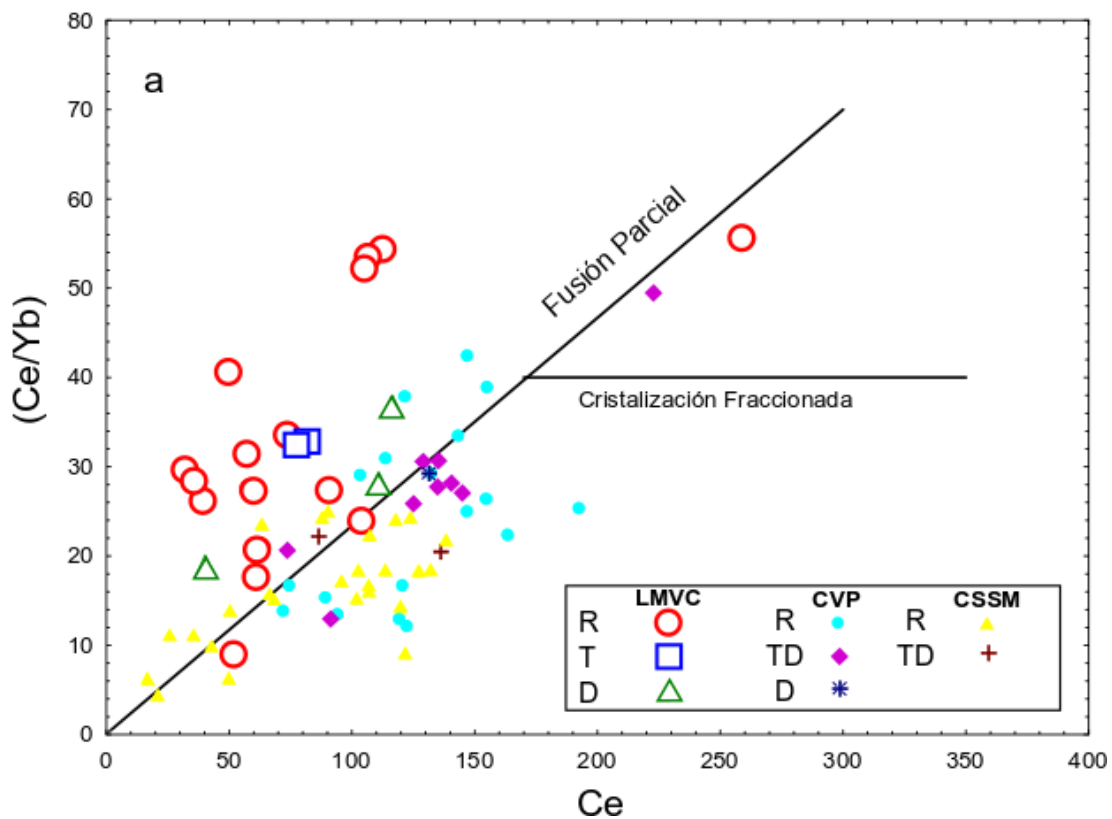


Figura 29. Modelo cuantitativo de fusión parcial para las rocas félsicas del LMVC. (a) Patrones de elementos de tierras raras normalizados con condrita para la corteza continental inferior (LCC), (b) patrones de elementos de tierras raras normalizados con condrita para la corteza continental superior (UCC). Grado de fusión $F = 0.2-0.5$ (20%-50%). Valores de LCC y UCC tomados de Rudnick y Gao (2003).

6.2.2 Fusión parcial de rocas félsicas

El diagrama Ce vs (Ce/Yb) (Figura 30a) y el diagrama La vs (La/Yb) (Figura 30b) fueron utilizados para conocer los distintos grados de fusión parcial y/o cristalización fraccionada pudieron ocasionar el origen de las rocas félsicas de LMVC. Estas relaciones son importantes para el entendimiento de la generación de variaciones composicionales en rocas félsicas (Allégre y Minstar, 1978; Thirlwall et al., 1994). En ambos diagramas (Figura 30a–b) se observa que las rocas félsicas de LMVC siguen una tendencia hacia distintos grados de fusión parcial, en lugar de procesos de cristalización fraccionada.



como: $0.4 \text{ Plg} + 0.2 \text{ Cpx} + 0.2 \text{ Cpx} + 0.2 \text{ Opx} + 0.1 \text{ Gt} + 0.1 \text{ Amp}$ para las mezclas de las granulitas (máficas y metasedimentarias); y $0.3 \text{ Qtz} + 0.4 \text{ Fld} + 0.2 \text{ Bt} + 0.1 \text{ Plg} + 0.02 \text{ Cpx}$ para la corteza superior (UCC). Los modelos de fusión parcial para las rocas de LMVC revelan que estas se generaron en niveles de la corteza media principalmente con grados de fusión del ~5-15% (Figura 31c).

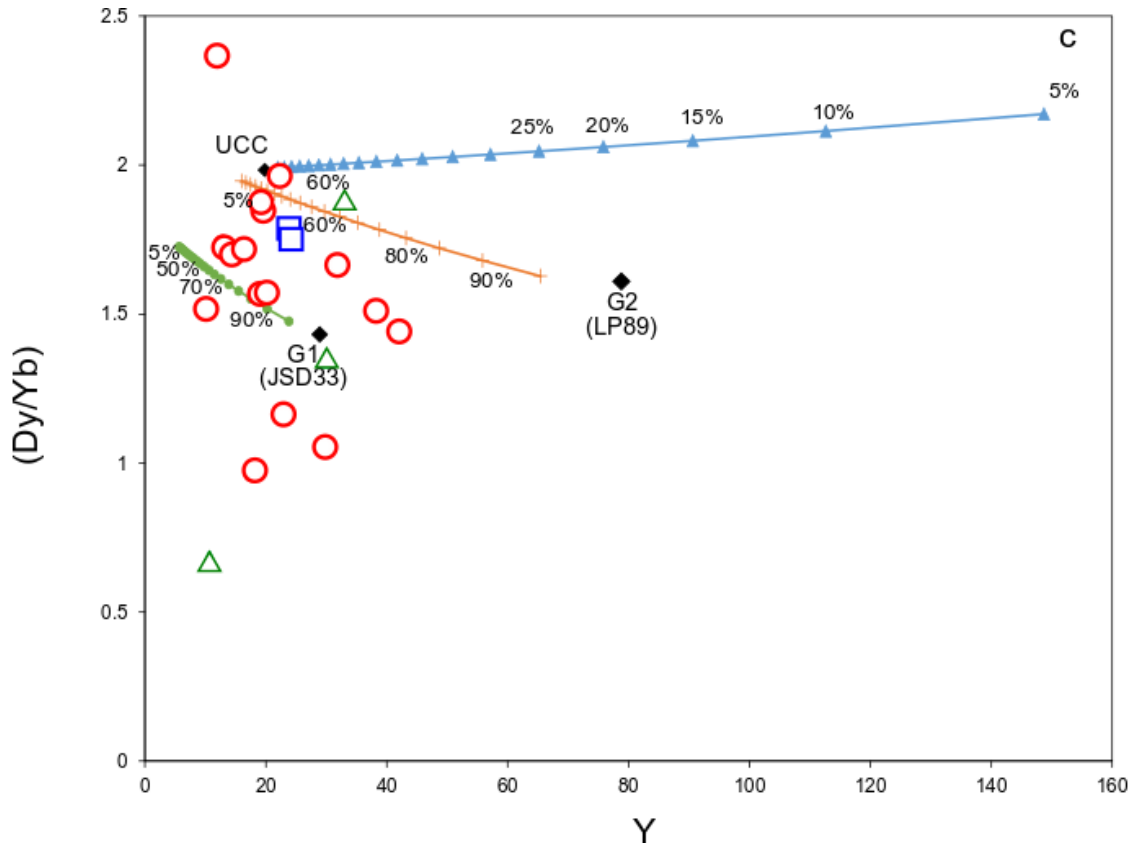


Figura 31. (c) Diagrama $Y-(Dy/Yb)$ muestra un modelo cuantitativo de fusión parcial para las rocas félsicas del LMVC. Se generaron curvas de fusión parcial (líneas azul, naranja y verde) al grado de fusión $F = 0.05-0.95$ (5-95%), aplicando "batch melting" ecuación de Zou (2007). El símbolo de diamantes negro corresponde a los valores de granulitas máficas (G1), metasedimento granulito (G2) y corteza continental superior (UCC). Los valores de granulitas se toman de Schaaf et al. (1994.) El valor de la corteza continental superior se toma de Rudnick y Gao (2003).

Esto de acuerdo con lo propuesto por Verma (1984) en un trabajo pionero sobre la petrogénesis de las rocas félsicas del distrito minero de Zacatecas, donde (en base a isotopía Sr/Nd) propone un modelo de mezcla, donde los magmas derivados de un manto ligeramente empobrecido se fracciona y experimenta en su ascenso una contaminación por fusión parcial de material cortical (corteza continental media-superior) y entrampado en profundidades someras de la corteza, experimenta cristalización fraccionada, antes de su erupción.

6.3 Modelo tectono-térmico y ambientes tectónicos

Los resultados del estudio químico y petrogenético de las lavas e ignimbritas del presente estudio aportan elementos para proponer un modelo tectono-térmico que considere en su génesis, asimilaciones de la parte media y superior de la corteza, en la parte suroriental de la provincia magmática de la SMOc. La historia de erupciones pausadas de las ignimbritas en LMVC durante ~10 Ma (de 47 a 37 Ma) supone la presencia de cámaras magmáticas emplazadas a profundidades media y superior de la corteza durante el Eoceno.

En términos generales se ha planteado que el vulcanismo ignimbrítico del Oligoceno-Mioceno de SMOc provino del emplazamiento de cantidades significativas de magmas máficos procedentes del manto que durante su ascenso sufrió procesos de mezcla y asimilación-cristalización fraccionada a gran escala antes de su erupción final (Ferrari et al., 2005). Norton (1995) propuso que entre 43 y 39 Ma la velocidad de convergencia entre la placa Farallón y Norteamérica disminuyó, estos cambios inducen una variación de la inclinación del “*slab*” de subducción, provocando un efecto de “*roll back*” donde hay procesos de extensión y vulcanismo asociados, favoreciendo el desprendimiento de magmas basálticos desde la cuña del manto y ascendiendo a través de los espacios resultados del cambio de velocidad. Ferrari et al. (2005) sugieren que los pulsos ignimbríticos del Oligoceno y Mioceno de la SMOc, pudieron estar asociados a cambio en la velocidad de convergencia de las placas en esos periodos. En LMVC no se presentan unidades volcánicas del Oligoceno, entre Zacatecas y Aguascalientes, sin embargo, Loza-Aguirre et al. (2008) reportan lavas y una ignimbrita riolítica de 28 y 27 Ma; un “hiatus” de 9Ma en el registro de vulcanismo félsico en esta región, donde no se reporta unidades Miocénicas.

Para explicar la génesis del vulcanismo silíceo, predominantemente ignimbrítico de la SMOc, se ha propuesto dos procesos contrastantes; cristalización fraccionada a partir de magmas primarios derivados de fusión parcial en el manto, con escasa o nula participación cortical (Cameron et al., 1980), y fusión parcial cortical con restringida participación de magma máfico mantélico (Verma, 1984;

Ruiz et al., 1988a). Por otra parte, la aceptación limitada de fusión de la corteza (<25%) en quienes proponen preponderancia mantélica (Cameron et al.,1986), y quienes proponen un origen cortical (Ruiz et al., 1988b), pero requieren explicar el flujo de calor que requeriría un proceso de fusión parcial tan voluminoso de la corteza inferior sin una fuerte participación de fundidos mantélicos, ha planteado la necesidad de un modelo que involucre ambos extremos. Lipman y Bachmann (2015) propusieron un modelo para formar cámaras magmáticas silíceas y vulcanismo asociado (calderas, ignimbritas, domos) en tres etapas; la primera donde el magma basáltico de origen mantélico donde asimila parte de la corteza inferior y, estacionado entre los 30 a 45 km de profundidad, genera un primer proceso de cristalización fraccionada formando un *mush*, básico; después asciende y se estaciona a profundidades medias de la corteza entre 15 y 25 Km, desarrollando otro *mush* de composición tonalítico-granodiorítico; y, finalmente asciende y se estaciona a profundidades entre 7 y 15 km, donde evoluciona a composiciones granodiorita-granito, que finalmente alimenta el vulcanismo félsico. En esta última fase, la segregación de gases, enriquecimiento en líquidos (H₂O principalmente, y halógenos como F y Cl) pueden inducir la expulsión de líquido riolítico de alto sílice (>75% de SiO₂) para formar depósitos de flujo piroclástico masivos o ignimbritas y/o lavas riolíticas. Esta secuencia de eventos que implica tal modelo pudiera aplicarse al vulcanismo del Eoceno con un proceso de extensión presente en LMVC.

Además, en conjunto con los anteriores productos, diagrama de discriminación tectónica multi-dimensional han sido utilizados para inferir el ambiente tectónico de las rocas félsicas del LMVC. Se propone un diagrama multidimensional aplicable a rocas félsicas (Verma et al., 2013) para conocer el ambiente tectónico correspondiente a las rocas volcánicas del área de estudio. Este diagrama se encuentra basado en relaciones de elementos mayores con elementos traza. En la Figura 32, la mayoría de las muestras caen en campo tectónico de rift continental.

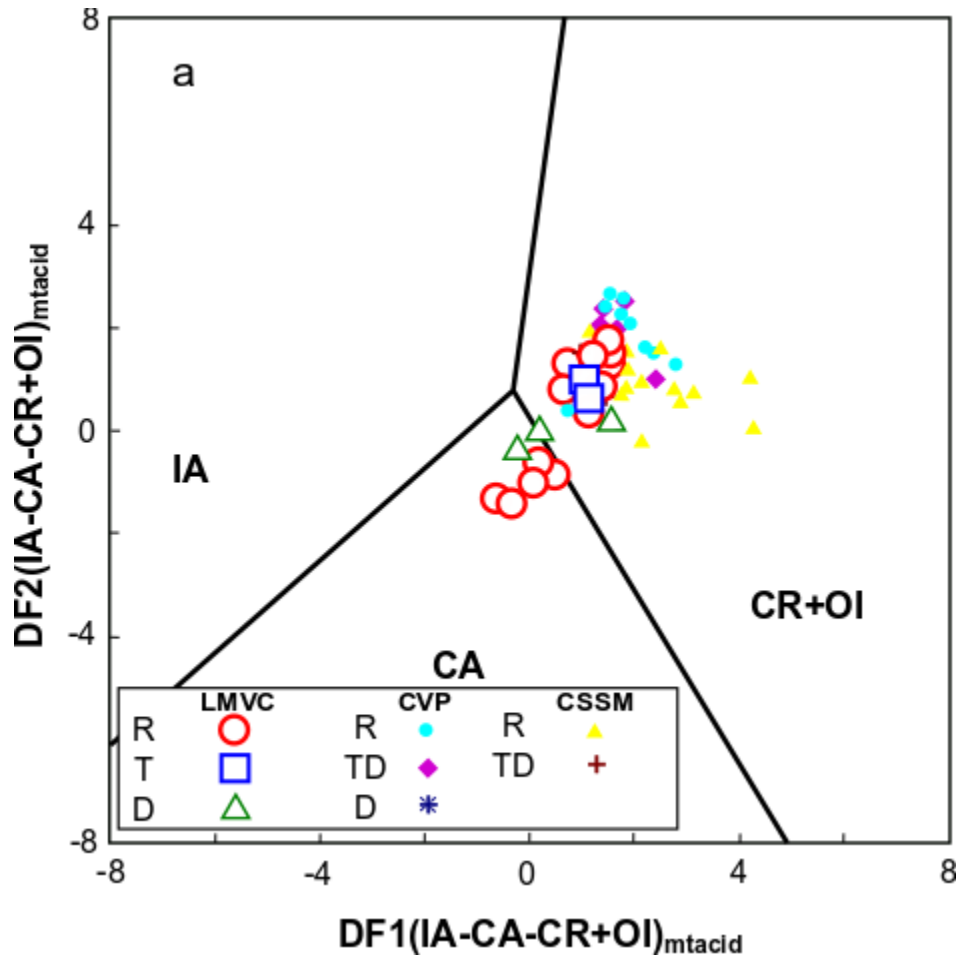


Figura 32. Diagrama de discriminación tectónica multidimensional (Verma et al., 2013) aplicadas para las rocas de LMVC, CVP y CSSM. Abreviaciones: LMVC– La Mesa Virgen Calerilla, CVP–Complejo Volcánico Pinos, CSSM–Complejo Sierra San Miguelito, R–riolita, T–traquita, D–dacita, TD–traquidacita, IA–Arco de Isla, CA–Arco-Continental, CR–Continental Rift y OI–Isla de Océanico.

De acuerdo con los resultados en las anteriores secciones las muestras presentan un comportamiento de ambiente extensional, las rocas analizadas bajo el diagrama de discriminación tectónica muestran la afinidad de las muestras ácidas de LMVC hacia las áreas de CR+OI y CA. Al mismo tiempo, no se puede descartar la contaminación de la corteza, que afecta a las muestras que se trazan en los otros campos. Aun así, el mayor porcentaje de las muestras se trazan en el campo dentro de la placa. La distribución en los campos de estos diagramas de discriminación tectónica sugiere que el vulcanismo félsico en esta región ocurrió en un ambiente de transición entre los últimos pulsos de convergencia de colisión de la Placa

Farallón y el inicio de un ambiente extensional. En este escenario, las rocas volcánicas félsicas de Zacatecas se pueden considerar como asociadas a un arreglo del manto interpretándose como resultado de magmas que proviene de una fusión parcial de un manto empobrecido, y un aporte, por fusión e incorporación de material de corteza continental.

Verma (1984) realiza un estudio de muestras colectada de las rocas volcánicas félsicas del Terciario Medio de esta área y concluye que los magmas derivados de un fraccionamiento del manto están ligeramente empobrecidos y se mezclan con proporciones considerables de la corteza continental media/superior. Este modelo también es compatible con el generado por análisis de elementos trazas y los datos isotópicos de Sr publicados de otras áreas de la SMOc.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIÓN

La Mesa Virgen-Calcerilla (LMVC), se localiza en el sur de la ciudad de Zacatecas. El conjunto de rocas de LMVC muestran una composición de roca ácida siendo las unidades clasificadas como traquitas, dacitas y riolitas. El emplazamiento y formación de estas rocas fue a partir de la guía de las fallas regionales con direcciones predominantes NE-SO y N-S, a su vez, estas estructuras representan las fuentes alimentadoras para los domos riolíticos y el ascenso del magma.

El basamento de la región se encuentra compuesto por metasedimentos los cuales conforman la base de la columna estratigráfica y muestran una edad Mesozoica. Después de esta unidad de basamento se observa a la unidad del Conglomerado Rojo de Zacatecas (CRZ) de una edad Paleoceno-Eoceno. En seguida se presenta una discordancia que sobreyace al CRZ y se comienza el reconocimiento de las unidades ácidas con edades de Oligoceno-Eoceno. Estas unidades ácidas se aprecian como secuencias de ignimbritas que van de características estratificadas a masivas, ricas en líticos e intrusionadas por diques de composición riolítica en la zona, con dirección N-S y NE-SO.

El análisis petrográfico de las rocas de LMVC revela: (a) texturas porfídica y porfídica vítrea; (b) matriz es microcristalina de cuarzo para las muestras, presentan fenocristales subhedrales a euhedrales de plagioclasa y feldespatos; (c) algunas presentan un acomodo fluidal en sus cristales; (d) a su vez, se observa un ensamblaje mineral general de feldespato potásico (Kfsp), plagioclasa (Plg), biotita (Bt), cuarzo (Qz) y minerales opacos (Op).

A su vez, se observa que las rocas volcánicas de la zona NE de LMVC (Figura 12) se encuentra mucho más alterada que la de las muestras de la zona SO, una prueba de esto se refleja en la presencia de sericita en las muestras. El grupo de las traquitas en petrografía presenta mayor alteración en comparación con los otros dos grupos de rocas.

El diagrama TAS muestra que las rocas de LMVC se abarcan el campo de las riolitas, traquitas y dacitas. Los patrones de lantánidos normalizados a condrita muestran un enriquecimiento en tierras raras ligeras con una anomalía negativa en Eu, lo cual indica un fraccionamiento de plagioclasas que es más marcado en las riolitas y continúa con una tendencia a la horizontal en tierras raras pesadas. Las muestras del grupo de riolitas mantienen una relación más estrecha con los feldespatos, lo que se aprecia en las anomalías de Eu negativas.

En general, el claro patrón de los diagramas multielementos normalizados a manto primitivo presentan un enriquecimiento en elementos traza incompatibles y un descenso en elementos compatibles. A su vez, se observan anomalías en Ba, P, Sr, Ti. La anomalía más pronunciada para los tres grupos es con respecto al elemento P.

La alteración de las rocas se observa que ha sido post-emplazamiento puesto que en los análisis geoquímicos las muestras se comportaron en valores fuera de alteración ($LOI < 3\%$). Para comprobar esto se realizaron diagramas basados en Zr en relación con los elementos traza Nb, Hf, Cs y Sm, los cuales muestran un patrón limpio de alteración.

Los diagramas Nb/Yb vs Th/Yb, $(Gd/Yb)_{PM}$ vs Eu/Eu* y Th/Yb vs Nb/Ta indican que las rocas félsicas derivan desde la corteza media superior. El diagrama de variación Ce-Ce/Yb y La-La/Yb presenta como las muestras siguen una tendencia hacia distintos grados de fusión parcial, en lugar de procesos de cristalización fraccionada. Mientras que el modelado cuantitativo de fusión parcial para las rocas de LMVC revelan que estas se generaron en niveles de la corteza media principalmente con grados de fusión del ~5-15%. El modelo tectono-térmico y diagrama multidimensional de discriminación tectónica indica un ambiente extensional para la generación de las rocas félsicas de LMVC.

REFERENCIAS

- Aguillón-Robles, A., Aranda-Gómez, J.J., Solorio Munguía, J.G., 1994. Geología y tectónica de un conjunto de domos riolíticos del Oligoceno medio en el sur del Estado de San Luis Potosí, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 11, 29–42.
- Aguillón-Robles, A., Tristán-González, M., Aguirre-Díaz, G.J., López-Doncel, R.A., Bellon, H., Martínez-Esparza, G., 2014. Eocene to Quaternary mafic-intermediate volcanism in San Luis Potosí, central Mexico: the transition from Farallon plate subduction to intra-plate continental magmatism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 276, 152–172.
- Aguirre-Díaz, G.J., McDowell, F.W., 1993. Nature and timing of faulting and synextensional magmatism in the southern Basin and Range, central-eastern Durango, Mexico: *Geological Society of America Bulletin* 105, 1435–1444.
- Aguirre-Díaz, G. J., Labarthe-Hernández, G., 2003, Fissure ignimbrites: fissure-source origin for voluminous ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and its relationship with Basin and Range faulting: *Geology* 31, 773–776.
- Allegre, C.J., Minster, J.F., 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes. *Earth Planetary Science Letter* 38, 1–25.
- Aranda-Gómez, J.J., Christopher D.H., Luhr, J. F., 2000. Evolución tectonomagmática post-paleocénica de la Sierra Madre Occidental y de la porción meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras, México. *Sociedad Geológica Mexicana Ull*, 59–71.
- Aranda-Gómez, J.J., Molina-Garza, Roberto., McDowell, F.W., Vassallo-Morales, L.F., Ortega-Rivera, M.A., Solorio-Munguía, J.G., Aguillón-Robles, A., 2007. Las relaciones entre el volcanismo y la extensión en la Mesa Central: el caso de Pinos, Zacatecas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 24, 216–233.
- Barboza-Gudiño, J.R., 2012. Sedimentary Tectonics and Stratigraphy: The Early Mesozoic Record in Central to Northeastern Mexico. Stratigraphic analysis of layered deposits: Rijeka, Croacia, InTech, 255–278.
- Burckhardt, C., 1906. Sobre el descubrimiento del triás marino en Zacatecas: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 2, 43–45.
- Cameron, M., Bagby, W. C., Cameron, K. L., 1980. Petrogenesis of voluminous mid-Tertiary ignimbrites of the Sierra Madre Occidental. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 74, 271–284.
- Carrillo-Bravo, J., 1982. Exploración Petrolera de la Cuenca Mesozoica del Centro de México. *Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros* 34, 21–46.
- Centeno-García, E., Silva-Romo, G., 1997. Petrogenesis and tectonic evolution of central Mexico during Triassic-Jurassic time. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 14, 244–260.
- Consejo de Recursos Minerales, 1991. Monografía geológico-minera del estado de Zacatecas. SEMIP Publicación M-2e. 154 p.
- Consejo de Recursos Minerales (CRM), 1997. Carta geológico-minera Zacatecas F13-6. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. 1 hoja.
- De Cerna, Z., 1976. Geology of the Fresnillo area, Zacatecas, Mexico. *Geological Society of America Bulletin* 87, 1191–1199.

- Escalona Alcázar, F.J., 2010. Ambiente tectónico y deformación del complejo volcanosedimentario Mesozoico de la Sierra de Zacatecas, México, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ciencias de la Tierra en Geología, Tesis doctoral, 239.
- Escalona Alcázar, F.J., Suárez Plascencia, C., Pérez-Román, A.M., Ortiz-Acevedo, O., Bañuelos-Álvarez, C., 2003. La secuencia volcánica terciaria del cerro la virgen y los procesos geomorfológicos que general riesgo en la zona conurbada Zacatecas-Guadalupe. *GEOS* 23, 2–16.
- Escalona Alcázar, F.J., Delgado-Argote, L.A., Weber, B., Núñez-Peña, E.P., Valencia, V.A., Ortiz-Acevedo, O., 2009. Kinematics and U-Pb dating of detrital zircons from the Sierra de Zacatecas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 26, 48–64.
- Escalona-Alcázar, F.J., Solari, L., García y Barragán, J.C., Carrillo-Castillo, C., Bluhm-Gutiérrez, J., García-Sandoval, P., Nieto-Samaniego, A.F., Núñez-Peña, E.P., 2016. The Palaeocene early Oligocene Zacatecas conglomerate, Mexico: sedimentology, detrital zircon U-Pb ages, and sandstone provenance. *International Geology Review* 58, 826–848.
- Ferrari, L., López-Martínez, M., and Rosas-Elguera, J., 2002. Ignimbrite flare up and deformation in the southern Sierra Madre Occidental, western Mexico: Implications for the late subduction history of the Farallon plate. *Tectonics* 21, 17–1–17–24.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S., 2005. Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margenoccidental de Norteamérica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 57, 343–378.
- Henry, C. D., Fredrikson, G., 1987. Geology of part of southern Sinaloa, Mexico, adjacent to the Gulf of California: Geological Society of America, Maps and Chart serie, MCH 063, 1 sheet, 14 p.
- Henry, C. D., Aranda-Gómez, J. J., 1992. The real southern Basin and Range: mid-to late Cenozoic extension in Mexico. *Geology* 20, 701–704.
- Hoppe, M., Barboza-Gudino, J.R., Schulz, H.M., 2002. Late Triassic submarine fan deposits in northwestern San Luis Potosí, Mexico-lithology, facies and diagenesis. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Monatshefte* 12, 705–724.
- Kearey, P., Kepeis, K., Vine, F.J., 2009. *Global Tectonics*. Wiley-Blackwell, Third Edition, 496p.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., Aranda-Gómez, J.J., 1982. Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del estado de San Luis Potosí. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico 85, 208 p.
- Lang, B., Steinitz, G., Sawkins, F. J., Simmons, S. F., 1988. K-Ar Age studies in the Fresnillo Silver District, Zacatecas, Mexico: *Economic Geology* 83, 1642–1646.
- Le Bas, M.J., Maitre, R.W.L., Streickensen, A., Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology* 27, 745–750.
- Lipman, P.W., Bachmann, O., 2015. Ignimbrites to batholiths: Integrating perspectives from geological, geophysical, and geochronological data. *Geosphere* 11, 705–743.
- López-García, L.D., 2010. *Geología del Complejo Volcánico de Charcas: San Luis Potosí, México: San Luis Potosí, México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, trabajo recepcional, 107 p.*
- Loza-Aguirre, I., Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S.A., Iriando, A., 2008. Relaciones estratigráfico-estructurales en la intersección del sistema de fallas San Luis-Tepehuanes

y el graben de Aguascalientes, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25, 533–548.

- McDonough, W.F., Sun, S.S., 1995. The composition of the earth. *Chemical Geology* 120, 223–253.
- McDowell, F.W., Keizer, R.P., 1977. Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango City and Mazatlan, Mexico. *Geological Society of America Bulletin* 88, 1479–1487.
- McDowell F.W., Clabaugh S. E., 1979. Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western Mexico, *Geological Society of America, Special Paper* 180, 113–124.
- McGehee, R.V., 1976. Las rocas metamórficas del arroyo de La Pimienta Zacatecas, Zacatecas. *Boletín de la sociedad Geológica Mexicana* 37, 1–10.
- Middlemost, E.A.K., 1989. Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chemical Geology* 77, 19–26.
- Monod, O., Calvet, P., 1992. Structural and stratigraphic re-interpretation of the Triassic units near Zacatecas (Zac.), Central Mexico: Evidence of a Laramide nappe pile. *Zentralblatt für Geologie und Palaöntologie Teil 6*, 1533–1544.
- Nájera-Garza, J., 1997. Study on the origin and geologic and metallogenetic significance of the Zacatecas red conglomerate, Zacatecas, Mexico, en *II Convención sobre la Evolución Geológica de México*, Pachuca, Hidalgo, México, 47.
- Nieto-Obregón, J., Delgado-Argote, L., Damon, P. E., 1981. Relaciones petrológicas y geocronológicas del magmatismo de la Sierra Madre Occidental el Eje Neovolcánico en Nayarit, Jalisco y Zacatecas: *Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Memoria Técnica*, XIV, 327-361.
- Nieto-Samaniego, A.F., Ferrari, L., Alaniz-Hernández, S.A., Labarthe-Hernández, G., Rosas-Elguera, J., 1999. Variation of Cenozoic extensión and volcanism across the southern Sierra Madre Occidental volcanic providence, Mexico, *Geological Society of America Bulletin* 111, 347–363.
- Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., Camprubí Cano, A., 2005. La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana TOMO LVII*, 285–318.
- Norton, I., 1995. Plate motions in the North Pacific: The 43 Ma nonevent. *Tectonics* 14, 1080–1094.
- Orozco-Esquivel, M.T., Nieto-Samaniego, Á.F., and Alaniz-Álvarez, S.A., 2002. Origin of rhyolitic lavas in the Mesa Central, Mexico, by crustal melting related to extension: *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 118, 37–56.
- Ortiz-Hernández, L.E., Chiodi, M., Lapiere, H., Monod, O., Calvet, P., 1992. El arco intraoceánico alóctono (Cretácico inferior) de Guanajuato—características petrográficas, geoquímicas, estructurales e isotópicas del complejo filoniano y de las lavas basálticas asociadas; implicaciones geodinámicas. *Revista Instituto Geología UNAM* 9, 126–145.
- Pearce, J.A., van der Laan, S.R., Arculus, R.J., Murton, B.J., Ishii, T., Peate, D.W., Parkinson, I.J., 1992. Boninite and harzburgite from Leg 125 (Bonin–Mariana forearc): a case study of

magma genesis during the initial stages of subduction. Proceeding Ocean Drilling Program Scientific Results 623–659.

- Pearce, J.A., 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos* 100, 14–48.
- Pérez, M. J. J., Mapez, V. E., Pesquera, V. R., 1961. Bosquejo geológico del Distrito Minero de Zacatecas. México, D.F.
- Ponce, B.F., Clark, K.F., 1988. The Zacatecas Mining District: A tertiary caldera complex associated with precious and base metal mineralization: *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists* 83, 1668–1682.
- Rodríguez-Ríos, R., Aguillón-Robles, A., Leroy, J.L., 2007. Evolución petrológica y geoquímica de un complejo de domos topacíferos en el Campo Volcánico de San Luis Potosí (México). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 24, 328–343.
- Rollinson, H. R., 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. New York, United States: Longman Scientific & Technical.
- Rudnick, R.L., Gao, S., 2003. Composition of the continental crust. *Treatise Geochemistry* 3, 659.
- Ruiz, J., Patchett, P. J., Arculus, R. J., 1988a. Nd-Sr isotope composition of lower crustal xenoliths - Evidence for the origin of mid-tertiary felsic volcanics in Mexico. *Contributions to mineralogy and petrology* 99, 36–43.
- Ruiz J., Patchett, P. J., Ortega-Gutiérrez, F., 1988b. Proterozoic and Phanerozoic basement terranes of Mexico from Nd isotopic studies: *Geological Society of America Bulletin* 100, 274–281.
- Santisteban, J. I., Mediavilla, R., López-Pamo, E., J. Dabrio, C., Ruiz Zapata, M. B., Gil García, M.J., Castaño, S., Martínez Alfaro, P.E., 2004. Loss on ignition: a qualitative or quantitative method for organic matter and carbonate mineral content in sediments. *Journal of Paleolimnology* 32, 287–299.
- Torres-Hernández, J.M., 2009. Origen y emplazamiento de las ignimbritas Cantera y Panalillo del Campo Volcánico de San Luis Potosí: Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de La Tierra, tesis doctoral, 204 p.
- Torres-Sánchez, D., Verma, S.K., Verma, S.P., Velasco-Tapia, F., Torres-Hernández, J.R., 2019. Petrogenetic and tectonic implications of Oligocene-Miocene volcanic rocks from the Sierra de San Miguelito complex, central Mexico. *Journal of South American Earth Sciences* 95, 102311.
- Tristán-González, M., 1986. *Estratigrafía y tectónica del graben de Villa de Reyes en los estados de San Luis Potosí y Guanajuato, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico* 107, 91.
- Tristán-González, M., Aguillón-Robles, A., Barboza-Gudiño, J.R., Torres-Hernández, J. R., Bellón, H., López-Doncel, R., Rodríguez Ríos, R., Labarthe-Hernández, G., 2009. Geocronología y distribución espacial del vulcanismo en el Campo Volcánico de San Luis Potosí, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 61, 287–303
- Tristán-González, M., Aguillón-Robles, A., Barboza-Gudiño, J.R., Cruz-Márquez, J.R., García-Arreola, J., Bellon, H. M.E., Franzetti, M., Labarthe-Hernández, G., 2015. Características geoquímicas y significado tectónico del complejo de diques y domos félsicos del Paleoceno-

Eoceno de La Tesorera, Zacatecas, en la Mesa Central, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas* 32, 455–474.

- Tristán-González, M., Aguillón-Robles, A., Torres-Hernández, J. R., Labarthe-Hernández, Guillermo., Yza-Guzmán, R., 2012. Control estructural para el emplazamiento de vetas y domos félsicos en el distrito minero de Zacatecas, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 64, 353–367.
- Velasco-Tapia, F., 2017. Volcanic ash-beds of the upper Cretaceous San Felipe formation, Sierra Madre Oriental (Northeastern Mexico): provenance and petrogenesis based on conventional and statistical tools applied to geochemical data. In: Veress, B., Szigethy, J. (Eds.), *Horizons in Earth Science Research* 16. Nova Publishers Inc., pp. 67–99.
- Verma, S.K., Martínez-Torres, E.M., Malviya, V.P., Torres-Hernández, J.M., Torres-Sánchez, D., Rivera-Escoto, B.A., Mehta, P., 2019. Geochemistry of Mesozoic volcanic rocks from the Fresnillo area (Chilitos Formation), Zacatecas, Mexico: Implications for the magma source and tectonic setting. *Journal of South American Earth Sciences* 96, 102351.
- Verma, S.P., 1984. Sr and Nd isotopic evidence for petrogenesis of Mid-Tertiary felsic volcanism in the mineral district of Zacatecas, Zac (Sierra Madre Occidental), México. *Isotope Geoscience* 2, 37–53.
- Verma S.P., Sotelo-Rodríguez Z.T., Torres-Alvarado I.S., 2002. SINCLAS: Standard Igneous Norm and Volcanic Rock Classification System. *Computers and Geosciences* 28, 711–715.
- Verma, S.P., Rivera-Gómez, M.A., 2013. Computer programs for the classification and nomenclature of igneous rocks. *Episodes* 36, 115–124.
- Verma, S.P., Pandarinath, K., Verma, S. K., Agrawal, S., 2013. Fifteen new discriminant-function-based multi-dimensional robust diagrams for acid rocks and their application to Precambrian rocks. *Lithos* 168–169, 113–123.
- Verma, S.P., Verma, S.K., Rivera-Gómez, M.A., Torres-Sánchez, D., Díaz-González, L., Amezcua-Valdez, A., Rivera-Escoto, B.A., Rosales-Rivera, M., Armstrong-Altrin, J.S., López-Loera, H., Velasco-Tapia, F., Pandarinath, K., 2018. Statistically coherent calibration of X-ray fluorescence spectrometry for major elements in rocks and minerals. *Journal of Spectroscopy* ID 5837214, 1–13.
- Wang, T., Wang, Z., Yana, Z., Ma, Z., He, S., Fua, C., Wang, D., 2016. Geochronological and geochemical evidence of amphibolite from the Hualong Group, northwest China: implication for the early Paleozoic accretionary tectonics of the Central Qilian belt. *Lithos* 248–251, 12–21.
- Ward, P. L., 1995. Subduction cycles under western North America during the Mesozoic and Cenozoic eras, en Miller, D. M., Busby, C. (eds.), *Jurassic Magmatism and Tectonics of the North American Cordillera: Geological Society of America Special Paper* 299, 1–45.
- Webber, K. L., Fernández, L. A., Simmons, W. B., 1994. Geochemistry and mineralogy of the Eocene-Oligocene volcanic sequence, southern Sierra Madre Occidental, Juchipila, Zacatecas, Mexico: *Geofísica Internacional* 33, 77–89.
- Yta, M., 1992. Etude géodynamique et métallogénique d'un secteur de la "Faja de Plata", Mexique: la zone de Zacatecas–Francisco I. Madero – Saucito: Orleáns, Fr., Université d'Orleans, tesis doctoral, 287 pp.
- Zamora-Vega, O., Richards, J. P., Spellc, T., Dufrane, S. A., Williamson, J., 2018. Multiple mineralization events in the Zacatecas Ag-Pb-Zn-Cu-Au district, and their relationship to the

tectonomagmatic evolution of the Mesa Central, Mexico. *Ore Geology Reviews* 102, 519–561.

Zou, H., 2007. *Quantitative Geochemistry*. Imperial College Press, London.

ANEXOS

Tabla A1. Regresión (x-y): parámetro de concentración-intensidad corregidos por matriz (IntCorr-Conc).

Elemento	Regresión		Números de pares de datos calibrados	Interceptar (b)	Parámetros de ecuación de regresión				Calidad de regresión ecuación		
	Variables x-y	Modelo			se _b	u _b	slope (m)	se _m	u _m	r	R ²
SiO ₂	IntCorr-Conc	OLR	60	10.8541	1.6762	4.4641	0.1452	0.0055	0.0146	0.96105	0.92362
	IntCorr-Conc	UWLR	60	-0.0148	0.9765	2.6006	0.1848	0.0032	0.0085	0.99157	0.98321
TiO ₂	IntCorr-Conc	OLR	60	0.0344	0.0220	0.0587	0.0736	0.0016	0.0043	0.98644	0.97307
	IntCorr-Conc	UWLR	60	0.0020	0.0204	0.0542	0.0801	0.0015	0.0040	0.99114	0.98235
Al ₂ O ₃	IntCorr-Conc	OLR	60	-0.1675	0.6763	1.8011	0.1514	0.0056	0.0150	0.96267	0.92615
	IntCorr-Conc	UWLR	60	-0.0070	0.4419	1.1769	0.1397	0.0037	0.0098	0.98557	0.97135
Fe ₂ O ₃ [†]	IntCorr-Conc	OLR	60	-2.0576	0.5960	1.5873	0.2160	0.0066	0.0175	0.97419	0.94904
	IntCorr-Conc	UWLR	60	-0.0092	0.5458	1.4536	1.1772	0.0060	0.0160	0.98112	0.96259
MnO	IntCorr-Conc	OLR	60	-0.0412	0.0067	0.0178	0.0214	0.0003	0.0009	0.99348	0.98700
	IntCorr-Conc	UWLR	60	0.0001	0.0134	0.0356	0.0165	0.0007	0.0017	0.99160	0.98328
MgO	IntCorr-Conc	OLR	60	-0.0977	0.2748	0.7319	0.2618	0.0064	0.0170	0.98317	0.96662
	IntCorr-Conc	UWLR	60	-0.0014	0.2692	0.7168	0.2376	0.0063	0.0167	0.98745	0.97505
CaO	IntCorr-Conc	OLR	60	1.0561	0.2173	0.5789	0.0631	0.0014	0.0037	0.98643	0.97304
	IntCorr-Conc	UWLR	60	0.0064	0.4616	1.2293	0.0853	0.0029	0.0078	0.98657	0.97331
Na ₂ O	IntCorr-Conc	OLR	60	0.0447	0.0567	0.1511	0.3624	0.0077	0.0205	0.98716	0.97449
	IntCorr-Conc	UWLR	60	0.0054	0.0421	0.1122	0.3558	0.0057	0.0152	0.99345	0.98693
K ₂ O	IntCorr-Conc	OLR	60	-0.0720	0.0430	0.1146	0.0719	0.0007	0.0020	0.99691	0.99383
	IntCorr-Conc	UWLR	60	0.0082	0.0391	0.1042	0.0687	0.0007	0.0018	0.99793	0.99587
P ₂ O ₅	IntCorr-Conc	OLR	60	0.0537	0.0128	0.0341	0.0241	0.0008	0.0021	0.96972	0.94035
	IntCorr-Conc	UWLR	60	0.0010	0.00202	0.0538	0.0320	0.0013	0.0033	0.96929	0.93952

Tabla A2. Análisis y rangos (PPM) del análisis ICP-MS. Valores tomados de “Whole Rock Analysis y Litogeoquímica”

Código	Análisis y rangos (ppm)		Análisis y rangos (ppm)		Descripción
ME-MS81	Ba	0.5-10,000	Sm	0.03-1,000	Cuenta fusionada, ácido digestión y ICP-MS
	Ce	0.1-10,000	Sn	1-10,000	Cuenta fusionada, ácido digestión e ICP-MS
	Cr	10-10,000	Sr	0.1-10,000	Cuenta fusionada, ácido digestión e ICP-MS
	Cs	0.01-10,000	Ta	0.1-2,500	Cuenta fusionada, ácido digestión e ICP-MS
	Dy	0.05-10,000	Tb	0.01-1,000	Cuenta fusionada, ácido digestión e ICP-MS
	Er	0.05-1,000	Th	0.05-1,000	Cuenta fusionada, ácido digestión e ICP-MS
	Eu	0.02-1,000	Tm	0.01-1,000	Cuenta fusionada, ácido digestión e ICP-MS
	Ga	01-1,000	U	0.05-1,000	Cuenta fusionada, ácido digestión e ICP-MS
	Gd	0.05-1,000	V	5-10,000	Cuenta fusionada, ácido digestión e ICP-MS
	Hf	0.1-10,000	W	1-10,000	Cuenta fusionada, ácido digestión e ICP-MS
	Ho	0.01-1,000	Y	0.1-10,000	Cuenta fusionada, ácido digestión e ICP-MS
	La	0.1-10,000	YB	0.03-1,000	Cuenta fusionada, ácido digestión e ICP-MS
	Lu	0.01-1,000	Zr	2-10,000	Cuenta fusionada, ácido digestión e ICP-MS
	Nb	0.1-2,500			Cuenta fusionada, ácido digestión e ICP-MS
	Nd	0.1-10,00			Cuenta fusionada, ácido digestión e ICP-MS
	Pr	0.02-1,000			Cuenta fusionada, ácido digestión e ICP-MS
Rb	0.2-10,000			Cuenta fusionada, ácido digestión e ICP-MS	

Fotomicrografías

Clave	A1: Zac-01; A2: Zac-04
Tipos de roca	Traquita
Coordenadas	13Q 749246 2517008
Textura	Porfídica
Matriz	Microcristalina de cuarzo

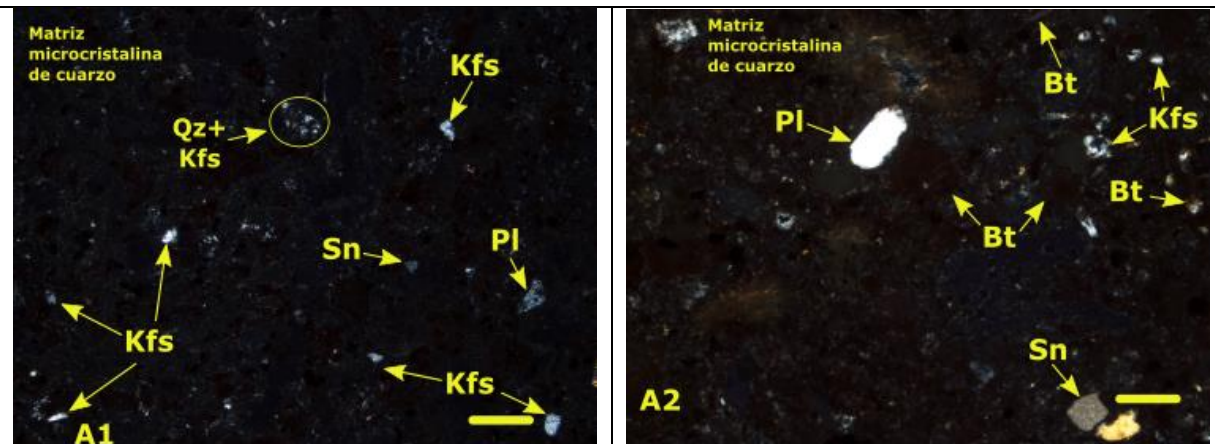


Figura A1) Microfotografías de las muestras traquitas, utilizando el objetivo objetivo 4.0/0.10X en nicoles cruzados (NX). La línea color amarillo en la parte inferior derecha representa 1cm de escala. La microfotografía del lado izquierdo corresponde a la muestra ZAC-11 y la derecha a la muestra ZAC-12.

Clave	A3: Zac-11; A4: Zac-12
Tipos de roca	Dacita
Coordenadas	13Q 742439 251340
Textura	Porfídica
Matriz	Microcristalina de cuarzo

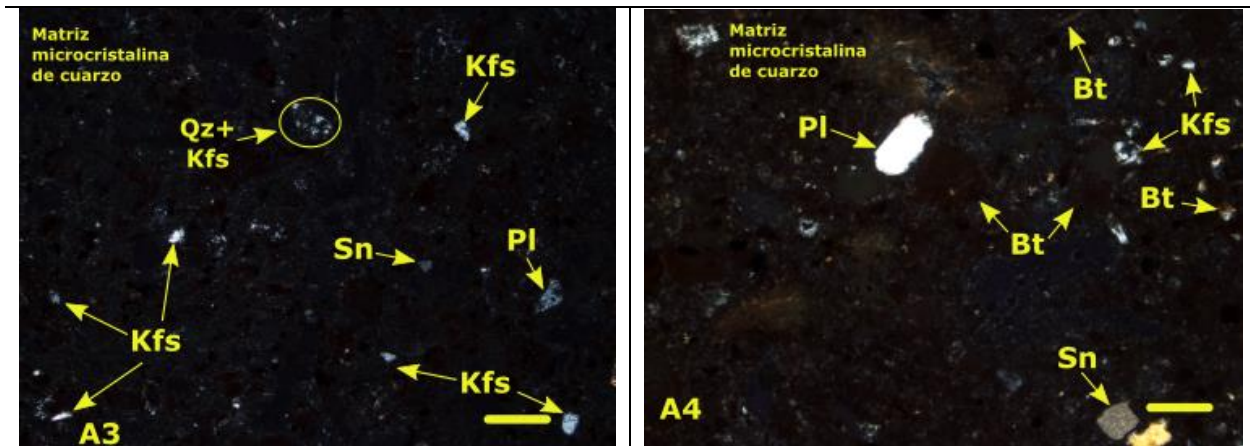


Figura A2) Microfotografías de las muestras dacitas, utilizando el objetivo objetivo 4.0/0.10X en nicoles cruzados (NX). La línea color amarillo en la parte inferior derecha representa 1cm de escala. La microfotografía del lado izquierdo corresponde a la muestra ZAC-11 y la derecha a la muestra ZAC-12.

Clave	A5: Zac-08; A6: Zac-10; A7: ZAC-15; A8: ZAC-18
Tipos de roca	Riolita
Coordenadas	13Q 749972 2516444 13Q 742499 2513349 13Q 742631 2512953
Textura	Porfídica
Matriz	Microcristalina de cuarzo

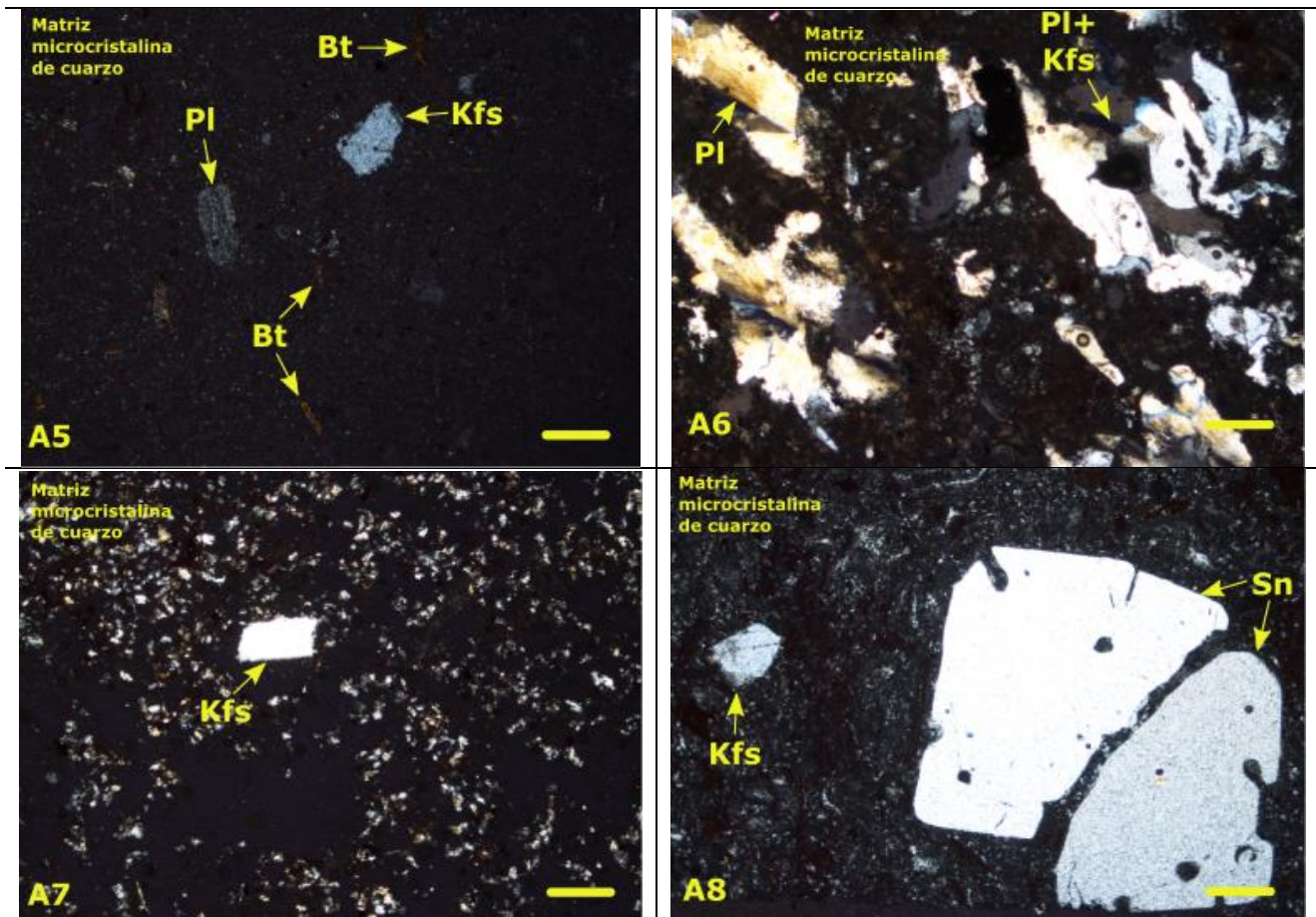


Figura A3) Microfotografías de las muestras riolitas, utilizando el objetivo objetivo 4.0/0.10X en nicoles cruzados (NX). La línea color amarillo en la parte inferior derecha representa 1cm de escala. Las microfotografías superiores corresponden a las muestras ZAC-08 y ZAC-10, las muestras inferiores corresponden a las muestras ZAC-15 y ZA-18.