



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

CALDERA DE AMAZCALA, QUERÉTARO:
INTERPRETACIÓN DE LAS TENDENCIAS GEOQUÍMICAS
DE UN EVENTO HIPERALCALINO EN EL CINTURÓN
VOLCÁNICO MEXICANO, Y COMPARACIÓN
CON CENTROS HIPERALCALINOS
SIMILARES EN EL MUNDO.

T E S I S

QUE PARA OBTAR POR EL GRADO DE:

Licenciada en Ciencias de la Tierra
con orientación en Tierra Sólida

PRESENTA:

Yessica Viridiana Carrasco Vega

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Gerardo de Jesús Aguirre Díaz

Ciudad Universitaria, CDMX, 2023





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

*A mi madre, Rossy, que es todo para
mí y mi pilar más grande. Por ti soy
lo que soy y seré*

*A mi hermana, Andy, por entenderme
y quererme como lo hace*

Eternamente, a Alex

A mi más fiel compañera, a Yuyi

AGRADECIMIENTOS

Antes que nada, me gustaría agradecer profundamente a mi tutor, el Dr. Gerardo de Jesús Aguirre Díaz, por ser un gran mentor en este proyecto, por todo su apoyo, dedicación, paciencia y, sobre todo, por sus sabios consejos.

Agradezco a la DGAPA-UNAM por la beca otorgada a través del proyecto PAPIME PE102822, y el apoyo financiero del proyecto PAPIIT IN108621.

A mis sinodales, la Dra. Lizeth Caballero y los Drs. José Luis Arce, Raymundo Martínez y Sergio Rodríguez por sus valiosos consejos y comentarios.

Gracias al Ing. Juan Tomás Vázquez, técnico encargado del taller de Laminación del centro de Geociencias, por todos sus consejos y ayuda en la realización de las láminas delgadas; así mismo, al Dr. Carlos Ortega del Laboratorio de Estudios Isotópicos del Centro de Geociencias de la UNAM por su colaboración en el fechamiento U-Pb de la muestra

Quiero agradecer a todas aquellas personas que se han cruzado en mi camino y me han apoyado, en especial a Néstor Cano, por todas sus enseñanzas y consejos, fuiste un ángel en mi vida.

A toda mi familia, por tenerme paciencia y nunca dudar de mí, especialmente a mi mamá, que siempre luchó y sacrificó muchas cosas para que siguiera mis sueños, nada de esto hubiera sido posible sin ti.

A mis amigas, las de toda la vida y las que conocí estos últimos años, gracias infinitas, por todos sus consejos, su amistad, su apoyo incondicional y todas esas tardes hablando de la vida en los pastos de la Facultad de Ciencias, tengan por seguro que siempre llevare esos recuerdos en mi corazón.

A Maru, mi gran amiga y ahora hermana, gracias por tanto, por nunca me dejaste sola, cuando no podía más siempre me recordabas lo importante que esto era para mí y todo lo que era capaz de hacer.

Finalmente, pero no menos importante quiero agradecer a Alex, la persona más especial en mi vida, gracias por toda la ayuda y motivación durante todo este tiempo, por siempre creer en mí y nunca dejar que me rindiera cuando pensé que ya no podía más.

RESUMEN

La Caldera de Amazcala se localiza a 30 km al NE de la ciudad de Querétaro, México. Ubicada a 480 km de la Trinchera Mesoamericana es la caldera más septentrional del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM). Su extensión abarca una geozona del proyecto Geoparque Mundial UNESCO Triángulo Sagrado. Estuvo activa de 7.3 a 6.6 Ma, siendo la caldera más antigua reportada del CVM. Tiene un diámetro de 11x14 km. Las unidades litoestratigráficas pre-caldera incluyen ignimbritas y domos riolíticos oligocenos de la provincia Sierra Madre Occidental y domos dacítico-riolítico del Mioceno medio en la periferia de la caldera. Las unidades asociadas a la caldera incluyen la pómez Ezequiel Montes, ignimbrita Colón, domos del anillo y domos intracaldera. Las unidades post-caldera incluyen lavas de andesitas básicas de volcanes de la periferia de 5.6-4.0 Ma. Todos los productos de la caldera son de composición riolítica hiperalcalina, específicamente comenditas, y, por lo tanto, anómalos a un ambiente tectónico de subducción de margen continental. La base de datos compilada en este estudio, y los patrones geoquímicos de estos datos en gráficas de clasificación y tendencias, muestran que las comenditas de Amazcala son comparables a comenditas de otras calderas en el mundo ubicadas en diferentes regímenes tectónicos, en particular zonas de rift continental. Las características geológicas y geoquímicas especiales de la caldera de Amazcala la convierten en una geozona con varios geositos de interés científico y educativo.

Palabras Clave: Caldera, comendita, riolita hiperalcalina, Cinturón Volcánico Mexicano, régimen tectónico, geoparque UNESCO.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	LOCALIZACIÓN	1
1.2	JUSTIFICACIÓN	3
1.3	OBJETIVOS	3
1.3.1	<i>Objetivo general:</i>	3
1.3.2	<i>Objetivos particulares:</i>	4
1.4	HIPÓTESIS.....	4
2	MARCO TEÓRICO	4
2.4	DESARROLLO DE UNA CALDERA	9
2.4.1	<i>Ascenso de cámara magmática previo al colapso</i>	9
2.4.2	<i>Subsidencia de la caldera</i>	10
2.4.3	<i>Magmatismo posterior al colapso y Resurgencia</i>	10
2.4.4	<i>Actividad hidrotermal y mineralización</i>	10
3	METODOLOGÍA	12
3.1	RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.2	TRABAJO DE CAMPO.....	12
3.3	TRABAJO DE LABORATORIO	13
3.3.1	<i>Análisis petrográfico</i>	13
3.3.1.1	Elaboración de láminas delgadas	13
3.3.2	<i>Preparación de muestras para análisis</i>	14
3.3.2.1	Método de trituración y pulverizado.	14
a)	Trituración.....	14
b)	Separación de circones.....	14
4	MARCO GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	15
4.1	MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	15
4.2	MARCO GEOLÓGICO LOCAL	18
4.2.1	<i>Unidades litoestratigráficas pre-caldera</i>	19
4.2.2	<i>Unidades litoestratigráficas de la caldera</i>	20
4.2.2.1	Pómez Ezequiel Montes	20
4.2.2.2	Ignimbrita Colón	21
4.2.2.3	Domos de lava del anillo.....	21
4.2.2.4	Domos Intracaldera.....	22
4.2.3	<i>Unidades litoestratigráficas post-Caldera</i>	23
4.2.3.1	Andesita Cimatario	23
4.2.3.2	Andesita Cenizas.....	23
4.2.3.3	Basalto de San José El Alto.....	24
4.2.3.4	Depósitos fluvio-lacustres.....	24
5	RESULTADOS.....	24
5.1	DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES ANALIZADAS EN ESTE ESTUDIO.	24
5.1.1	<i>UNIDAD PÓMEZ EZEQUIEL MONTES</i>	24
5.1.2	<i>UNIDAD IGNIMBRITA COLÓN</i>	26
5.1.3	<i>UNIDAD DOMOS INTRACALDERA</i>	27

5.1.3.1	DOMO ORIENTAL.....	27
5.1.3.1.1	DEPÓSITO DE OLEADA PIROCLÁSTICA DEL DOMO ORIENTAL	29
5.1.3.1.2	BRECHA DEL DOMO ORIENTAL	30
5.1.3.2	DOMO CENTRAL	31
5.2	GEOQUÍMICA DE LA CALDERA DE AMAZCALA.....	33
5.3	CLASIFICACIÓN GEOQUÍMICA DE AMAZCALA COMPARADA CON OTRAS CALDERAS DEL MUNDO 35	
5.4	CLASIFICACIÓN DEL AMBIENTE TECTÓNICO SEGÚN LA GEOQUÍMICA.....	37
5.5	DIAGRAMAS DE MULTI-ELEMENTO DE RIOLITAS ALCALINAS	37
5.6	DIAGRAMAS MULTI-ELEMENTO DE RIOLITAS CALCIALCALINAS	39
5.7	DIAGRAMAS DE TIERRAS RARAS DE AMAZCALA COMPARADAS CON RIOLITAS ALCALINAS Y CALCIALCALINAS	40
5.8	DIAGRAMAS BI-ELEMENTALES	42
5.8.1	<i>Diagramas Harker</i>	42
5.8.2	<i>Diagramas HFSE</i>	43
5.8.3	<i>Diagramas LREE</i>	44
5.8.4	<i>Diagramas HREE</i>	46
5.8.5	<i>Diagramas de actínidos y alcalinos</i>	46
6	DISCUSIÓN.....	47
6.1	EVOLUCIÓN VOLCÁNICA DE LA CALDERA DE AMAZCALA	47
6.2	INTERPRETACIÓN DE LA GEOQUÍMICA DE LA CALDERA AMAZCALA	49
7	CONCLUSIÓN	55
8	REFERENCIAS	56

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.- LOCALIZACIÓN DE LA CALDERA DE AMAZCALA Y DEL SECTOR CENTRAL DEL CVM, INDICANDO SISTEMAS DE FALLAS, CALDERAS Y VOLCANES PRINCIPALES.	2
FIGURA 2.- CLASIFICACIÓN DE CALDERAS SEGÚN LIPMAN (1995).	8
FIGURA 3.- CLASIFICACIÓN DE CALDERAS PROPUESTOS POR AGUIRRE -DÍAZ (2008).	8
FIGURA 4. DESARROLLO DE UNA CALDERA PROPUESTO POR LIPMAN (2000).....	11
FIGURA 5.- MAPA ÍNDICE DEL CINTURÓN VOLCÁNICO MEXICANO (CVM).....	16
FIGURA 6.- MAPA GEOLÓGICO DE LA CALDERA DE AMAZCALA.....	18
FIGURA 7.- ASPECTO EN CAMPO DE LA UNIDAD PÓMEZ EZEQUIEL MONTES.....	20
FIGURA 8.- ASPECTO GENERAL DE LA UNIDAD IGNIMBRITA COLÓN.	21
FIGURA 9.- DOMOS INTRACALDERA DE LA CALDERA DE AMAZCALA.	22
FIGURA 10.- ASPECTO GENERAL DEL DOMO ORIENTAL.	23
FIGURA 11.- FOTOMICROGRAFÍAS DE MUESTRAS DE LA UNIDAD PÓMEZ EZEQUIEL MONTES.	26
FIGURA 12.- FOTOMICROGRAFÍAS DE MUESTRAS DE LA UNIDAD IGNIMBRITA COLÓN.	27
FIGURA 13.- FOTOMICROGRAFÍAS DE MUESTRAS DE LA OLEADA PIROCLÁSTICA DEL DOMO CENTRAL.	30
FIGURA 14.- FOTOMICROGRAFÍAS DE LA BRECHA DEL DOMO ORIENTAL.....	31
FIGURA 15.- FOTOMICROGRAFÍAS DE LA BRECHA DEL DOMO ORIENTAL.....	28
FIGURA 16.- FOTOMICROGRAFÍAS DE LA BRECHA DEL DOMO ORIENTAL.....	29
FIGURA 17.- FOTOMICROGRAFÍAS DEL DOMO CENTRAL.....	32
FIGURA 18.- FOTOMICROGRAFÍAS DEL DOMO CENTRAL.....	33
FIGURA 19.- DIAGRAMAS DE CLASIFICACIÓN PARA LAS ROCAS VOLCÁNICAS DE LA CALDERA DE AMAZCALA UTILIZANDO ELEMENTOS MAYORES Y ELEMENTOS TRAZA.	34
FIGURA 20.- DIAGRAMAS DE CLASIFICACIÓN DE ROCAS VOLCÁNICAS.....	36
FIGURA 21.- DIAGRAMAS DE DISCRIMINACIÓN TECTONOMAGMÁTICA PARA GRANITOS, QUE EQUIVALEN A MAGMAS RIOLÍTICOS.	37
FIGURA 22.- DIAGRAMAS MULTIELEMENTOS PARA COMENDITAS.	38
FIGURA 23.- DIAGRAMAS MULTIELEMENTOS NORMALIZADOS PARA RIOLITAS CALCIALCALINAS CONTRA MANTO PRIMITIVO (A) Y CONDRITAS (B Y C).	40
FIGURA 24.- DIAGRAMAS DE TIERRAS RARAS NORMALIZADAS A CONDRITAS PARA LAS COMENDITAS DE ZONAS DE RIFT CONTINENTAL Y SU COMPARACIÓN CON AMAZCALA (SUN Y MCDONOUGH, 1989; NAKAMURA, 1974).....	41
FIGURA 25.- DIAGRAMA DE TIERRAS RARAS NORMALIZADAS A CONDRITAS PARA AMAZCALA Y SU COMPARACIÓN CON LA PRIMAVERA, LAS NAVAJAS Y TAUPO (SUN Y MCDONOUGH, 1989; NAKAMURA, 1974).....	41
FIGURA 26.- DIAGRAMAS DE TIERRAS RARAS NORMALIZADAS A CONDRITAS PARA AMAZCALA Y SU COMPARACIÓN CON RIOLITAS CALCIALCANICAS DE LA PACANA (NAKAMURA,1974).	42
FIGURA 27.- DIAGRAMAS DE VARIACIÓN HARKER (1909) DE ELEMENTOS MAYORES VS. EL CONTENIDO DE SÍLICA.....	43
FIGURA 28.- DIAGRAMAS DE VARIACIÓN BI-ELEMENTALES DE ALTO CAMPO DE ESFUERZO (HFSE)..	44
FIGURA 29.- DIAGRAMAS DE VARIACIÓN BI-ELEMENTAL DE TIERRAS RARAS LIGERAS (LREE).	45
FIGURA 30.- DIAGRAMAS DE VARIACIÓN BI-ELEMENTAL DE TIERRAS RARAS PESADAS (HREE).	46
FIGURA 31.- DIAGRAMAS BI-ELEMENTALES DE ACTÍNIDOS Y ALCALINOS.	
FIGURA 32.- MODELO ESQUEMÁTICO QUE MUESTRA LAS FASES DE FORMACIÓN PARA LA CALDERA DE AMAZCALA.	
FIGURA 33. LOCALIZACIÓN DE LOS CENTROS VOLCÁNICOS UTILIZADOS EN ESTA TESIS. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	

1 INTRODUCCIÓN

El Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) es una provincia volcánica de margen continental asociada a la subducción de las placas de Cocos-Rivera por debajo de la placa norteamericana (Demant, 1978; Nixon, 1982; Aguirre-Díaz et al., 1998 Ferrari et al., 1999; Gómez-Tuena et al., 2005), en donde predominantemente se han generado productos de composición calcialcalina, desde basáltica a riolítica (Gómez-Tuena et al. 2005; Siebe et al. 2006). Sin embargo, se ha reportado vulcanismo hiperalcalino en algunos sitios dentro de esta provincia, como, por ejemplo, Las Navajas en Nayarit y La Primavera en Jalisco (Mahood 1981; Mahood, 1985; Nelson y Hegre, 1990). Además de éstas, se tiene el caso de la caldera de Amazcala ubicada en el centro de la provincia del CVM, y limitada estratigráficamente entre andesitas-dacitas calcialcalinas típicas de ambientes de subducción (Aguilar-Vargas y Verma, 1987; Gómez-Tuena, 2005;). El caso de la caldera de Amazcala es un enigma por su composición hiperalcalina y su posición en espacio y tiempo en el CVM, el cual ha sido mencionado por Aguirre-Díaz y Morton-Bermea (2018). En el presente trabajo se realizó una base de datos de calderas en el mundo de composiciones químicas similares a las de Amazcala, independientemente del régimen tectónico-magmático de estas calderas, con el fin de hacer una comparación de estas con Amazcala y encontrar similitudes o diferencias que ayuden a explicar la relación de entre magmatismo riolítico-hiperalcalino con el régimen tectónico asociado.

1.1 Localización

La caldera de Amazcala se localiza a 30 km al noroeste de la ciudad de Querétaro, México (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001) a 480 km de la Trincheras Mesoamericana, siendo la caldera más septentrional del Cinturón Volcánico

Mexicano (CVM) (Fig.1). La caldera de Amazcala es la caldera más antigua hasta ahora reportada del CVM con una edad de 7.3 a 6.6 Ma (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001). La forma de la caldera es elíptica con 11 x 14 km de diámetro, teniendo su eje más largo orientado al noreste (NE) (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001).

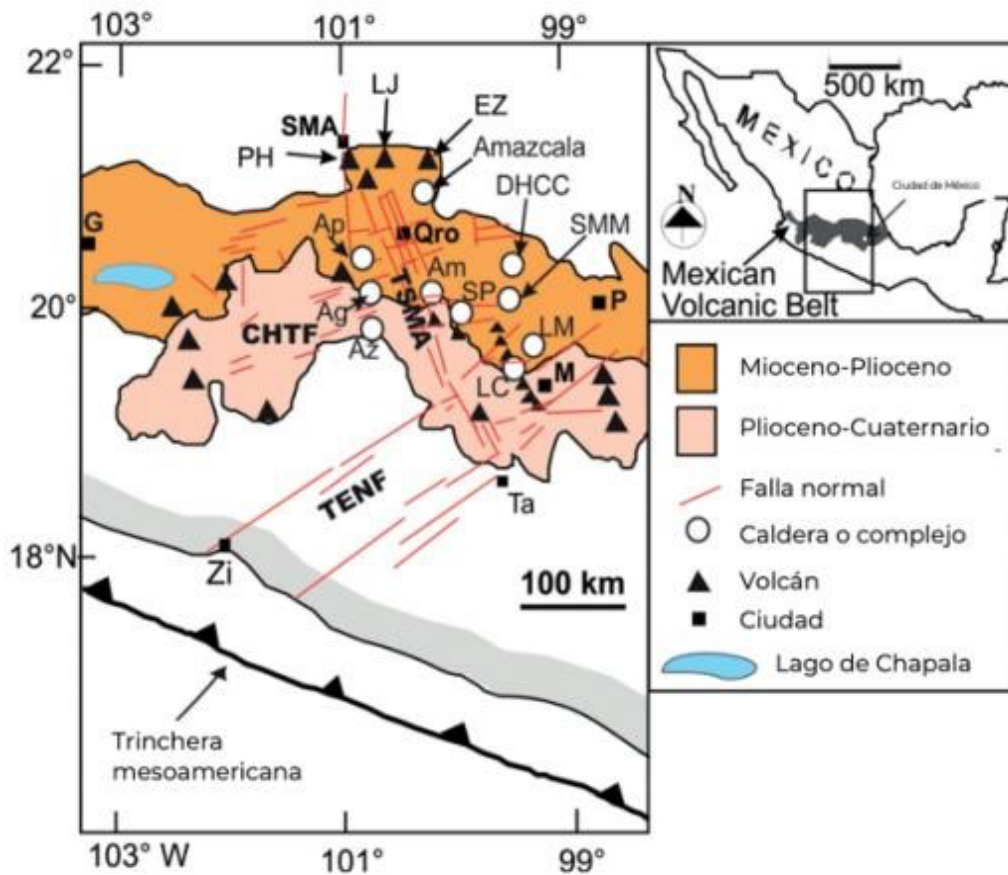


Figura 1.- Localización de la caldera de Amazcala y del sector central del CVM, indicando sistemas de fallas, calderas y volcanes principales. TENF: Sistema de Fallas Tenochtitlán; CHTF: Sistema de Fallas Chapala-Tula; TSMA: Sistema de Fallas Taxco- San Miguel de Allende. Volcanes: EZ: El Zamorano; PH: Palo Huérfano; LJ: La Joya. Calderas: Ap: Apaseo; Ag: Agustinos; Az: Azufres; LC: La Catedral; LM: La Muerta; Am: Amealco; SP: San Pedro; SMM: Santa María Macúa; DHCC: Donguinyo-Huichapán. Ciudades: SMA: San Miguel de Allende; Qro: Querétaro; M: Ciudad de México; P: Pachuca; Zi: Zihuatanejo; Ta: Taxco; G: Guadalajara. (tomado de Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001).

1.2 Justificación

La caldera de Amazcala es importante de estudiar, ya que produjo un gran volumen (<35 km³) de riolitas hiperalcalinas, las cuales son anómalas para el ambiente tectónico en el que se ubican en el espacio y tiempo, pues estratigráficamente se encuentran entre vulcanismo de composición andesítica-dacítica típica de subducción de margen continental y, en cuanto a espacio geográfico, se localizan en la parte central del CVM. Por lo que el mejor conocimiento sobre las características químicas y geológicas de los productos de la caldera de Amazcala permitirán establecer una propuesta sobre el origen y desarrollo de un volumen importante de riolitas hiperalcalinas en el centro de un vulcanismo calcoalcalino andesítico-riolítico.

Por otro lado, la caldera de Amazcala se ha definido como geozona del Proyecto de Geoparque Mundial UNESCO Triángulo Sagrado (PGMUTS), y el presente estudio brindará resultados para una mejor caracterización de la caldera y sus productos con fines de interés científico y didáctico.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general:

En el presente trabajo se busca hacer una comparación geoquímica entre las riolitas hiperalcalinas de la caldera de Amazcala con otros centros hiperalcalinos riolíticos en el mundo, preferiblemente asociados a calderas, como es el caso del volumen emitido por Amazcala. Lo anterior, para inferir, de manera muy preliminar, el régimen tectónico y la fuente magmática de los magmas que dieron lugar al vulcanismo de la caldera de Amazcala.

1.3.2 *Objetivos particulares:*

- Elaborar gráficas de patrones geoquímicos incluyendo los diagramas de tierras raras, multielemento, elemento-elemento y clasificación de rocas volcánicas.
- Interpretar los patrones geoquímicos de las gráficas realizando una comparación entre Amazcala y otros centros riolíticos hiperalcalinos de México y otros países.
- Proponer de manera preliminar el ambiente tectónico que dio lugar al magmatismo que produjo las riolitas hiperalcalinas de la caldera de Amazcala.
- La información resultante en este estudio se usará para la descripción científica de la geozona caldera de Amazcala del PGMUTS.

1.4 Hipótesis

La caldera de Amazcala se relaciona a un episodio volcánico que sucedió entre los 7.3-6.6 Ma en el centro del CVM, donde se produjo un gran volumen de riolitas hiperalcalinas (>35 km³ de magma según Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001), las cuales se originaron por un magmatismo asociado a un régimen tectónico involucrando una subducción de margen continental y un proceso de ascenso de fluidos enriquecidos del manto fértil, posiblemente a través de una fractura o ventana en la placa oceánica subducida.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Rocas hiperalcalinas

Iddings en 1892 propuso que todas las rocas ígneas pertenecían a una serie alcalina o subalcalina, y si bien, hoy en día la mayoría de los investigadores reconocen esas

dos series también aceptan que la subalcalina puede dividirse en la serie toleítica y serie calcoalcalina (Tilley, 1950; Irvine y Baragar, 1971). Shand (1927) clasificó a las rocas ígneas basándose en su contenido molar total de Álcali vs. Alúmina $((\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3)$ como peralcalinas $(\text{Al}_2\text{O}_3 < (\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}))$, peraluminosas $(\text{Al}_2\text{O}_3 > (\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}))$ y metaluminosas $(\text{Al}_2\text{O}_3 < (\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}))$ pero $\text{Al}_2\text{O}_3 > (\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$. La relación Álcali vs. Alúmina se denomina índice de peralcalinidad (Wilson, 1989; Winter, 2010).

Cada serie se caracteriza por un basalto padre particular y muestra una secuencia de magmas derivados que siguen una línea líquida de descendencia desde el magma parental, por lo tanto, deben de existir controles físicos y químicos importantes en el desarrollo de una serie de magmas primarios y derivados. Existen algunos patrones y correlaciones que representan cada serie magmática, por ejemplo, los magmas calco-alcalinos están esencialmente restringidos a procesos tectónicos relacionados con la subducción. Los magmas toleíticos están asociados con límites divergentes. Los magmas alcalinos se asocian principalmente a zonas de rifting continental o plumas del manto (Winter, 2010).

El origen de las rocas ígneas hiperalcalinas sigue siendo de gran debate para los geocientíficos, ya que a pesar de estar dispersas por el mundo y ser químicamente muy peculiares, no se conoce a profundidad como se originan. Shao et al. (2015) proponen dos modelos para la formación de riolitas hiperalcalinas: 1) Son resultado de la cristalización fraccionada prolongada de basaltos de transición a ligeramente alcalinos y 2) resultan de la fusión parcial de la corteza antigua compuesta por rocas intrusivas alcalinas.

2.2 Zonas de Rift Continental

Los rifts continentales son zonas de extensión litosférica continentales que tienen decenas de kilómetros de ancho y de decenas a cientos de kilómetros de longitud. Se caracterizan por una depresión central, flancos levantados y un adelgazamiento de la corteza subyacente (Wilson, 1989; Kearey, 2008).

Existen diferentes modelos que tratan de explicar la formación de los rifts, uno es el modelo activo, donde la zona de ruptura se produce por el afloramiento astenosférico de una pluma mantélica o dorsales oceánicas produciendo un adelgazamiento litosférico. El modelo pasivo surge por tensiones diferenciales en la litosfera, en donde el manto es forzado a elevarse a medida que los continentes se separan. Uno de los principales problemas en el modelado petrogenético de magmas de zonas de rift continental radica en la dificultad para distinguir entre los componentes mantélicos enriquecidos que se derivan de las plumas del manto y los que existen dentro de la litosfera subcontinental (Winter, 2003; Kearey, 2008).

Las características generales de los magmas de zonas de rift continental son su naturaleza alcalina, enriquecimiento en volátiles y en elementos LILE, lo que sugiere que se derivan de fuentes de manto enriquecidas. Un amplio espectro de composiciones de magma caracteriza a las zonas de rift continental. Los basaltos van desde los subalcalinos de transición, pasando por los basaltos alcalinos, hasta las basanitas y las nefelinitas infrasaturadas en sílice y, en algunos casos, los magmas ultrapotásicos como las leucititas. Sin embargo, el vulcanismo no es predominantemente basáltico, sino que involucra grandes volúmenes de erupciones félsicas. En general, el vulcanismo de las zonas de rift continental es altamente explosivo y dominan las rocas piroclásticas en la secuencia volcánica, sugiriendo un

enriquecimiento de volátiles en la región de origen del magma (Wilson, 1989; Winter, 2003).

2.3 Calderas: Definición y clasificación

En vulcanología una caldera se ha definido como una estructura volcánica más o menos circular (Lipman, 2000) asociada al hundimiento de la corteza sobre una cámara magmática somera como consecuencia del vaciamiento del magma (Gottsmann y Martí, 2008 y referencias incluidas). Durante el colapso, un gran volumen de magma es evacuado de forma explosiva generando depósitos piroclásticos (Aguirre-Díaz, 2008b).

Lipman (1995) definió varios mecanismos de formación de calderas de acuerdo con la morfología actual (Fig. 2):

- Tipo pistón (Plate/Piston Collapse): este tipo de caldera se forma por la subsidencia de un bloque coherente de roca en una cámara de evacuación bordeada por fallas anulares. El fondo de la caldera cede como un bloque completo, generando una superficie delimitada por un talud amplio semicircular (Cole et al., 2005).
- Despedazada (Piecemeal): la subsidencia ocurre en numerosos bloques y/o múltiples centros de colapso (Branney y Kokelaar, 1994).
- Trampa (Trapdoor): Este tipo de caldera se caracteriza por el colapso y subsidencia asimétrica, debido a que la cámara magmática colapsa parcialmente (Heiken et al., 1986).
- Calderas embudo (Funnel calderas): que generan una respuesta geofísica reflejada en una morfología tipo “embudo” o en “V”.

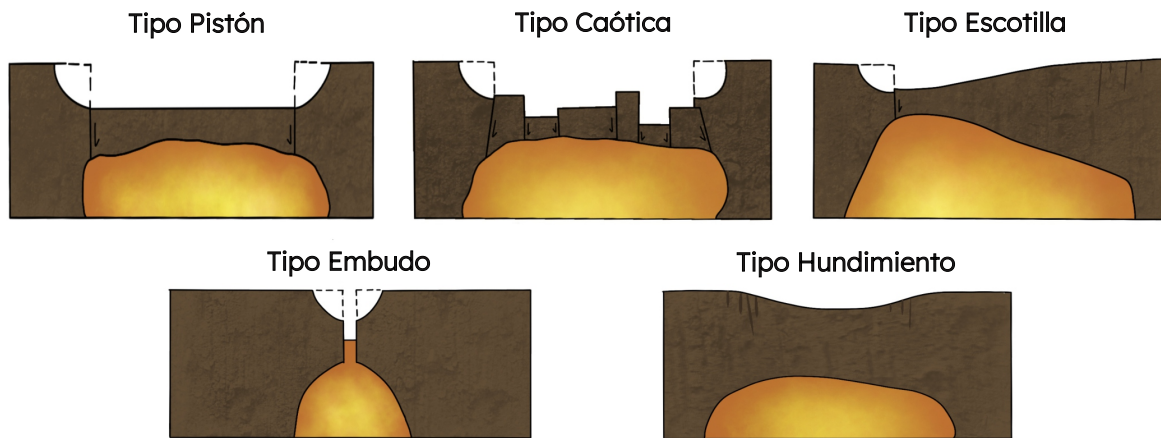


Figura 2.- Clasificación de calderas según Lipman (1995). Modificado de figura original de Lipman, 1995.

Aguirre-Díaz (2008) propone una clasificación integrada unificando algunos de los mecanismos de colapso de calderas señalado por Lipman (1995), junto con los tipos de calderas según su origen geológico, indicados en la Figura 3, que se explican a continuación:

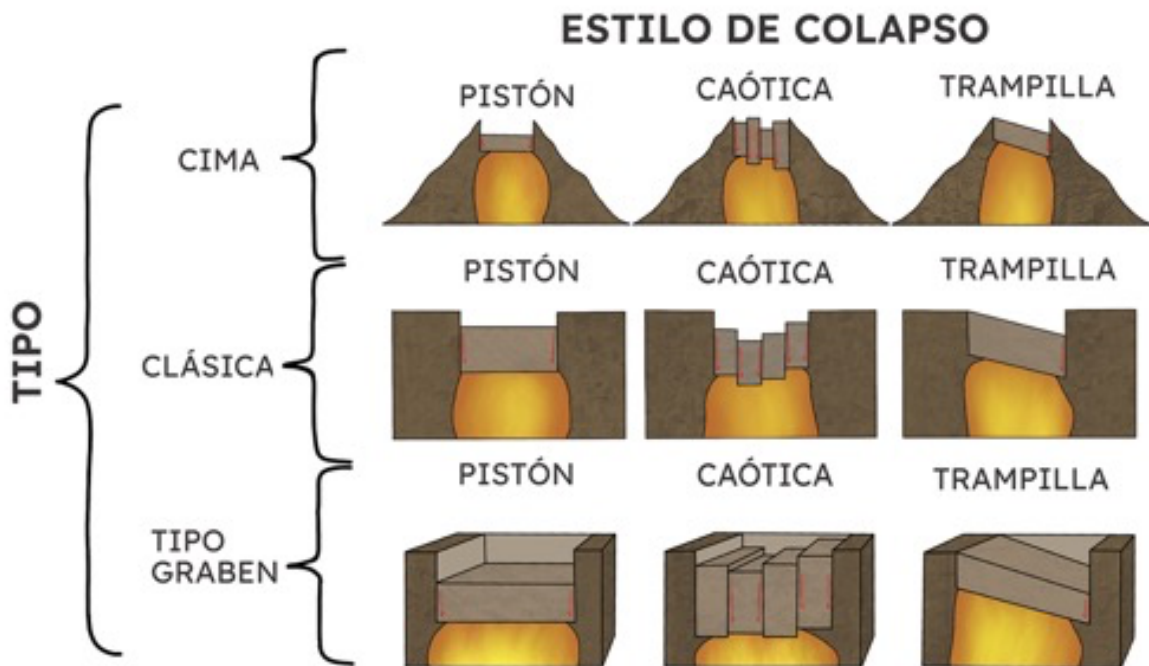


Figura 3.- Clasificación de calderas propuestos por Aguirre-Díaz (2008b). Modificado de figura original de Aguirre-Díaz, 2008b.

- Caldera de cumbre: Este tipo de calderas se encuentran en la parte superior de grandes volcanes compuestos y están relacionadas con pequeños volúmenes de piroclásticos, principalmente depósitos de caída e ignimbritas.
- Calderas clásicas: Son estructuras extensas con formas semicircular a irregular. Presentan diámetros de varios kilómetros, elemento que puede estar relacionado a grandes volúmenes de depósitos volcanoclásticos, entre los que se pueden encontrar desde fragmentos de pómez hasta grandes flujos piroclásticos que forman depósitos extensos de ignimbrita.
- Calderas graben: Estructuras de gran tamaño debido a que el colapso es afectado debido al vulcanismo explosivo relacionado con actividad tectónica. La erupción genera grandes flujos piroclásticos masivos formadores de ignimbritas de gran volumen que ocurre a lo largo de fisuras tectónicas principales y secundarias, lo que ocasiona un colapso total o parcial de la fosa tectónica. Este tipo de calderas se caracterizan por generar depósitos de oleadas piroclásticas e ignimbritas, pero sin producir depósitos de caída de pómez previo a las ignimbritas. Este tipo de calderas son consideradas las causantes de las ignimbritas de mayores volúmenes en México, como las de la Sierra Madre Occidental (Aguirre-Díaz et al., 2008b, 2021).

2.4 Desarrollo de una caldera

Lipman en el año 2000 propone una serie de etapas en el desarrollo de una caldera basado en calderas de América del Norte (Fig. 4), sin embargo, modelos de otros autores se pueden encontrar en Gottsmann y Martí 2008.

2.4.1 *Ascenso de cámara magmática previo al colapso*

Gracias al ascenso del cuerpo magmático hacia zonas someras de la corteza se puede dar un levantamiento de ésta, generando así “fisuras” o “fracturas” radiales o

anulares sobre la cámara magmática. Dichas fracturas son muy importantes debido a que serán las que controlen el ascenso del magma y los conductos para la erupción formadora de la caldera (Gottsmann y Martí, 2008). Otros conductos pueden estar controlados por estructuras tectónicas como, sistemas de fallas regionales o grabens (Lipman, 2000; Aguirre-Díaz y Labarthe-Hernández, 2003).

2.4.2 Subsistencia de la caldera

El hundimiento que se genera se asocia con el vaciamiento de la cámara magmática a gran escala (Christiansen, 2005). El colapso inicial se da principalmente a lo largo de la fractura anular o fallas pre-existentes dando lugar al colapso de la caldera y la acumulación de voluminosos productos piroclásticos, particularmente ignimbritas con brechas de colapso intercalada con la ignimbrita en el relleno de la caldera.

2.4.3 Magmatismo posterior al colapso y Resurgencia

La resurgencia se debe al ascenso de magma residual después del colapso, empujando hacia arriba los bloques colapsados y el relleno piroclástico intracaldera. En el caso de que el magma residual de la cámara magmática desarrolle un último ascenso que no llegue a salir a la superficie, éste desarrollará una cúpula estructural, también llamado domo estructural, que es cuando sucede la resurgencia, en caso de que no suceda lo anterior se tiene un caso de caldera sin resurgencia. Esta fase no se observa en muchas calderas en el mundo.

2.4.4 Actividad hidrotermal y mineralización

Puede ocurrir posterior al colapso de la caldera durante el cual se desarrolla el sistema hidrotermal y la posible mineralización relacionada.

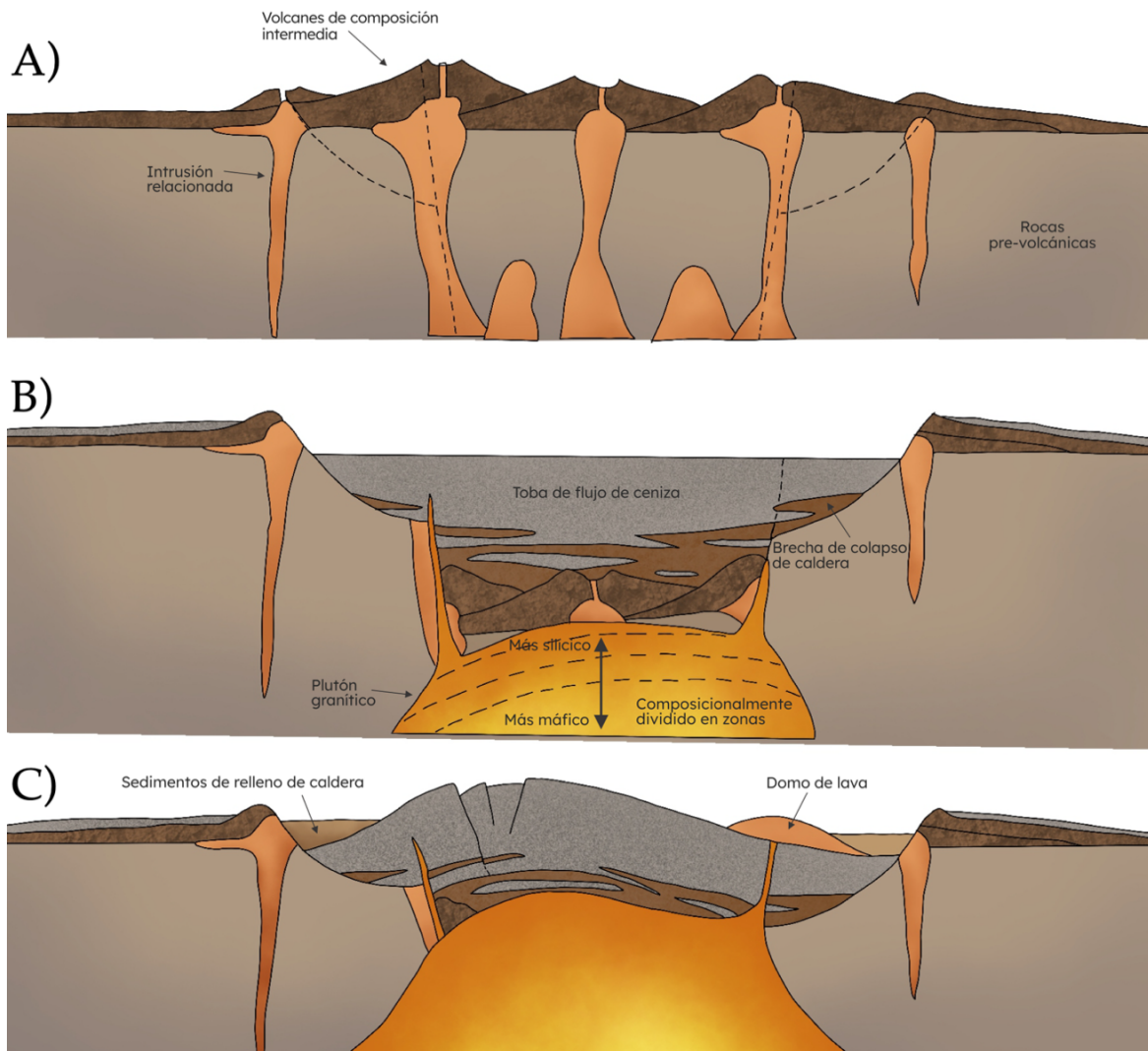


Figura 4. Desarrollo de una caldera propuesto por Lipman (2000). Modificado de figura original de Lipman, 2000. A) Vulcanismo previo al colapso: estratovolcanes son alimentados por plutones aislados, los cuales indican el comienzo de la acumulación de un cuerpo magmático silíceo de tamaño batolítico que alimentará las erupciones de ignimbrita. Generación de fracturas debido al levantamiento ocasionado por el emplazamiento de los plutones. B) Geometría de la caldera después de su colapso y de las erupciones piroclásticas. Primero se genera el colapso a lo largo de las fallas limítrofes y es seguido por el derrumbe de las paredes de la caldera en donde se acumulan brechas de colapso e ignimbrita en el interior de la caldera. C) Resurgimiento asimétrico y depósitos post-caldera. El suelo de la caldera original se ha borrado casi por completo debido al ascenso de la cámara magmática.

3 METODOLOGÍA

3.1 Recopilación bibliográfica

Se llevó a cabo una búsqueda de información bibliográfica para comprender los temas principales de la investigación incluyendo el Cinturón Volcánico Mexicano (Demant, 1978, Hasenaka, 1994, Aguirre-Díaz et al., 1998; Ferrari, 2000; Gómez-Tuena et al., 2005), características geoquímicas de subducción de margen continental y de rift continental (Mahood, 1980; Aguirre-Díaz, 1996; Carmichael 2002; Gomez Tuena, 2005; Aguirre-Díaz y Morton-Bermea, 2018); calderas (Lipman, 2000; Christiansen, 2005; Geyer y Martí, 2008; Gottsmann y Martí, 2008; Geshi, 2021; Aguirre-Díaz et al., 2021).

La base de datos geoquímicos de este trabajo se enfocó en la búsqueda de análisis geoquímicos completos de rocas hiperalcalinas en calderas de colapso y/o campos volcánicos equivalentes a una caldera. Así mismo, se buscaron algunos casos de riolitas calcialcalinas en calderas de colapso para su comparación con las riolitas hiperalcalinas. Lo anterior para establecer una comparación equitativa en cuanto a volúmenes emitidos de los centros volcánicos. Además, se buscó que las referencias mencionaran el ambiente tectónico en el que se desarrollaron estas calderas o campos volcánicos. Y se buscó que la información geoquímica fuera lo más completa posible y que incluyera los elementos traza.

3.2 Trabajo de campo

Se realizó una salida a campo, recorriendo los depósitos representativos de la caldera. En cada uno de los afloramientos se hizo una descripción de las diferentes unidades y se recopilaron muestras.

3.3 Trabajo de laboratorio

3.3.1 *Análisis petrográfico*

Se seleccionaron 9 muestras de rocas para hacer un análisis petrográfico de lámina delgada. La mayoría de las muestras seleccionadas pertenecen a las unidades de la caldera (Pómez Ezequiel Montes, Ignimbrita Colón, Oleada piroclástica “La Pila”, Abanico piroclástico del domo, Domo Central y Domo Oriental). Además, se revisaron láminas delgadas de estudios previos sobre la caldera (Aguirre-Díaz y López-Hernández, 2001).

Las nuevas láminas delgadas se realizaron en el taller de laminación del Centro de Geociencias UNAM, con ayuda del responsable del taller, Juan Tomás Vázquez Ramírez. Fueron analizadas un total de 12 láminas delgadas utilizando un microscopio petrográfico. Se realizó una descripción de su composición mineralógica, identificación de texturas, tipo de matriz, entre otras características de la muestra de roca.

3.3.1.1 Elaboración de láminas delgadas

Para realizar una lámina delgada primero se debe cortar galletas de la muestra utilizando una cortadora de disco de diamante. Después esa galleta se pasa por diferentes abrasivos (350, 400 y 600 micras) en un aparato denominado tambor, el cual es un plato giratorio, todo esto para que quede totalmente lisa y sin rayaduras, posteriormente se coloca el vidrio de un portaobjetos a la galleta y se pega con resina. El tiempo de secado de la resina en el sol fue de 1 hora aproximadamente. Después se corta la galleta para solo quedarnos con el portaobjetos y la muestra con menos de 1 cm de espesor, la cual se desbasta en la máquina de corte y desbaste hasta que el grosor sea de 30 micras. Por último, la lámina delgada se desbasta con abrasivos de 400, 600 y 1000 micras para que los minerales queden en el espesor correcto.

3.3.2 *Preparación de muestras para análisis*

Fue seleccionada 1 muestra para un nuevo fechamiento U/Pb, utilizando concentrado de circones; el fechamiento se realizó en el Laboratorio de Estudios Isotópicos del Centro de Geociencias de la UNAM, campus Juriquilla, por el Dr. Carlos Ortega, técnico encargado del laboratorio. La preparación de la muestra y concentración de circones fue realizada por la autora de esta tesis. Para detalles de la técnica utilizada referirse a Solari et al. (2010).

3.3.2.1 Método de trituración y pulverizado.

Los métodos de trituración y pulverizado se llevaron a cabo en el Centro de Geociencias UNAM, campus Juriquilla.

a) Trituración

Para llevar a cabo este método se utiliza una prensa de pistón hidráulico, para lo cual inicialmente se limpia muy bien el área de trabajo utilizando aire comprimido y acetona. Una vez realizado este paso se utiliza papel tipo revolución para proteger el área alrededor del pistón con la finalidad de que la muestra no se disperse al momento de triturarla. Es importante resaltar que la muestra que se triture tiene que estar descostrada, limpia y secada previamente en el horno. La muestra se tritura hasta obtener fragmentos que sean menores a 5 mm. Al terminar la trituración, se deben de guardar en frascos o bolsas de plásticos limpias para evitar la contaminación y proceder a limpiar de nuevo el área de trabajo para la siguiente muestra.

b) Separación de circones

Una vez triturada la muestra con el pistón hidráulico se toma una parte representativa de ese triturado para el procedimiento de separación y concentración de circones. La muestra seleccionada se tamiza utilizando las mallas +40, +60 y +80.

La fracción empleada para los circones que se utilizarán para el concentrado es la fracción 60-80. El resto del material se guarda como reserva. Con la fracción 60-80 se realiza el concentrado de minerales pesados empleando una batea y agua destilada hasta obtener el suficiente número de minerales pesados entre los cuales se encuentran los circones (Solari et al., 2010). Una vez que se cuente con estos minerales pesados se hace una separación de circones utilizando un microscopio binocular. Los circones separados se montan en un portaobjetos para ser ingresados al laboratorio de geocronología.

4 MARCO GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1 Marco geológico regional

El Cinturón Volcánico Mexicano (Fig. 5) es un arco volcánico de margen continental muy complejo y variado del Cenozoico que se localiza en el centro de México y se extiende de costa a costa con una orientación este-oeste entre los paralelos 19° y 21° con unas dimensiones de 20 y 200 km de anchura y aproximadamente 1000 km de longitud (Aguirre-Díaz et al., 1998; Ferrari et al., 1999; Gómez-Tuena, 2005).

El magmatismo en la zona del CVM se debe a la subducción de las placas de Cocos y Rivera a lo largo de la Trinchera Mesoamericana por debajo de lo que es el sur de México (Nixon, 1982; Aguirre-Díaz et al., 1998; Ferrari et al., 1999; Gómez-Tuena, 2005; Siebe et al., 2006). La Trinchera Mesoamericana forma un ángulo de 15° aproximadamente con el frente volcánico de la provincia, dando como resultado una distancia entre ellos de 200 km en el extremo occidental y 400 km en el extremo oriental (Urrutia y Del Castillo, 1977; Nixon, 1982; Demant, 1981; Suárez y Singh, 1986; Siebe et al. 2006). El vulcanismo del CVT es principalmente calco-alcalino y

varía en composición de basáltico a riolítico, con predominancia de rocas de composición intermedia (Aguilar-Vargas y Verma, 1987; Gómez-Tuena, 2005).

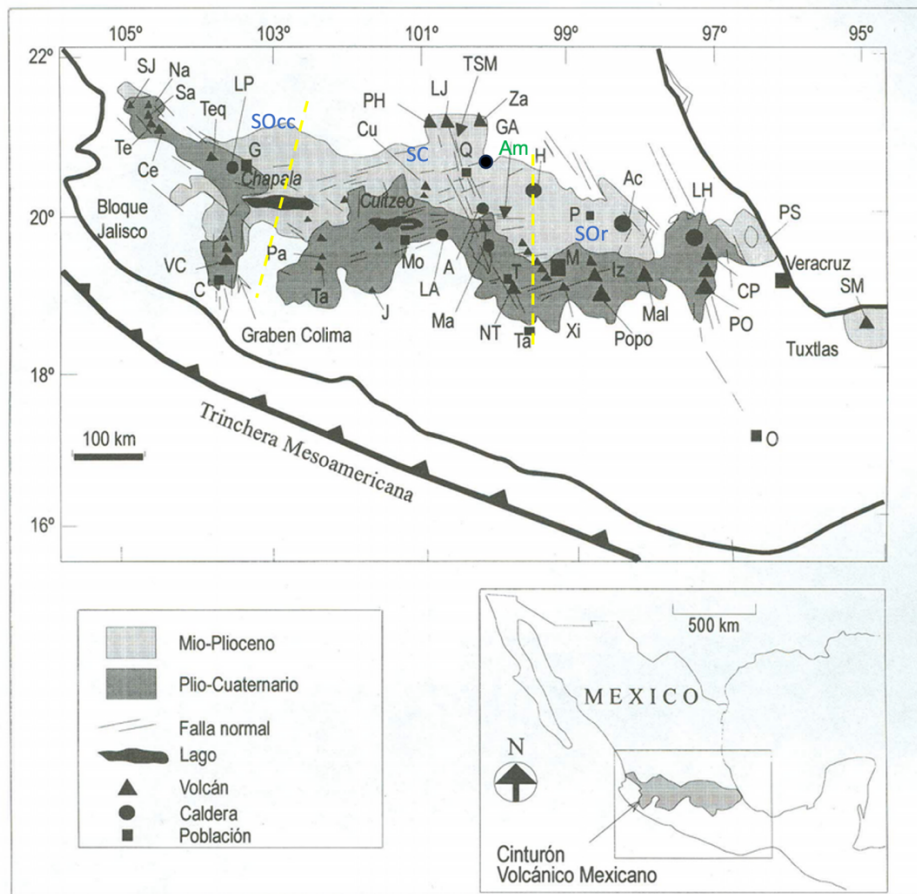


Figura 5.- Mapa índice del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), mostrando distribución y rasgos volcánicos estructurales de esta provincia. Volcanes: SJ: San Juan; Na: Las Navajas; Sa: Sanganguey; Te: Tepeltitlic; Ce: Ceboruco; Teq: Tequila; VC: Volcán Colima; Pa: Paricutín; Ta: Tancitaro; J: Jorullo; Cu: Culiacán; PH: Palo Huerfano; LJ: La Joya; NT: Nevado de Toluca; Xi: Xitle; Popo: Popocatepetl; Iz: Iztazihautl; Mal: Malinche; CP: Cofre de Perote; PO: Pico de Orizaba (Citaltépetl); SM: San Martín. Calderas: LP: La Primavera; LA: Los Azufres; A: Amealco; Ma: Mazahua; H: Huichapan; Ac: Acoculco; LH: Los Humeros; Am: Amazcala. Sistema de fallas: TSM: Taxco-San Miguel de Allende. Localidades: C: Colima; G: Guadalajara; Mo: Morelia; Q: Querétaro; T: Toluca; Ta: Taxco; M: Ciudad de México; P: Pachuca; O: Oaxaca. Sectores: SOcc: Sector Occidental; SC: Sector Central; SO: Sector Oriental. Modificado de Aguirre-Díaz et al., 1998.

El CVT puede dividirse en tres sectores: occidental, central y oriental (Aguirre-Díaz et al., 1998; Ferrari, 2000). El sector occidental está limitado al este por el rift de Colima, el arco volcánico se superpone a la parte norte del Bloque de Jalisco (BJ) y al

límite meridional de la Sierra Madre Occidental (SMO) (Luhr et al., 1985; Allan et al., 1991; Ferrari, 2000). Respecto al vulcanismo emplazado en la parte límite sur de la SMO, éste consta de estratovolcanes y complejos de domos dacíticos-riolíticos, así como por centros monogenéticos basálticos (Ferrari, 2000). En cambio, en la parte del BJ el vulcanismo emplazado es casi exclusivamente monogenético de composición basáltico-andesítica (Ferrari, 2000).

El sector central está limitado entre el rift de Colima y el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende (Aguirre-Díaz et al., 1998; Ferrari, 2000; Ferrari et al., 2012), en donde se encuentra una variedad de estructuras y estilos volcánicos, desde estratovolcanes andesíticos-dacíticos, como El Zamorano, El Palo Huérfano, La Joya y Chichimequillas (Aguirre-Díaz, 2008a), calderas como Amazcala, Amealco y Huichapan (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2009), volcanes escudo y conos de escoria, como los del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (Hasenaka, 1994; Luhr y Simkin, 1993), y domos riolíticos y dacíticos, como Peña de Bernal (Aguirre-Díaz, 2008a; Aguirre-Díaz et al., 2013).

En el sector oriental, encontrándose al oriente del sistema Taxco-San Miguel de Allende, el vulcanismo emplazado es dominado por grandes estratovolcanes, calderas y complejos de domos de composición de andesítica a riolítica alineados a lo largo de estructuras corticales (Ferrari, 2000), los volcanes monogenéticos de composición basáltica solo representan una pequeña fracción del volumen de magma emplazado (Ferrari, 2000).

4.1.1 Sistema de fallas Taxco- San Miguel de Allende

En el sector central del CVM, se localiza el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA; Alaniz-Álvarez et al., 2005; Valdéz-Moreno et al., 1998) que

representa un límite cortical importante (Aguirre-Díaz et al., 2005) con rumbo NNW-SSE y con más de 500 km de longitud y 30 km de ancho. La región de Querétaro pertenece a la parte norte del sistema de fallas Taxco-San miguel de Allende (Demant, 1978; Aguirre-Díaz et al., 2005). El SFTSMA afecta grandes profundidades en la corteza (>30 Km), representa una importante zona de discontinuidad de la corteza en la zona centro de México (Aguirre-Díaz et al., 2005).

4.2 Marco geológico local

Los productos de la caldera de Amazcala incluyen ignimbritas, domos del anillo de la caldera y dos domos intracaldera (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001). El mapa geológico de la caldera de Amazcala de Aguirre-Díaz et al. (2001) en su versión revisada en este estudio se muestra en la Figura 6.

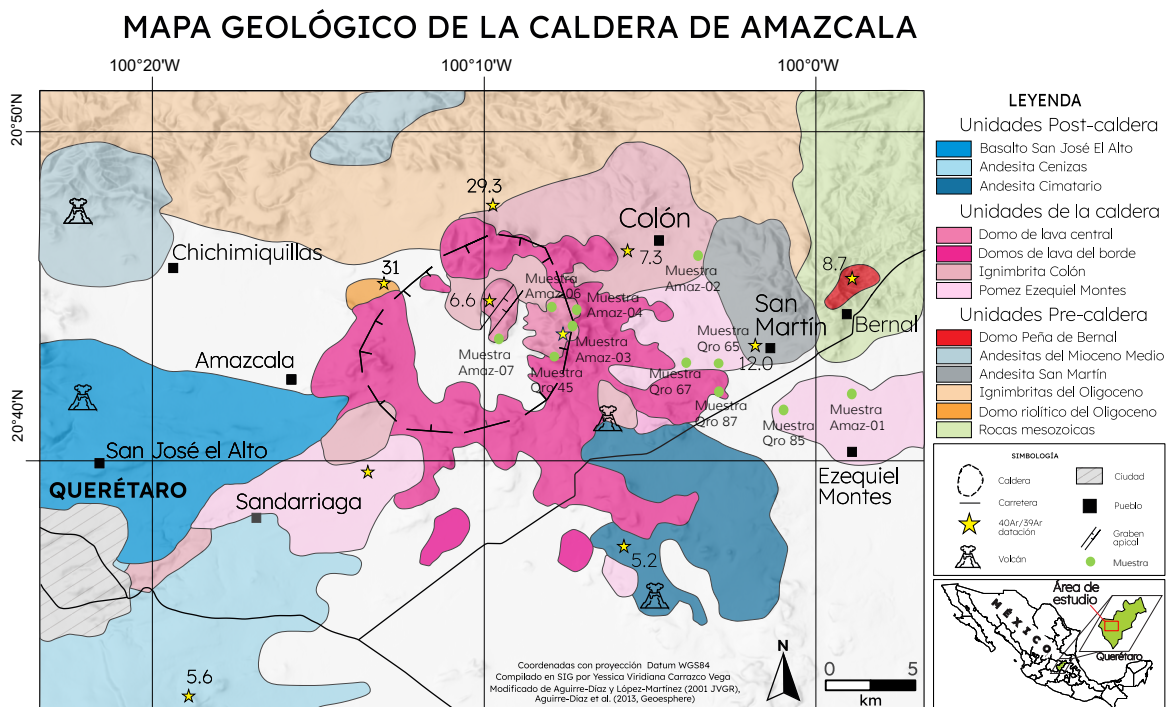


Figura 6.- Mapa geológico de la caldera de Amazcala. Se muestra la nueva unidad de Domo Oriental, así como una actualización de las unidades ignimbritas del Oligoceno, andesitas del Mioceno medio, Pómez Ezequiel Montes e ignimbrita Colón. Modificado de Aguirre-Díaz y López-Martínez (2001).

4.2.1 *Unidades litoestratigráficas pre-caldera*

En el norte de la caldera de Amazcala encontramos ignimbritas y domos riolíticos de la provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental con una edad de 31.0 ± 1.0 Ma (AguirreDíaz y López-Martínez, 2001). La edad fue obtenida de un domo de riolita que está en contacto con los domos del borde de la caldera de Amazcala (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001). La edad estimada para las ignimbritas es de 29.3 ± 0.03 Ma. La composición de la roca consiste en 35 vol.% de fenocristales, encontrando en su mayoría sanidino y cuarzo con una matriz desvitrificada con presencia de bandas de flujo (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001). Estas ignimbritas y riolitas se encuentran expuestas con frecuencia en el límite norte del CVM y se pueden encontrar en la base del volcán El Zamorano y afloran al norte de la caldera de Amazcala (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001; Aguirre-Díaz, 2008a).

Es posible encontrar domos de lava andesítica del Mioceno en las cercanías de la caldera de Amazcala, como el cerro San Martín (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001). Respecto al volcán El Zamorano, estratovolcán extinto, se encuentra al norte de la caldera Amazcala con una edad de 10 Ma (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001; Aguirre-Díaz, 2008a). Así mismo, flujos de lava andesítica forman mesetas en esta región al suroeste del cerro del Zamorano y en los alrededores de la ciudad de Querétaro, como, por ejemplo, la meseta al oriente de Jurica arrojó una edad de 7.5 ± 0.5 Ma (Aguirre-Díaz et al., 2005), la cual, es muy cercana en edad al inicio de la actividad volcánica de la caldera Amazcala (7.3 Ma, ver abajo), pero no tiene relación con la caldera.

4.2.2 Unidades litoestratigráficas de la caldera

4.2.2.1 Pómez Ezequiel Montes

Secuencia de caída pliniana que consiste en lapilli de pómez gris claro de composición riolítica (Hernández et al., 2009) y ceniza, intercalados con depósitos de oleadas piroclásticas (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001; Fig. 7). La edad para esta secuencia se estima que es de 7.3 a 7.5 Ma, que coincide con la edad de la ignimbrita Colón (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001). La secuencia tiene un espesor de 32 m (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001).

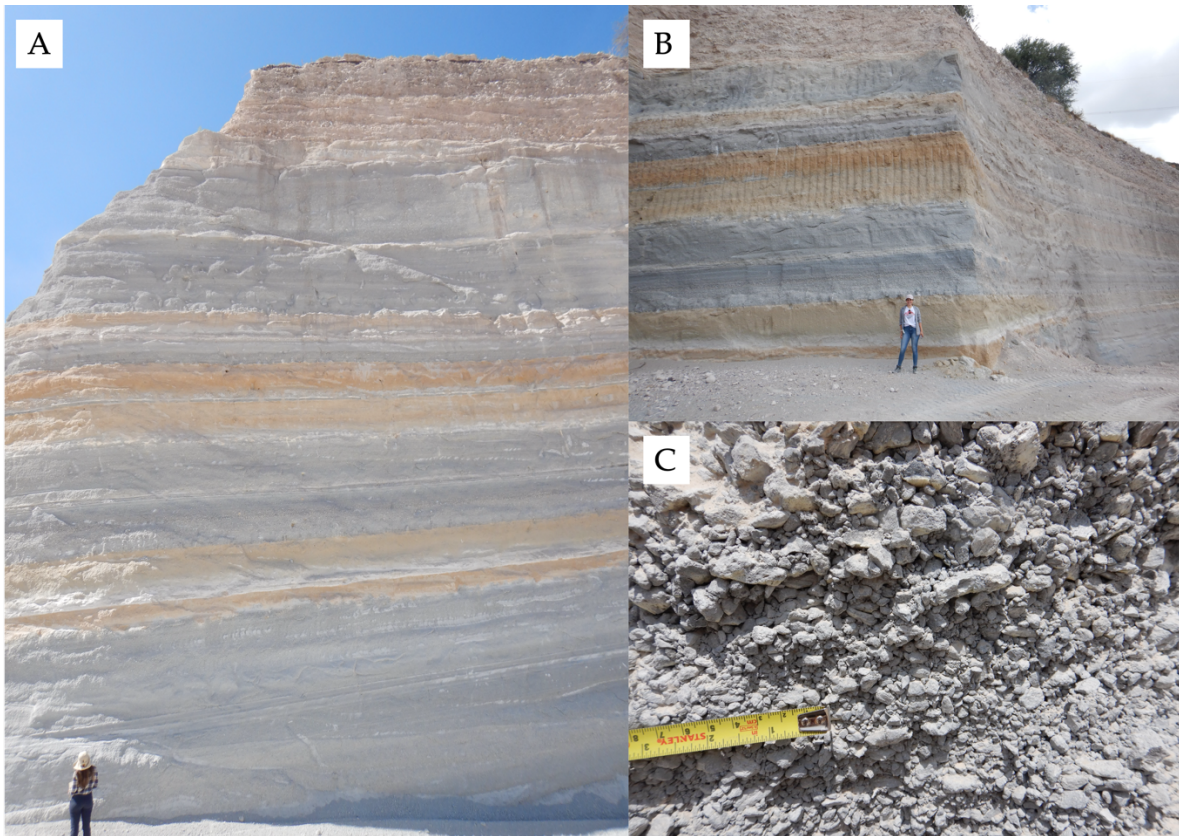


Figura 7.- Aspecto en campo de la unidad Pómez Ezequiel Montes expuesta en un banco de material ubicado a 24 Km al suroeste del centro de la caldera de Amazcala. A y B) Secuencia completa de la unidad (30 mts de espesor) mostrando las capas de depósitos de caída de pómez (capas grises) y depósitos de pómez retrabajada por agua (capas amarillas). C) Detalle de depósito de pómez de caída de la base de la unidad.

4.2.2.2 Ignimbrita Colón

Esta unidad consiste en ignimbritas riolíticas y depósitos de oleadas que tienen más de 80 m de espesor (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001; Fig. 8). Esta secuencia se produjo durante las fases climáticas del colapso de la caldera como resultado de una erupción masiva que produjo grandes volúmenes de productos piroclásticos (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001). Su color es blanco a amarillo pálido con abundancia de clastos de pómez blanca, con una matriz de ceniza de pómez blanca, pobre en cristales, conteniendo solo cuarzo y sanidino (<5 vol.%). La edad para esta unidad es de 7.3 Ma. (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001). La ignimbrita Colón y la pómez Ezequiel Montes se encuentran genéticamente asociadas, sin embargo, en varios sitios la ignimbrita colón parece subyacer la pómez Ezequiel Montes (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001).

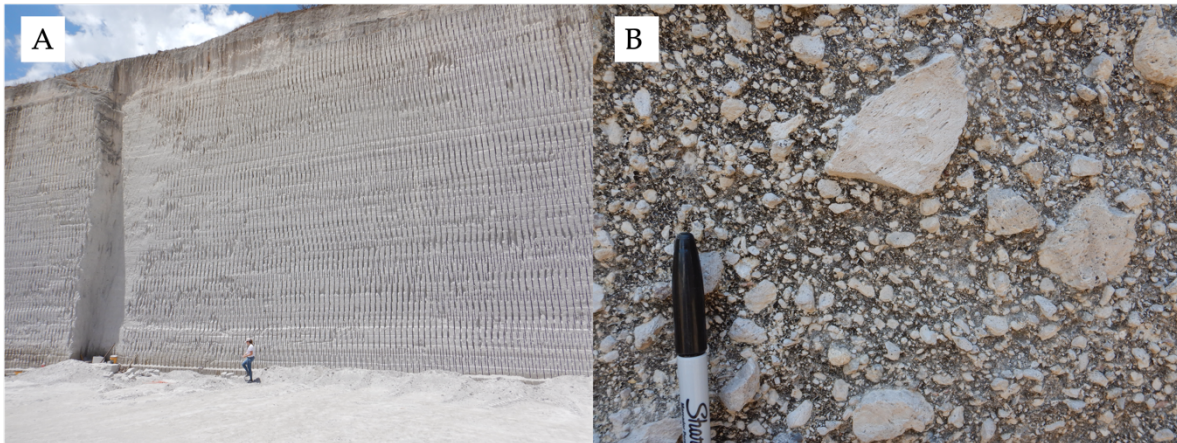


Figura 8.- Aspecto general de la unidad ignimbrita Colón en un banco de material ubicado al oeste del pueblo de Colón. A) Imagen mostrando el aspecto masivo y blanco de la ignimbrita (Las aparentes estructuras que se observan son resultado de las marcas de la explotación del material. B) Detalle de la ignimbrita mostrando abundantes fragmentos de pómez sin colapsar, por lo que se trata de una ignimbrita pobremente soldada.

4.2.2.3 Domos de lava del anillo

Varios domos riolíticos se formaron en el borde de la caldera después del colapso, utilizando la fractura anular que también fue el conducto de la ignimbrita Colón (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001). Estos domos son de poca altura y están

formados por flujos de lava de forma lobular que llegaron hasta 10 km de distancia (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001). En general, estas lavas están desvitrificadas y con bandeamiento de flujo; sin embargo, en algunas zonas se logró conservar la roca vítrea (obsidiana). La obsidiana de estos domos es prácticamente afírica con <1 vol.% de cuarzo y sanidino (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001).

4.2.2.4 Domos Intracaldera

Dos grandes domos riolíticos se emplazaron al interior de la caldera (Fig. 9). El de menor tamaño tiene una dimensión de 4x2 km y fue fechado en 6.6 ± 0.03 Ma (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001). El de mayor tamaño 4.25x3.8 km se ubica junto al borde oriental de la caldera, y fue fechado en 6.5 ± 0.17 Ma (Muestra Amaz-06 de este estudio). El Anexo 2 muestra los resultados obtenidos de los análisis geocronológicos desarrollados en el Laboratorio de Geoquímica e Isotopos del Centro de Geociencias de la UNAM. El responsable de estos análisis es el Dr. Luigi Solari. Subyaciendo al domo se observan depósitos piroclásticos y una zona de brecha externa del domo (Fig. 10).

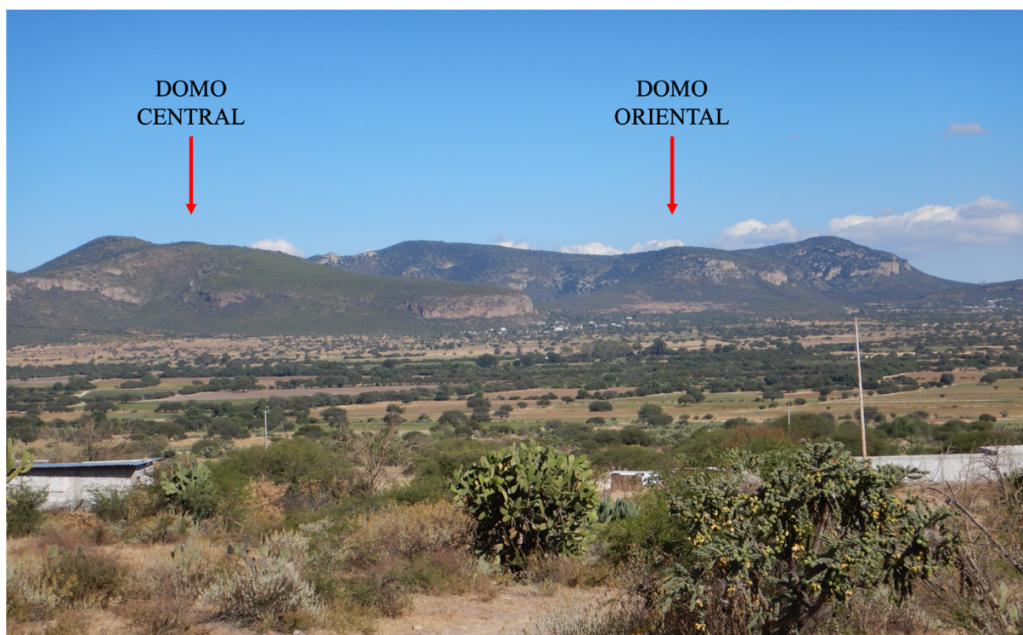


Figura 9.- Domos intracaldera de la caldera de Amazcala en una vista hacia el oriente. En primer plano el domo Central y en segundo plano el domo Oriental.

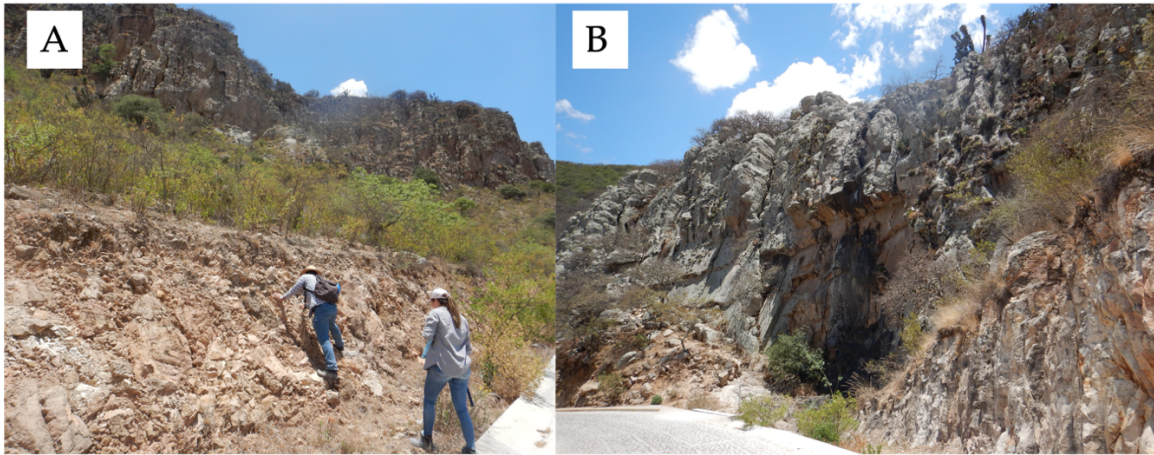


Figura 10.- Aspecto general del domo Oriental en su flanco oriental a lo largo de cortes de carretera. A) Depositos piroclasticos subyaciendo al domo oriental. B) Lavas lajeadas con columnas de enfriamiento.

4.2.3 *Unidades litoestratigráficas post-Caldera*

4.2.3.1 Andesita Cimatarío

Sucesión de flujos de lava andesítica que son producto de erupciones del volcán Cimatarío con una edad de 5.6 ± 0.4 Ma (Aguirre-Díaz & López-Martínez, 2001; Aguirre-Díaz, 2008a), llegando a formar un volcán escudo que se encuentra al sur de la ciudad de Querétaro.

4.2.3.2 Andesita Cenizas

Lavas asociadas a pequeños conos de escoria y probablemente a conductos fisurales, los cuales en la actualidad se muestran como diques estrechos de hasta 0.5 m de espesor (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001). La edad estimada para estos flujos es de 5.2 ± 0.2 Ma (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001). La roca es andesita basáltica y contiene fenocristales de olivino, piroxeno y plagioclasa que se superponen a la pómez Ezequiel Montes, la ignimbrita Colón y los domos de lava del anillo (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001).

4.2.3.3 Basalto de San José El Alto

Sucesión de lavas relacionadas al volcán escudo San José, que se ubica unos kilómetros al oeste de la caldera de Amazcala (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001). Esta unidad no está fechada, pero cubre la pómez Ezequiel Montes y la ignimbrita Colón.

4.2.3.4 Depósitos fluvio-lacustres

Los depósitos fluvio-lacustres se encuentran intercalados con las andesitas de meseta miocénicas y las andesitas y basaltos más jóvenes de los volcanes Cimatarío, Cenizas y San José El Alto (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001; Aguirre-Díaz, 2008a). Estos depósitos consisten principalmente en arena fina y arcilla acumulada en un lago (Aguirre-Díaz et al., 2005).

5 RESULTADOS

5.1 Descripción de las unidades analizadas en este estudio.

5.1.1 *Unidad Pómez Ezequiel Montes*

Depósitos de caída de pómez de color gris claro y naranja claro con espesores de hasta 38 m en la localidad tipo. Se compone de lapilli de pómez con tamaños variados que van desde 2 mm a 67 mm, clastos angulosos y soporte grano a grano (Fig. 7). Los estratos de coloración naranja claro se deben a retrabajo por agua de los diferentes depósitos de lapilli, indicando que la unidad está formada por varios eventos eruptivos, con breves interrupciones entre ellos.

Las texturas del lapilli de pómez (Muestra Amaz-01, Tabla 1) son vítrea-fibrosa, casi holohialina, con hasta un 3 vol.% de fenocristales de sanidino, cuarzo y óxidos de Fe-Ti en una matriz de vidrio vesiculado (Fig. 11). Los cristales en ocasiones forman

glomerocristales (Fig. 11E, F) y se presentan con formas anhedrales a subhedrales y algunos fracturados. El cuarzo esta redondeado por reabsorción. La textura general es hipohialina (casi holohialina), piroclástica fibrosa, en ocasiones cierto arreglo semi-circular (Fig. 11G) por tratarse de un fragmento de pómez.

Tabla 1.- Descripción de muestras representativas

<i>Muestra</i>	<i>Unidad</i>	<i>Coordenadas</i>	<i>Descripción</i>
<i>Amaz-01</i>	Pómez Ezequiel Montes	20° 42' 0.1'' Lat. N, 99° 58' 36.1'' Long. O.	Secuencia de caída pliniana que consiste en pómez y ceniza intercalados con depósitos de oleadas piroclásticas.
<i>Amaz-02</i>	Ignimbrita Colón	20° 46' 21.2'' Lat. N, 100° 3' 43.4'' Long. O.	Ignimbritas riolíticas y depósitos de oleadas piroclásticas.
<i>Amaz-04</i>	Depósito de oleada piroclástica del Domo Oriental	20° 44' 59.5'' Lat. N, 100° 5' 53.5'' Long. O.	Oleada piroclástica asociada al Domo Oriental
<i>Amaz-05</i>	Brecha de la Unidad Domo Oriental	20° 45' 4.8'' Lat. N, 100° 6' 1.5'' Long. O.	Autobrechas asociadas a las lavas tipo colada del Domo Oriental
<i>Amaz-06</i>	Domo Oriental	20° 45' 4.6'' Lat. N, 100° 6' 18.7'' Long. O.	Lava riolítica con dos tipos de textura, una con escasa desvitrificación y otra con mayor desvitrificación
<i>Amaz-07</i>	Domo Central	20° 44' 40'' Lat. N, 100° 9' 28'' Long. O.	Domo de lava riolítico con flujo lobular con bandeamiento de flujo y obsidiana

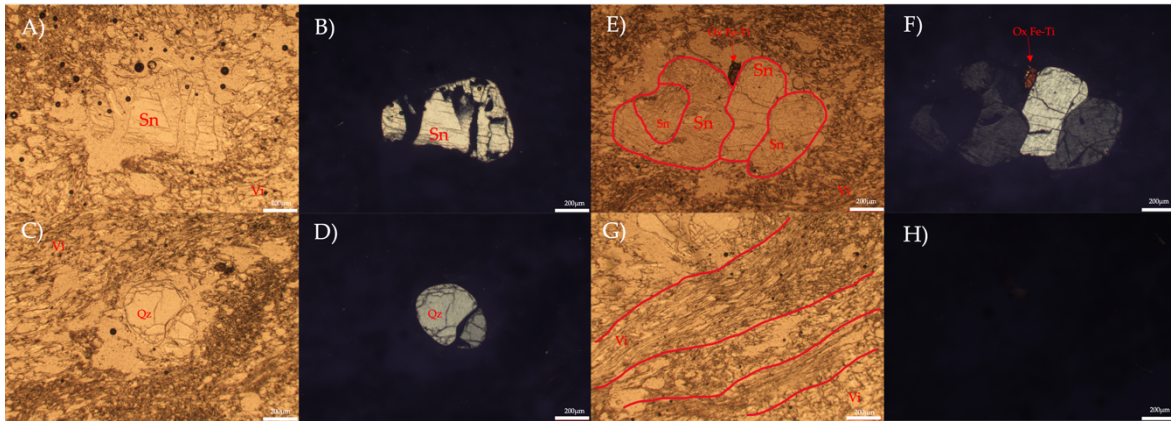


Figura 11.- Fotomicrografías de muestras de la unidad Pómez Ezequiel Montes (Sn-sanidino, Qz-Cuarzo, Vi-Vidrio, Ox-Óxido, Fe-Hierro, Ti-Titanio). A) Imagen con luz paralela de un fragmento de pómez donde se muestra un sanidino en una matriz de vidrio vesiculado. B) Imagen de A con nicoles cruzados, mostrando matriz isotrópica. C) Imagen con luz paralela de un fragmento de pómez donde se muestra un cuarzo en una matriz de vidrio vesiculado. D) Imagen de C con nicoles cruzados mostrando matriz isotrópica. E) Imagen con luz paralela de un fragmento de pómez donde se muestra glomerocrystal de sanidinos y un pequeño mineral opaco en una matriz de vidrio vesiculado. F) Imagen de E con nicoles cruzados mostrando una matriz isotrópica. G) Imagen con luz paralela de un fragmento de pómez donde se muestra una textura piroclástica compuesta de esquirlas de vidrio con ligero bandeamiento. H) Imagen de G con nicoles cruzados mostrando un área de la lámina delgada totalmente isotrópica.

5.1.2 Unidad Ignimbrita Colón

Es una ignimbrita masiva blanca con espesores mínimos de 80 m, no soldada, con matriz de ceniza, pobre en cristales y rica en pómez, con tamaños muy variados de hasta 30 cm. En algunos sitios incluye depósitos de PDCs diluidos (Muestra Amaz-02, Tabla 1)

La ignimbrita tiene textura casi holohialina con muy pobre contenido de fenocristales (0-3 vol.%) de cuarzo y sanidino con forma anhedral a subhedral, en una matriz vítrea vesiculada, que incluye fragmentos de pómez y esquirlas de vidrio (Fig. 12). La ignimbrita no contiene líticos en las muestras estudiadas, y está casi totalmente compuesta por fragmentos de pómez y cenizas de esquirlas de vidrio, los cuales muestran soldamiento de muy bajo grado.

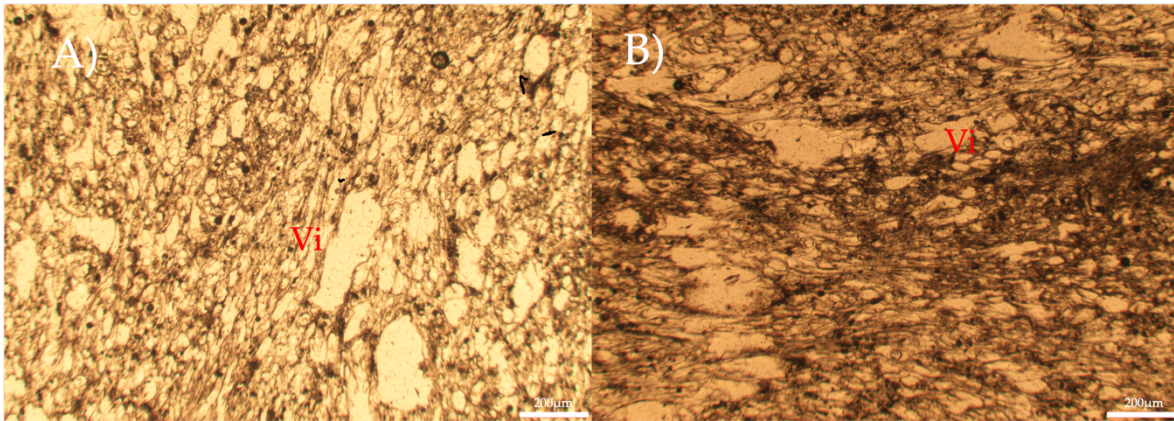


Figura 12.- Fotomicrografías de muestras de la unidad Ignimbrita Colón (Vi-Vidrio). A) Imagen con luz paralela de un fragmento de la ignimbrita mostrando textura piroclástica compuesta de esquirlas de vidrio. B) Imagen con luz paralela mostrando otra zona de la ignimbrita diferente de A.

5.1.3 Unidad Domos Intracaldera

5.1.3.1 Domo Oriental

Lava riolítica con dos tipos de textura, una con escasa desvitrificación (Fig. 15) y otra con mayor desvitrificación (Fig. 16; Muestra Amaz-06, Tabla 1). La primera es hipohialina con 10 vol.% de cristales de cuarzo, sanidino y óxidos de Fe-Ti, en una matriz de vidrio. Los cristales presentan formas anhedrales (cuarzo) a subhedrales (sanidino) con presencia de fracturas. Hay presencia de esferulitas por procesos de desvitrificación (Fig. 15A, E). La roca con mayor desvitrificación es hipocristalina con 15 vol.% de cristales, incluyendo sanidino, cuarzo, plagioclasa, biotita y óxidos Fe-Ti, en una matriz parcialmente desvitrificada a un arreglo microcristalino de cuarzo y feldespato potásico (Fig. 16). Los sanidinos tienen formas subhedrales a diferencia del cuarzo y plagioclasa que son anhedrales. Todos los cristales están fracturados. Es común observar glomerocristales de los mismos minerales (Fig. 15E).

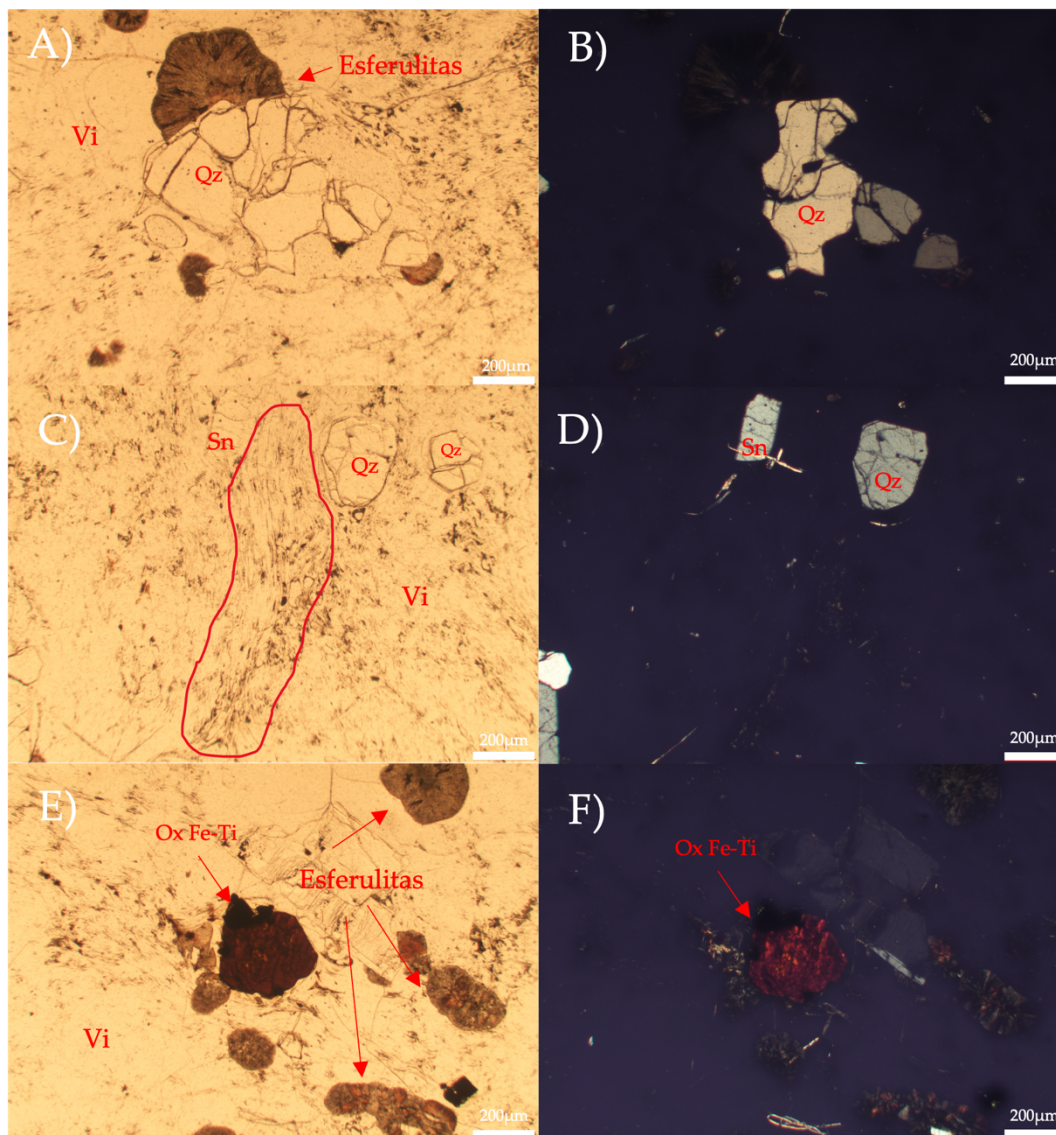


Figura 13.- Fotomicrografías de la brecha del domo oriental (Sn-sanidino, Qz-Cuarzo, Vi-Vidrio, Ox-Óxido, Fe-Hierro, Ti-Titanio). A) Imagen con luz paralela de un fragmento de lava riolítica donde se muestra un cuarzo en una matriz de vidrio vesiculado con presencia de esferulitas. B) Imagen de A con nicoles cruzados mostrando matriz isotrópica. C) Imagen con luz paralela de un fragmento de lava riolítica donde se muestra cristales de cuarzo y sanidino en una matriz vesiculada. D) Imagen de C con nicoles cruzados mostrando matriz isotrópica. E) Imagen con luz paralela mostrando otra zona de la lava riolítica diferente a C, donde se muestra un cristal de óxido de Fe-Ti y esferulitas. F) Imagen de E con nicoles cruzados mostrando matriz isotrópica.

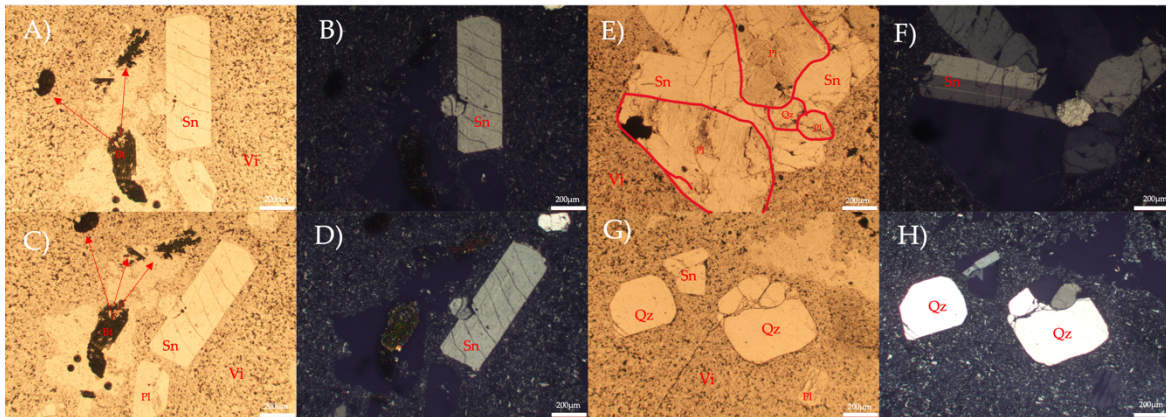


Figura 14.- Fotomicrografías de la brecha del domo oriental (Sn-sanidino, Qz-Cuarzo, Vi-Vidrio, Pl-plagioclasa, Ox-Óxido, Fe-Hierro, Ti-Titanio). A) Imagen obtenida con luz paralela de un fragmento de brecha donde se muestra un cuarzo en una matriz de vidrio vesiculado con presencia de esferulitas. B) Imagen obtenida con nicoles cruzados de A. C) Imagen obtenida con luz paralela de un fragmento de brecha donde se muestra un sanidino y esferulitas en una matriz de vidrio vesiculado. D) Imagen obtenida con nicoles cruzados de C. E) Imagen obtenida con luz paralela mostrando otra zona de la brecha diferente a C. F) Imagen obtenida con nicoles cruzados de E. G) Imagen obtenida con luz paralela de un fragmento de brecha donde se muestran cristales de sanidino y plagioclasa en una matriz de vidrio vesiculado. H) Imagen obtenida con nicoles cruzados de G.

5.1.3.1.1 Depósito de oleada piroclástica del Domo Oriental

Oleada piroclástica asociada al Domo Oriental, presenta estratificación cruzada y poco material sólido indicando una gran energía (Muestra Amaz-04, Tabla 1), además, se observó foliación de flujo que nos habla de diferencias de velocidades.

Este depósito presenta una textura casi holohialina, piroclástica, con muy poco contenido en cristales (0-3 vol%), principalmente sanidino y escaso cuarzo, los cuales se encuentran muy fracturados y con formas anhedrales, en una matriz compuesta de esquirlas de vidrio y fragmentos de pómez, que en ocasiones muestra arreglos semi-circulares y planares de los fragmentos de vidrio (Fig. 13C, E), debido a un grado medio de soldamiento.

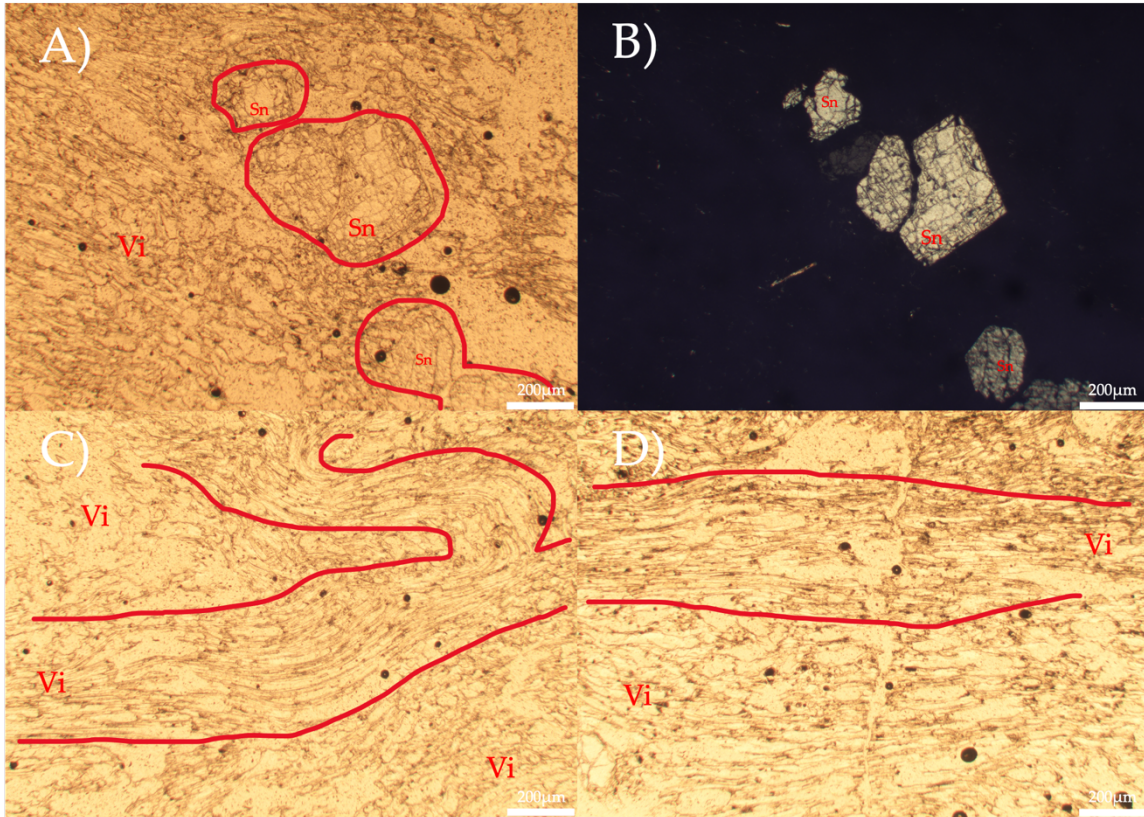


Figura 15.- Fotomicrografías de muestras de la oleada piroclástica del domo central (Sn-sanidino, Vi-Vidrio). A) Imagen con luz paralela de un fragmento de oleada piroclástica donde se muestran cristales de sanidinos en una matriz de esquirlas de vidrio. B) Imagen de A con nicoles cruzados mostrando una matriz isotrópica. C) Imagen con luz paralela de un fragmento de oleada piroclástica mostrando una matriz compuesta de esquirlas de vidrio con ligero soldamiento dando lugar a micropliegues. D) Imagen con luz paralela mostrando otra zona de la oleada piroclástica diferente a C.

5.1.3.1.2 Brecha del Domo Oriental

Autobrechas asociadas a las lavas tipo colada del Domo Oriental, formada por bloques angulosos, de hasta 60 cm de diámetro, de riolita con foliación de flujo, en general desvitrificada, pero con bloques de obsidiana ocasional (Muestra Amaz-05, Tabla 1).

La textura petrográfica en uno de los clastos de obsidiana es hipohialina, con 10 vol.% de cristales de cuarzo, sanidino y plagioclasa en una matriz de vidrio (Fig. 16). Los cristales son de formas subhedrales y algunos anhedrales. Se observan pequeñas y escasas esferulitas por procesos de desvitrificación (Fig. 15A, C, E). En un bloque

de lava desvitrificada la textura es hipocristalina con 15 vol.% de cristales, incluyendo sanidino, cuarzo, plagioclasa, biotita y óxidos Fe-Ti, en una matriz parcialmente desvitrificada a un arreglo microcristalino de cuarzo y feldespatopotásico (Fig. 17). Los sanidinos tienen formas subhedrales a diferencia del cuarzo y plagioclasa que son anhedrales. Todos los cristales están fracturados. Es común observar glomerocristales de los mismos minerales (Fig. 16E).

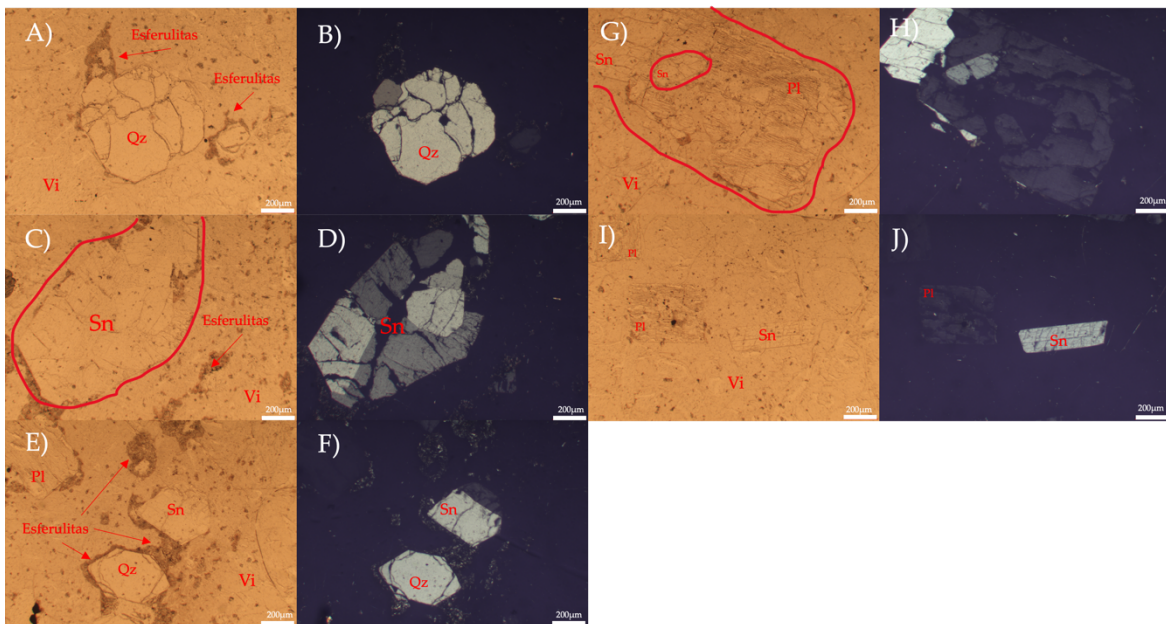


Figura 16.- Fotomicrografías de la brecha del Domo Oriental (Sn-sanidino, Qz-Cuarzo, Vi-Vidrio, Pl-plagioclasa, Ox-Óxidos). A) Imagen con luz paralela de un fragmento de brecha donde se muestra un cuarzo en una matriz de vidrio con presencia de esferulitas. B) Imagen de A con nicoles cruzados mostrando matriz isotrópica. C) Imagen con luz paralela de un fragmento de brecha donde se muestra un sanidino en una matriz de vidrio con esferulitas. D) Imagen de C con nicoles cruzados con una matriz isotrópica. E) Imagen con luz paralela mostrando otra zona de la brecha diferente a C con sanidino, cuarzo y plagioclasa en una matriz de vidrio con esferulitas. F) Imagen de E con nicoles cruzados con una matriz isotrópica. G) Imagen con luz paralela de un fragmento de brecha con sanidino y plagioclasa en una matriz de vidrio. H) Imagen de G con nicoles cruzados mostrando una matriz isotrópica. I) Imagen con luz paralela mostrando otra zona de la brecha diferente a G con sanidino y plagioclasa en una matriz de vidrio. J) Imagen de I con nicoles cruzados con una matriz isotrópica.

5.1.3.2 Domo Central

Esta unidad es un domo intracaldera en el centro de la caldera, compuesto de lava riolítica con flujo lobular con bandeamiento de flujo y obsidiana (Muestra Amaz-07,

Tabla)1. Llega a formar foliación subhorizontal a inclinada, y columnas verticales por enfriamiento. La roca está casi totalmente devitrificada y en partes muy oxidada.

Texturalmente, la riolita es hipocrystalina y en zonas hipohialina, con 5-10 vol.% de fenocristales incluyendo cuarzo, sanidino, biotita y óxidos de Fe-Ti, en una matriz generalmente desvitrificada a un mosaico microcristalino de cuarzo y feldespato potásico (Fig.17), pero se conservan bandas todavía con matriz vítrea con zonas esferulíticas (Fig.18). La biotita está completamente reemplazada por óxidos de Fe-Ti. También se observan glomero-cristales de sanidino. En general, los cristales están fracturados y tienen formas anhedrales a subhedrales.

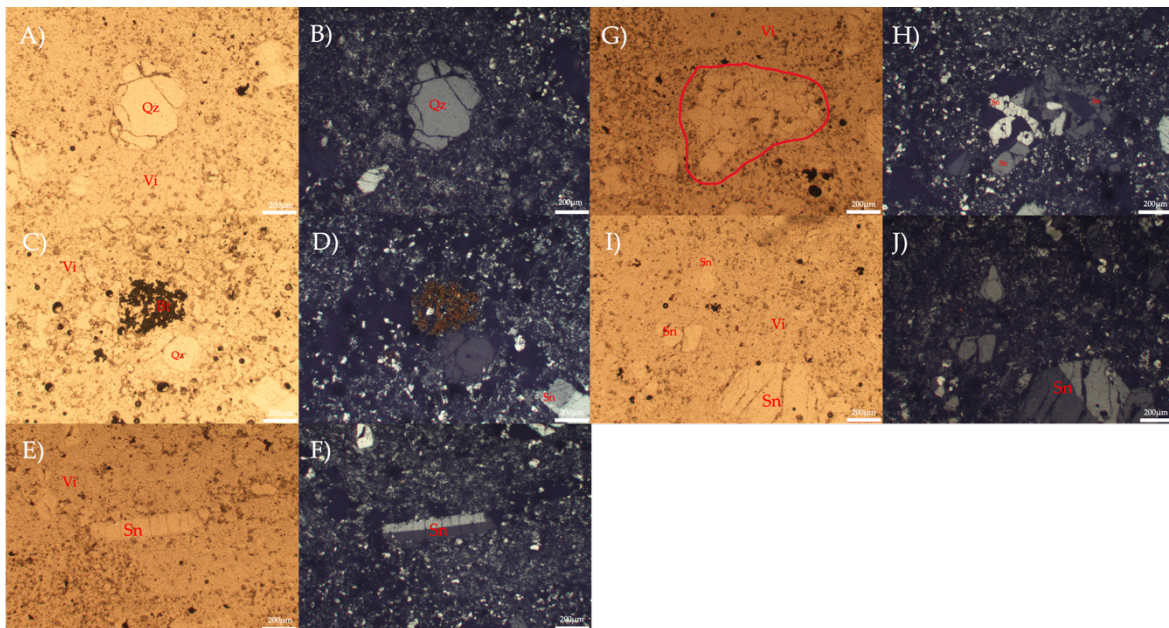


Figura 17.- Fotomicrografías del domo central (Sn-sanidino, Qz-Cuarzo, Vi-Vidrio, Bt-biotita). A) Imagen con luz paralela de un fragmento de domo central donde se muestra un cuarzo en una matriz desvitrificada a un mosaico de cuarzo y feldespato potásico. B) Imagen de A con nicols cruzados mostrando matriz isotrópica. C) Imagen con luz paralela de un fragmento de domo central donde se muestra un cristal de biotita. D) Imagen de C con nicols cruzados mostrando matriz isotrópica. E) Imagen con luz paralela mostrando un cristal de sanidino. F) Imagen de E con nicols cruzados mostrando matriz isotrópica. G) Imagen con luz paralela de un glomero-cristal de sanidinos. H) Imagen de G con nicols cruzados mostrando matriz isotrópica. I) Imagen con luz paralela mostrando otra zona del domo central diferente a G mostrando cristales de sanidino. J) Imagen de I con nicols cruzados mostrando matriz isotrópica.

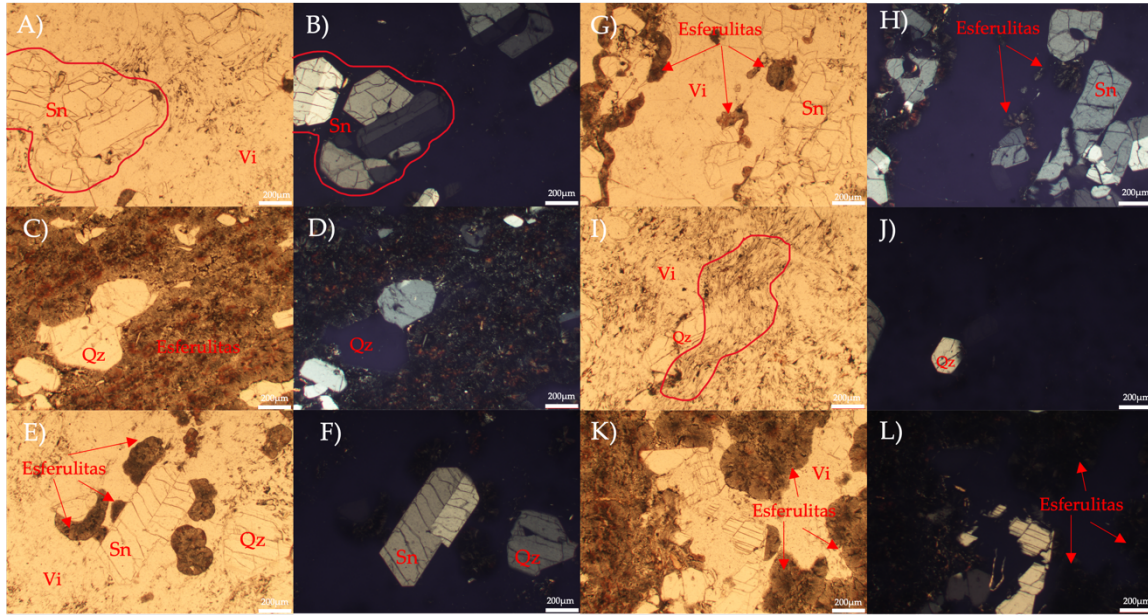


Figura 18.- Fotomicrografías del domo central (Sn-sanidino, Qz-Cuarzo, Vi-Vidrio). A) Imagen con luz paralela de un fragmento de domo central donde se muestra un glomero-cristal de sanidino en una matriz de vidrio. B) Imagen de A con nicoles cruzados mostrando matriz isotrópica. C) Imagen con luz paralela de un fragmento de domo central donde se muestra un cristal de cuarzo en una matriz desvitrificada en forma de esferulitas. D) Imagen de C con nicoles cruzados mostrando matriz isotrópica. E) Imagen con luz paralela mostrando cristales de cuarzo y sanidino en una matriz de vidrio donde hay presencia de desvitrificación en forma de esferulitas. F) Imagen de E con nicoles cruzados mostrando matriz isotrópica. G) Imagen con luz paralela de otra zona del domo central diferente a E. H) Imagen de G con nicoles cruzados mostrando matriz isotrópica. I) Imagen con luz paralela mostrando otra zona del domo central diferente a E mostrando una matriz de vidrio vesiculada. J) Imagen de I con nicoles cruzados mostrando matriz isotrópica. K) Imagen con luz paralela de una zona del domo central donde se muestra un cristal de sanidino con zonas de desvitrificación en forma de esferulitas.

5.2 Geoquímica de la caldera de Amazcala

Todos los productos de la caldera se clasifican como riolitas con alto contenido de sílice ($\text{SiO}_2 = 73\text{-}75 \text{ wt. } \%$; Fig. 19A, B), con valores de K_2O de alrededor del 5 wt. % (Aguirre-Díaz & Morton-Bermea, 2018). Estos autores indican que todos los productos son peralcalinos (Fig. 19C). Una vez demostrado que se trata de riolitas peralcalinas Aguirre-Díaz y Morton-Bermea (2018) las clasifican como comenditas utilizando la clasificación de MacDonald (1974) y MacDonald et al. (2011). Se confirma lo anterior al utilizar la clasificación con los elementos traza Zr/TiO_2 vs. SiO_2 (Fig. 19D) y la clasificación con los elementos Nb/ Y vs Zr/TiO_2 (Fig. 19E).

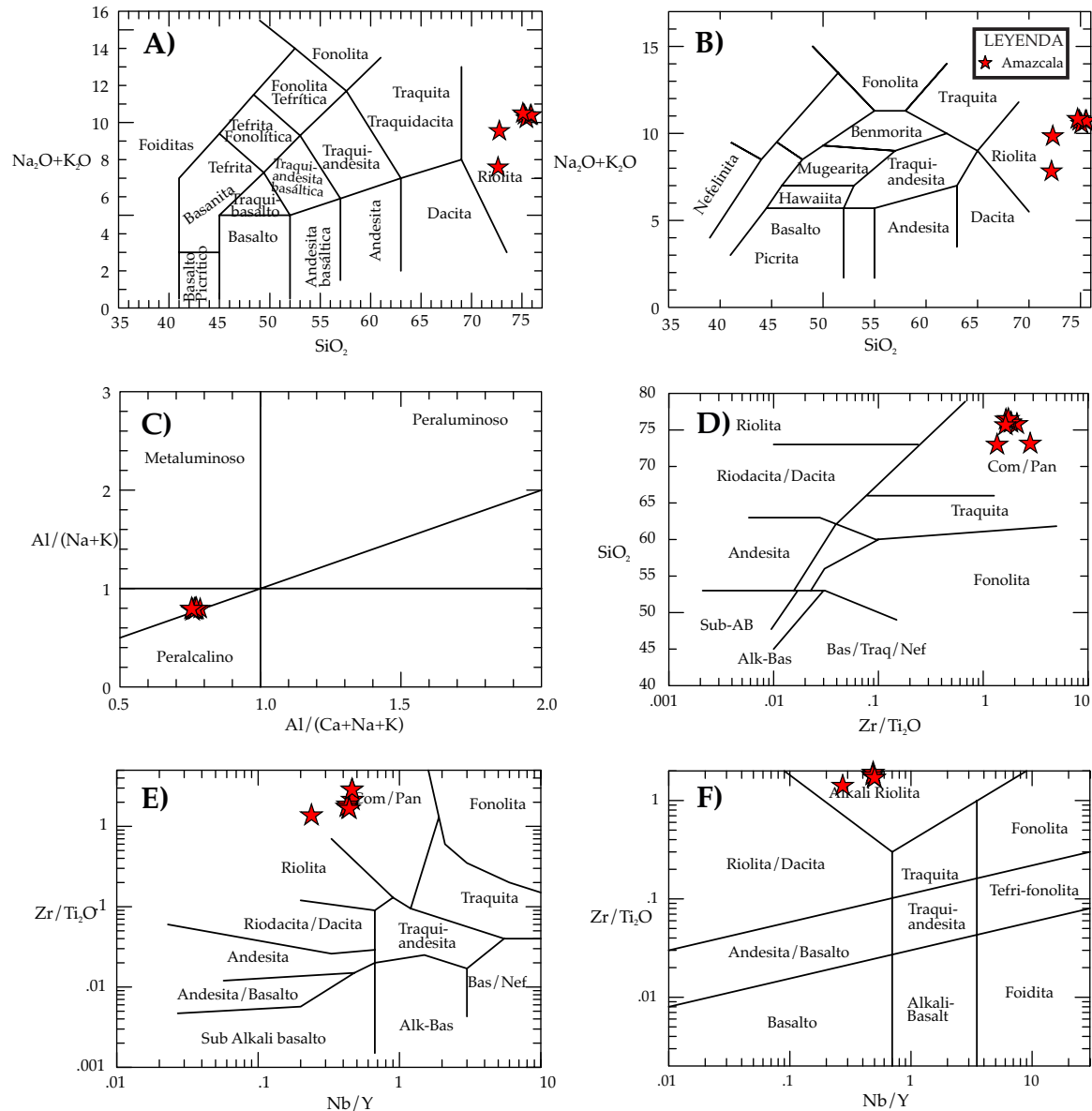


Figura 19.- Diagramas de clasificación para las rocas volcánicas de la caldera de Amazcala utilizando elementos mayores (A, B y C), y elementos traza (D, E y F). A) Clasificación Total Álcalis vs. Sílica (TAS; Le Bas et al., 1986). B) Clasificación Álcali-Sílica (Cox et al., 1979). C) Clasificación ANK vs. ACNK (Maniar y Piccoli, 1989). D) Clasificación Zr/TiO_2 vs. SiO_2 (Winchester y Floyd, 1977). E) Clasificación Nb/Y vs. Zr/TiO_2 (Winchester y Floyd, 1977). F) Clasificación Nb/Y vs. Zr/TiO_2 para rocas alteradas (Winchester y Floyd, 1977) modificado por Pearce (1996). Nota: en la leyenda en lo que se refiere a Amazcala, las muestras representan las 3 fases principales de la caldera: Pómez Ezequiel Montes, Ignimbrita Colón, Domos post colapso.

En un arco volcánico de margen continental esperamos composiciones calcoalcalinas, como se observa en las calderas de Humeros, Huichapan y Amealco (Ferriz y Mahood, 1984; Milán et al., 1993; Aguirre-Díaz, 1996, 2001a, 2001b; Aguirre-

Diaz et al., 1997, 1998; Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2009). Sin embargo, los productos de la caldera Amazcala tienen características químicas, es decir, son riolitas hiperalcalinas con poco contenido en fenocristales que no se observan en la mayoría de las calderas silíceas del CVM (Aguirre-Díaz y Morton-Bermea, 2018).

5.3 Clasificación geoquímica de Amazcala comparada con otras calderas del mundo

Para obtener la clasificación química de las rocas de otras calderas del mundo se utilizaron los diagramas de SiO_2 vs. $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (Le Bas et al., 1986; Cox et al., 1979) (Fig. 20 A, B), donde todas las muestras seleccionadas se clasifican como riolitas.

Para obtener el carácter metaluminoso o peraluminoso se empleó la relación molar de $\text{Al}/(\text{Na}+\text{K})$ vs. $\text{Al}/(\text{Ca}+\text{Na}+\text{K})$ de Maniar y Piccoli (1989; Fig. 20C), donde se observan riolitas peralcalinas, peraluminosas y en menor proporción metaluminosas, que corresponden a lugares con regímenes magmáticos de intraplaca para las peralcalinas y de subducción para las peraluminosas y metaluminosas.

Utilizando la clasificación de rocas volcánicas de Winchester y Floyd (1977) y los elementos traza relativamente inmóviles (Nb/Y y Zr/TiO_2 ; Fig. 20 D, E), se observa que los productos de otras calderas en el mundo caen en los campos de comenditas/panteleritas, riolitas, y algunas en el de traquitas, que corresponden a regímenes magmáticos intraplaca e intraplaca-subducción, y en particular Amazcala en el campo de las comenditas.

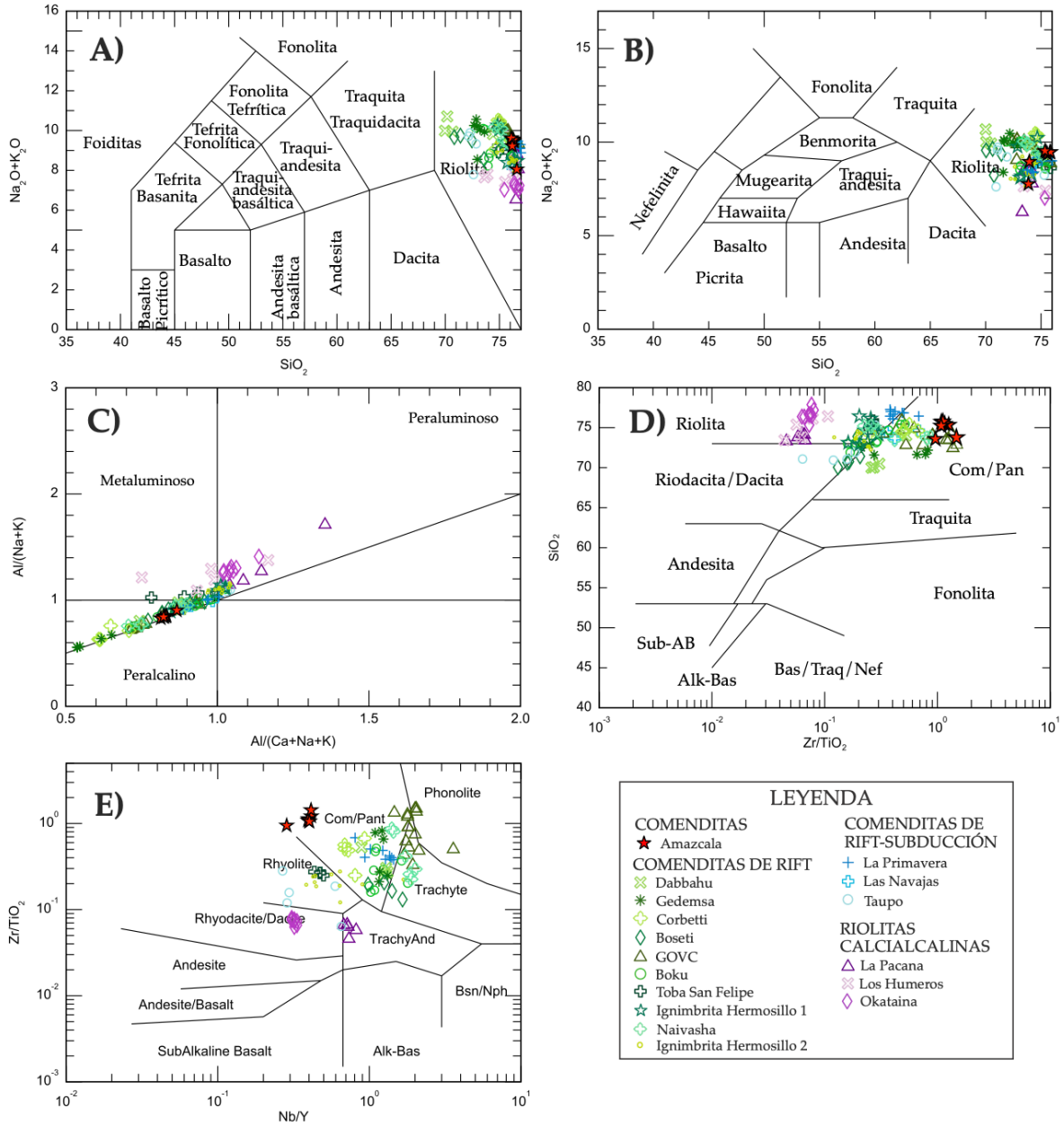


Figura 20.- Diagramas de clasificación de rocas volcánicas. A) Diagrama Total Álcalis vs. Sílica (TAS; Le Bas et al., 1986). B) Diagrama Álcali-Silica (Cox-Bell-Pankhurst, 1979). C) Diagrama ANK vs ACNK (Maniar y Piccoli, 1989). D) Diagrama Zr/TiO_2 vs. SiO_2 (Winchester y Floyd, 1977). E) Diagrama Nb/Y vs. Zr/TiO_2 (Winchester y Floyd, 1977). Nota: en la leyenda en lo que se refiere a Amazcala, las muestras representan las 3 fases principales de la caldera: Pómez Ezequiel Montes, Ignimbrita Colón, Domos post colapso.

5.4 Clasificación del ambiente tectónico según la geoquímica

Para clasificar el ambiente tectónico de las comenditas y riolitas alcalinas de los diferentes grupos se utilizaron los diagramas de clasificación de granitos propuestos por Pearce et al. (1984) a partir de las relaciones de Y+Nb vs Rb (Fig. 21A) e Y vs Nb (Fig. 21B). La caldera de Amazcala y las comenditas de regímenes de rift presentan una afinidad por ambientes intraplaca (Fig. 21A, B) y las riolitas calcialcalinas presentan afinidad de arco volcánico.

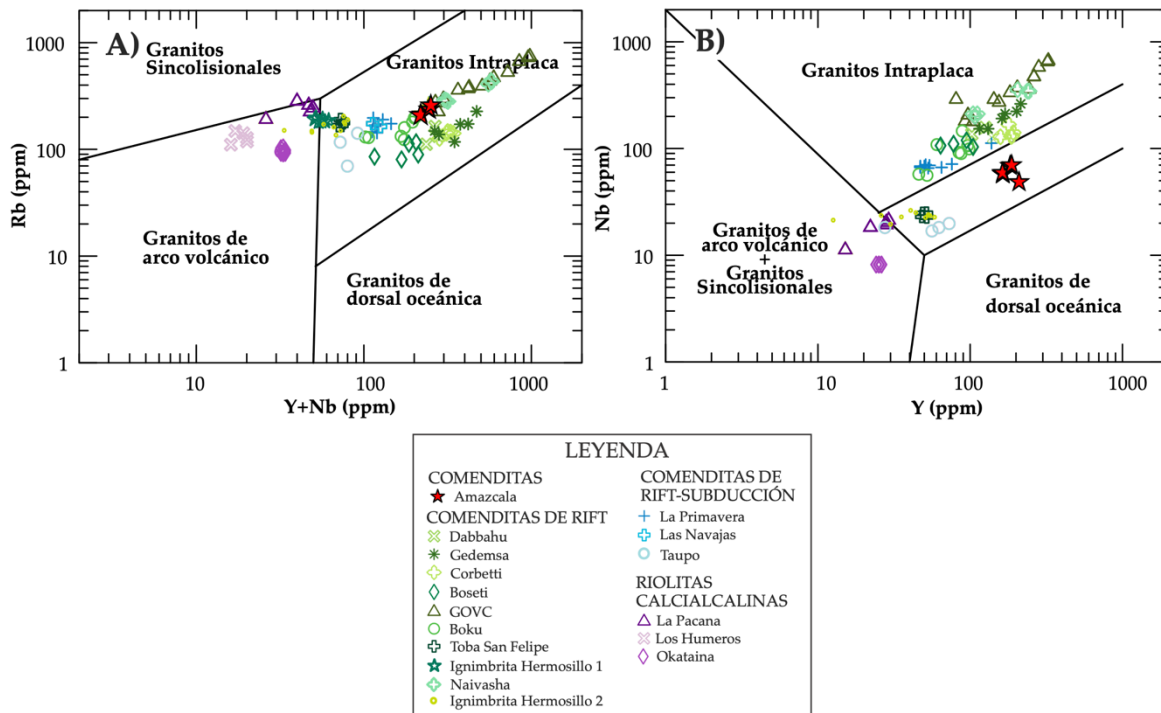


Figura 21.- Diagramas de discriminación tectonomagmática para granitos, que equivalen a magmas riolíticos (Pearce et al.,1984). A) Diagrama Y+Nb vs. Rb. B) Diagrama Y vs. Nb. Nota: en la leyenda en lo que se refiere a Amazcala, las muestras representan las 3 fases principales de la caldera: Pómez Ezequiel Montes, Ignimbrita Colón, Domos post colapso.

5.5 Diagramas de multi-elemento de riolitas alcalinas

Se elaboraron diagramas multielementales normalizados a condritas (Sun, 1980; Thompson, 1982) y manto primitivo (Sun y McDonough, 1989) de las comenditas de

la caldera de Amazcala y de las comenditas de otras calderas en el mundo. Lo anterior, con la finalidad de una comparación entre los diferentes sitios y poder establecer similitudes o diferencias de los patrones graficados.

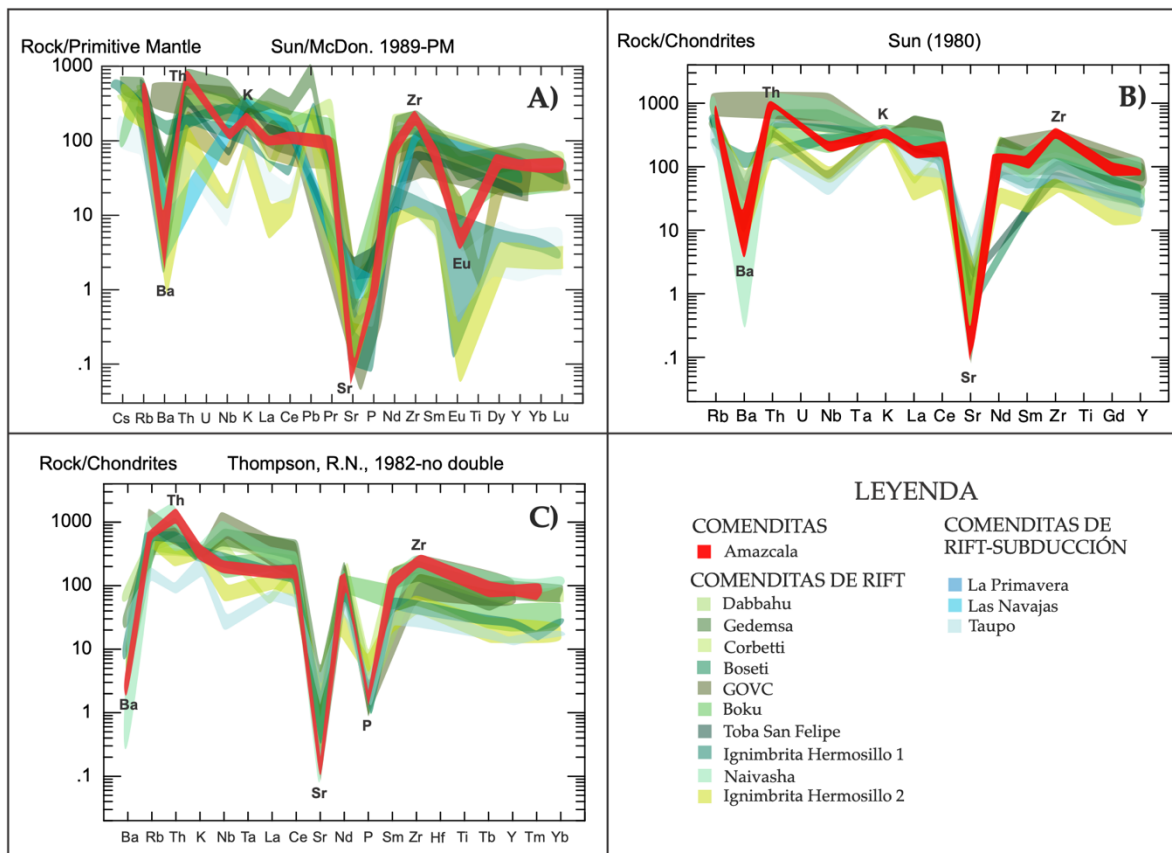


Figura 22.- Diagramas multielementos para comenditas. A) Diagrama normalizado a manto primitivo (Sun y McDonough, 1989). B) Diagrama normalizado a condritas (Sun, 1980). C) Diagrama normalizado a condritas (Thompson, 1982). Nota: en la leyenda en lo que se refiere a Amazcala, las muestras representan las 3 fases principales de la caldera: Pómez Ezequiel Montes, Ignimbrita Colón, Domos post colapso.

La Figura 22A del diagrama multielemental normalizando a manto primitivo (Sun y McDonough, 1989) muestra anomalías negativas en los elementos Ba, Sr y Eu y anomalías positivas en Th, K y Zr. La Figura 22B, normalizado a condritas (Sun, 1980), muestra anomalías negativas en Ba y Sr y anomalías positivas en Th, K y Zr. La Figura 22C, normalizado a condritas (Thompson, 1982), muestra anomalías negativas en Ba, Sr y P y anomalías positivas en Th y Zr.

En los tres diagramas multielementales podemos observar que las comenditas de la caldera de Amazcala siguen un patrón que se asemeja a las comenditas de otras calderas en el mundo. Algunos patrones no siguen totalmente las tendencias generales de la base de datos para las comenditas, ya que en estos casos los datos reportados no incluyen todos los elementos que se muestran en las gráficas.

5.6 Diagramas multi-elemento de riolitas calcialcalinas

A modo de comparación se realizaron diagramas multielementales de las riolitas calcialcalinas de otras calderas en el mundo. En todos los diagramas (Fig. 23A, C) se observa una gran diferencia entre los patrones de las comenditas de Amazcala y las riolitas calcialcalinas. Por ejemplo, las riolitas calcialcalinas de La Pacana (Andes) tienen anomalías negativas en Nb y Zr y marcadamente en Ti y forman anomalías negativas en el par Sr-P. En las riolitas calcialcalinas de Los Humeros no se observan anomalías negativas en Nb por ausencia de datos, pero sí se observa un marcado empobrecimiento en Zr respecto a Amazcala, y anomalías negativas en Ba y Sr. Por último, las riolitas calcialcalinas de Okataina (Nueva Zelanda) muestran anomalías negativas en Nb y P y anomalías positivas en K, Pb y Yb, e igual que en Los Humeros, un marcado empobrecimiento en Zr respecto a Amazcala.

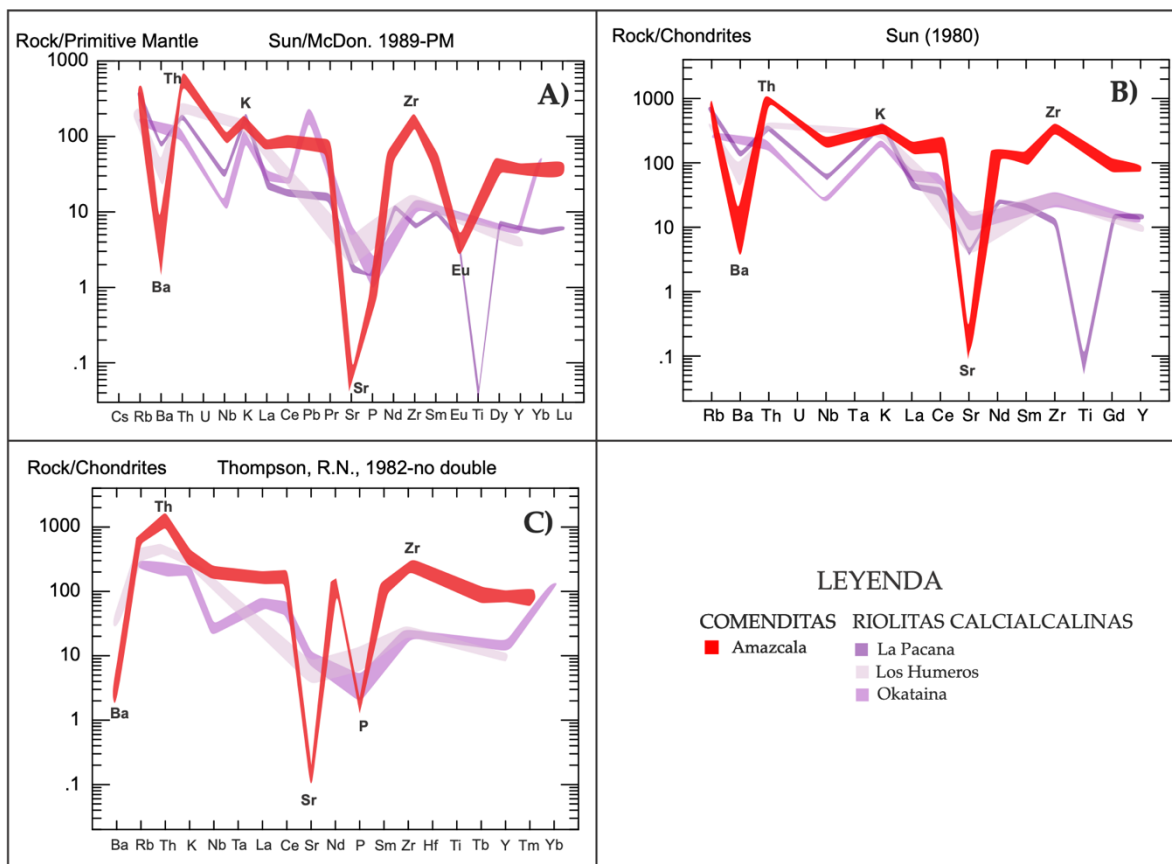


Figura 23.- Diagramas multielementos normalizados para riolitas calcialcalinas contra manto primitivo (A) y condritas (B y C). A) Diagrama normalizado a manto primitivo (Sun y McDonough, 1989). B) Diagrama normalizado a condritas (Sun, 1980). C) Diagrama normalizado a condritas (Thompson, 1982). Nota: en la leyenda en lo que se refiere a Amazcala, las muestras representan las 3 fases principales de la caldera: Pómez Ezequiel Montes, Ignimbrita Colón, Domos post colapso.

5.7 Diagramas de tierras raras de Amazcala comparadas con riolitas alcalinas y calcialcalinas

Se elaboraron diagramas de tierras raras (REE), normalizados a condritas utilizando los valores de Sun y McDonough (1989), y de Nakamura (1974), para las comenditas de Amazcala y de otras calderas en el mundo con regímenes tectónicos intraplaca y de subducción (Fig. 24). Se observan patrones con pendientes negativas en las tierras raras ligeras (LREE) para las comenditas de otras calderas y un patrón más plano para la caldera de Amazcala. Todos los casos tienen una fuerte anomalía negativa

en Eu. Las tierras raras pesadas (HREE) muestran un patrón plano en todas las calderas.

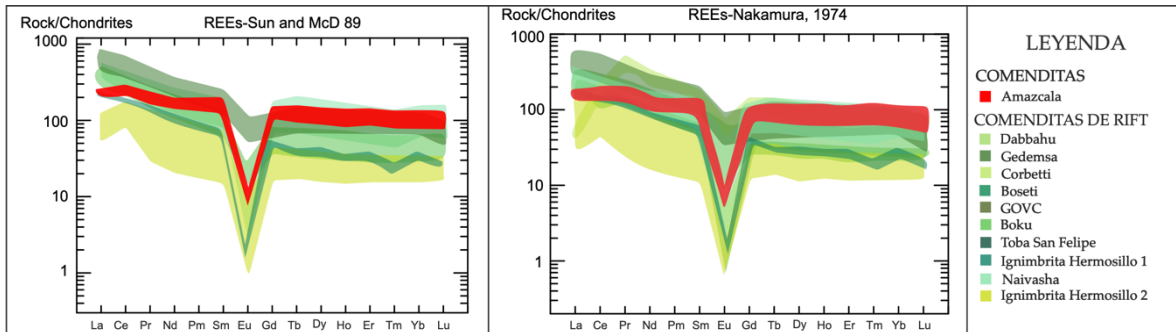


Figura 24.- Diagramas de tierras raras normalizadas a condritas para las comenditas de zonas de rift continental y su comparación con Amazcala (Sun y McDonough, 1989; Nakamura, 1974). Nota: en la leyenda en lo que se refiere a Amazcala, las muestras representan las 3 fases principales de la caldera: Pómez Ezequiel Montes, Ignimbrita Colón, Domos post colapso.

Observando la Figura 24 vemos que Amazcala muestra un mayor enriquecimiento de todas las tierras raras con respecto a las comenditas de rift-subducción de La Primavera y Taupo, y patrones ligeramente negativos en las LREE con respecto a Amazcala, mientras que las HREE muestran el mismo patrón plano.

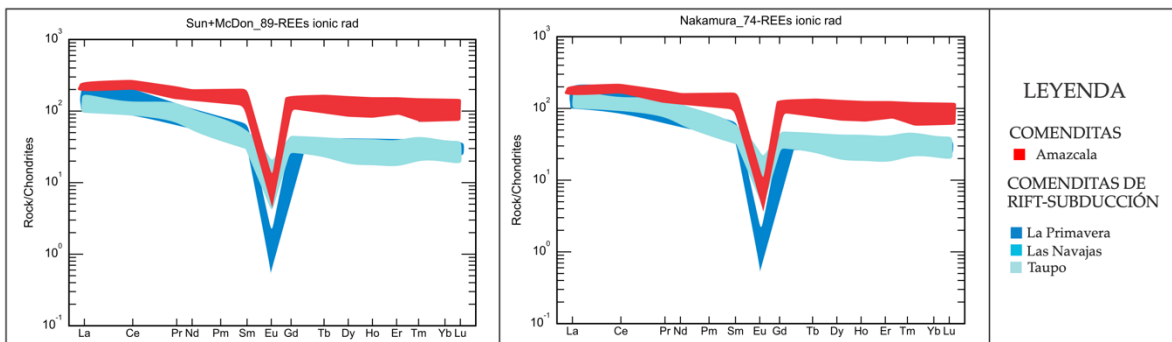


Figura 25.- Diagrama de tierras raras normalizadas a condritas para Amazcala y su comparación con La Primavera, Las Navajas y Taupo (Sun y McDonough, 1989; Nakamura, 1974). Nota: en la leyenda en lo que se refiere a Amazcala, las muestras representan las 3 fases principales de la caldera: Pómez Ezequiel Montes, Ignimbrita Colón, Domos post colapso. Nota: en la leyenda en lo que se refiere a Amazcala, las muestras representan las 3 fases principales de la caldera: Pómez Ezequiel Montes, Ignimbrita Colón, Domos post colapso.

A modo de comparación se graficaron las riolitas calcialcalinas de La Pacana (Fig. 26), en donde se observa que la caldera de Amazcala presenta un marcado

enriquecimiento de todas las tierras raras, excepto Eu, con respecto a las riolitas de margen continental calcialcalinas, y pendientes negativas en las LREE en los patrones de La Pacana, mientras que Amazcala muestra patrones planos. Además, La Pacana presenta pequeñas anomalías positivas en Ce y Tm y una anomalía ligeramente negativa en Eu.

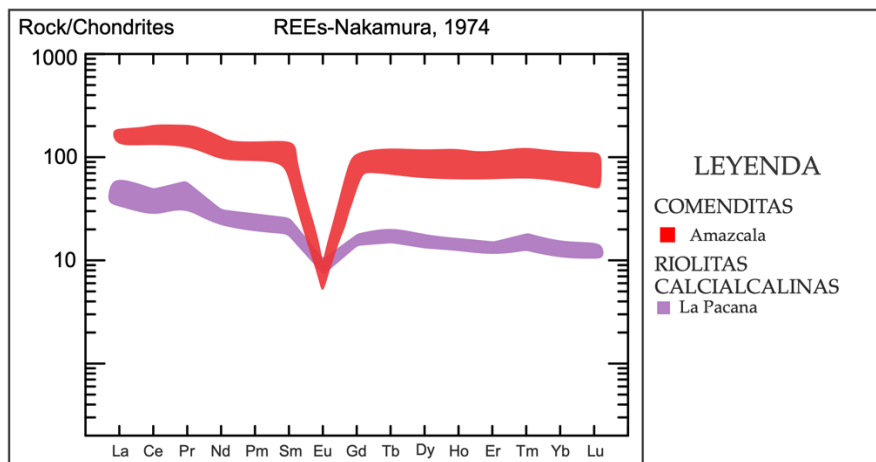


Figura 26.- Diagramas de tierras raras normalizadas a condritas para Amazcala y su comparación con riolitas calcialcanicas de La Pacana (Nakamura,1974). Nota: en la leyenda en lo que se refiere a Amazcala, las muestras representan las 3 fases principales de la caldera: Pómez Ezequiel Montes, Ignimbrita Colón, Domos post colapso. Nota: en la leyenda en lo que se refiere a Amazcala, las muestras representan las 3 fases principales de la caldera: Pómez Ezequiel Montes, Ignimbrita Colón, Domos post colapso.

5.8 Diagramas bi-elementales

5.8.1 Diagramas Harker

Para observar el comportamiento de los elementos mayores se elaboraron Diagramas Harker (1909) que incluyen a Amazcala y a los sitios en el mundo con los que se está comparando (Fig. 27). En particular, la caldera de Amazcala muestra un enriquecimiento en FeO, Al₂O₃, P₂O₅, TiO₂, MnO y Na₂O y se empobrece en Fe₂O₃, CaO y K₂O conforme se incrementa el contenido de sílice (SiO₂). Los componentes que muestran una mayor correlación con las comenditas de Amazcala son Fe₂O₃, CaO y Na₂O.

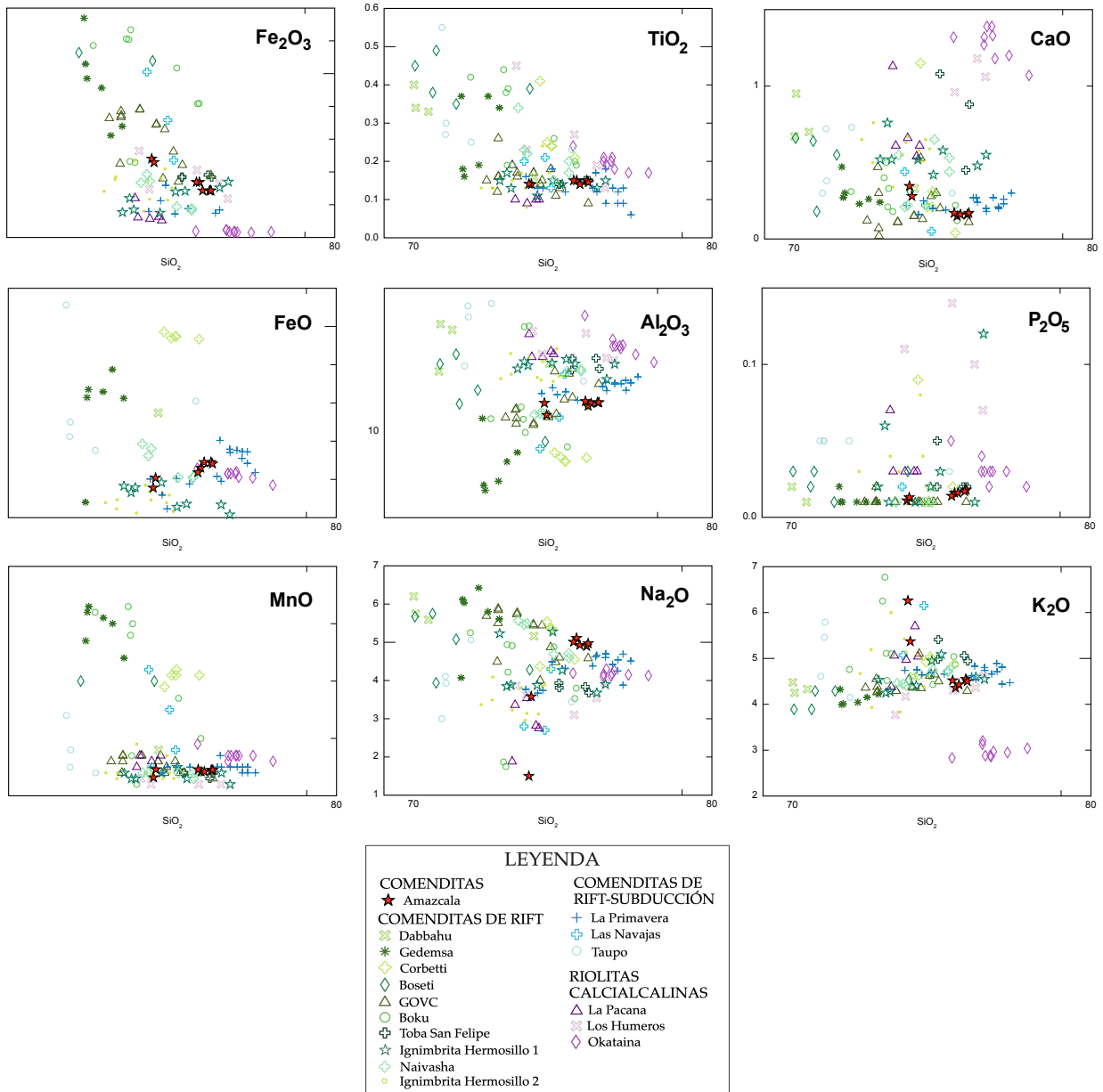


Figura 27.- Diagramas de variación Harker (1909) de elementos mayores vs. el contenido de sílica. Nota: en la leyenda en lo que se refiere a Amazcala, las muestras representan las 3 fases principales de la caldera: Pómez Ezequiel Montes, Ignimbrita Colón, Domos post colapso.

5.8.2 Diagramas HFSE

Comparando Amazcala con otros sitios en el mundo utilizando los diagramas bi-elementales con La como eje x y los elementos de alto campo de esfuerzo (HFSE) en el eje y (Fig. 28), se puede distinguir que para el Zr (Fig. 28A) Amazcala está muy

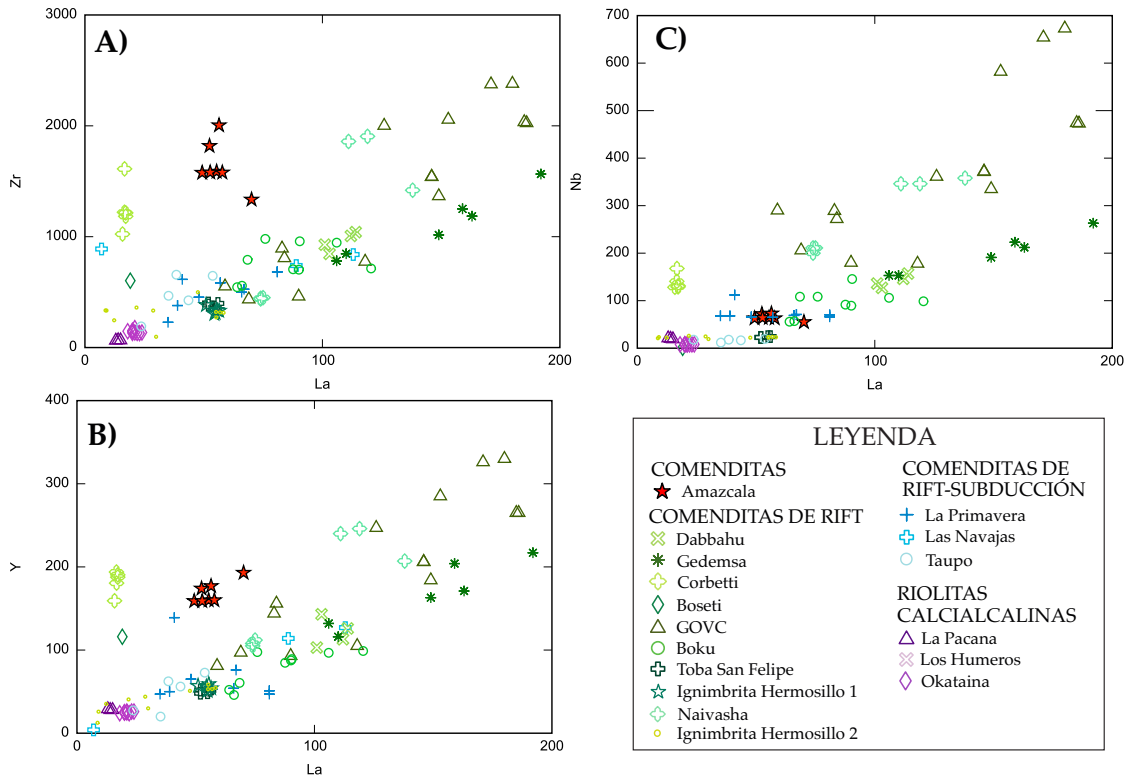


Figura 28.- Diagramas de variación bi-elementales de alto campo de esfuerzo (HFSE). A) Diagrama La vs. Zr. B) Diagrama La vs. Y. C) Diagrama La vs. Nb. Nota: en la leyenda en lo que se refiere a Amazcala, las muestras representan las 3 fases principales de la caldera: Pómez Ezequiel Montes, Ignimbrita Colón, Domos post colapso.

enriquecido con respecto a la línea de tendencia principal formada por el resto de los puntos graficados; para el Nb (Fig. 28C), Amazcala se ubica dentro de la línea de tendencia principal; y para Y (Fig. 28B), Amazcala se ubica ligeramente separado de la línea de tendencia principal. También se observa que las riolitas calcialcalinas en los 3 diagramas se agrupan como los más empobrecidos en los elementos HFSE.

5.8.3 Diagramas LREE

Para el caso de las LREE, en los diagramas bi-elementales con La como eje x (Fig. 29), se puede observar que en Ce Amazcala se encuentre en la línea de tendencia principal (Fig. 29A); en cambio, para Pr y Nd se ubica ligeramente separado de la línea de tendencia principal (Fig. 29B, C). Para Sm, Amazcala se separa de la línea

de tendencia principal (Fig. 29D), y está más enriquecida en Sm y empobrecida en La.

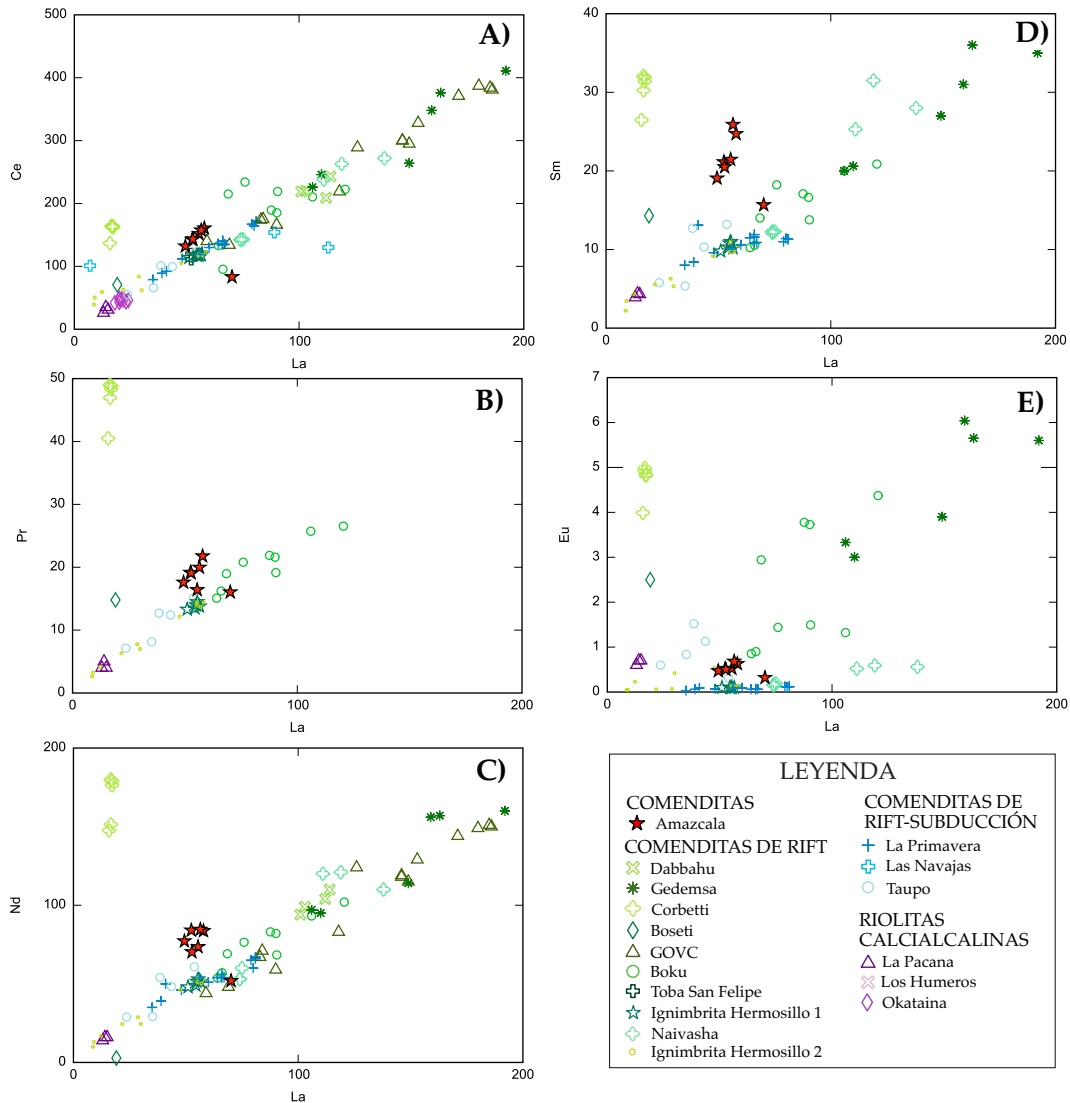


Figura 29.- Diagramas de variación bi-elemental de tierras raras ligeras (LREE). A) Diagrama La vs. Ce. B) Diagrama La vs. Pr. C) Diagrama La vs. Nd. D) Diagrama La vs. Sm. E) Diagrama La vs. Eu. Nota: en la leyenda en lo que se refiere a Amazcala, las muestras representan las 3 fases principales de la caldera: Pómez Ezequiel Montes, Ignimbrita Colón, Domos post colapso.

En el caso de Eu, los puntos están muy dispersos en el diagrama y no se logra distinguir una línea de tendencia principal, pero se observa que Amazcala está en el

grupo de los más empobrecidos en Eu, como las comenditas de La Primavera, Hermosillo, Taupo, entre otras.

5.8.4 Diagramas HREE

Para las HREE, en los diagramas bi-elementales (Fig. 30) las comenditas de la caldera de Amazcala se encuentran separadas de la línea de tendencia principal, y empobrecida en La en todos los casos.

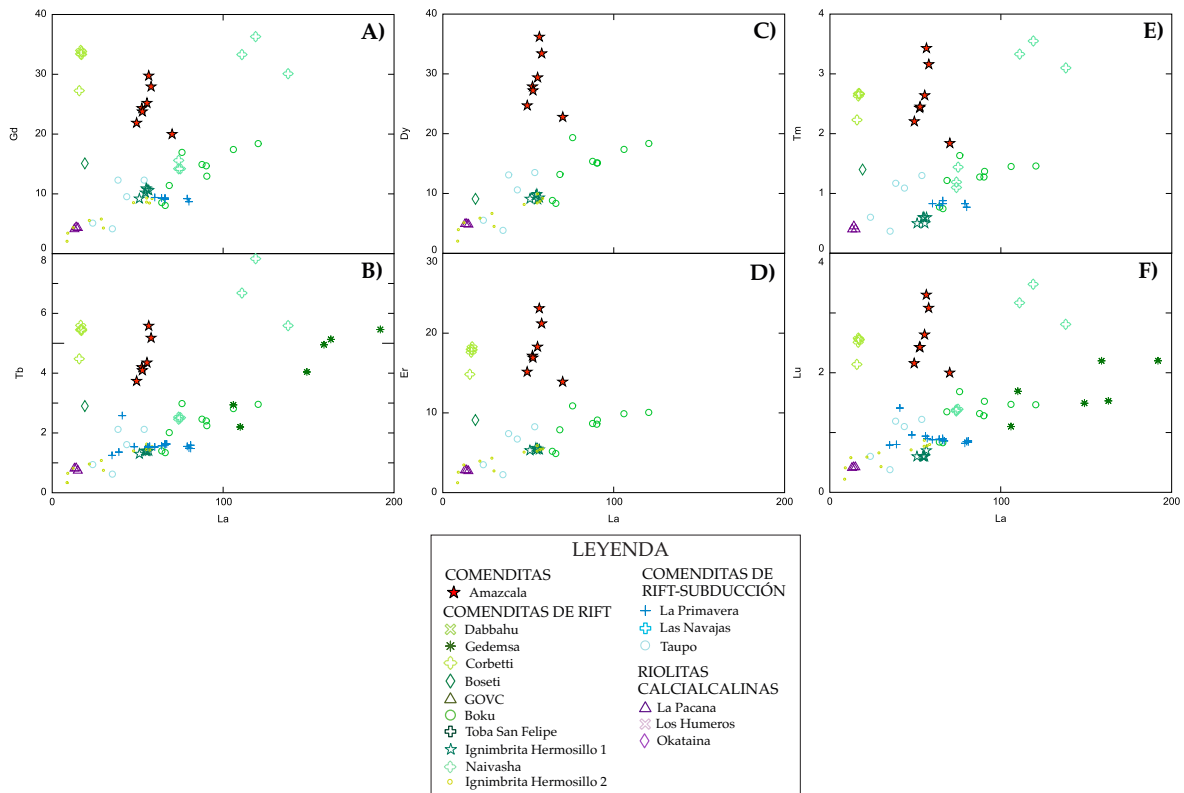


Figura 30.- Diagramas de variación bi-elemental de tierras raras pesadas (HREE). A) Diagrama La vs. Gd. B) Diagrama La vs. Tb. C) Diagrama La vs. Dy. D) Diagrama La vs. Er. E) Diagrama La vs. Tm. F) Diagrama La vs. Lu. Nota: en la leyenda en lo que se refiere a Amazcala, las muestras representan las 3 fases principales de la caldera: Pómez Ezequiel Montes, Ignimbrita Colón, Domos post colapso.

5.8.5 Diagramas de actínidos y alcalinos

En los diagramas bi-elementales de actínidos y alcalinos con La como abscisa (Fig. 31), se puede observar que en Th (Fig. 31A) Amazcala esta marcadamente

enriquecida respecto a la línea de tendencia principal, mientras que en Ba Rb y Sr (Fig. 31B, D) Amazcala se ubica dentro de la tendencia general, a pesar de que en los casos de Ba y Sr se observa una gran dispersión de los puntos. Las riolitas calcialcalinas presentan un comportamiento opuesto a la línea de tendencia principal, y están empobrecidas en Th y Rb y enriquecidas en Ba y Sr.

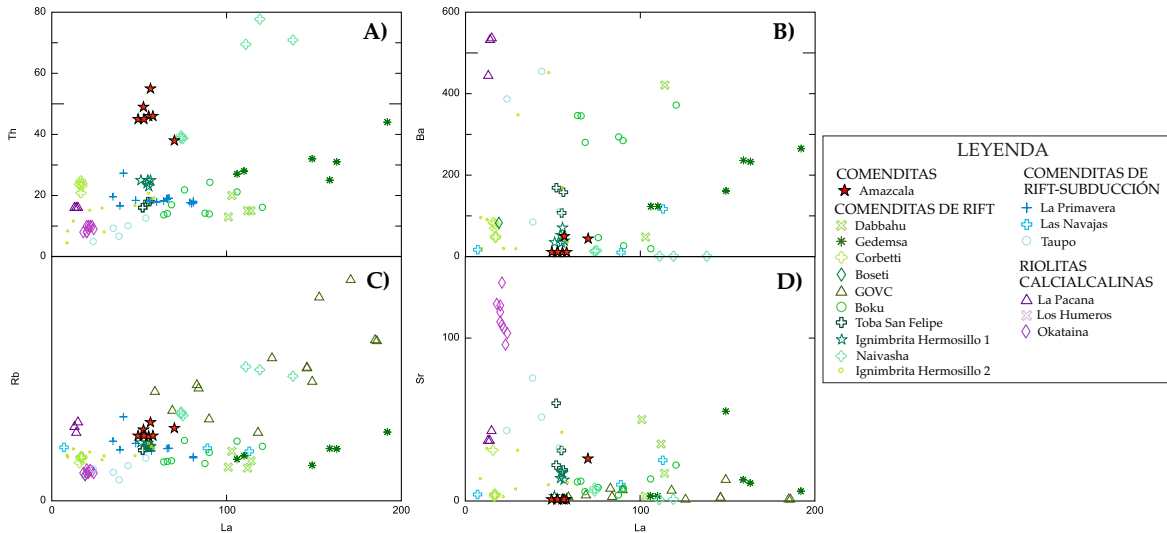


Figura 31.- Diagramas bi-elementales de actínidos y alcalinos. A) Diagrama La vs. Th. B) Diagrama La vs. Ba. C) Diagrama La vs. Rb. D) Diagrama La vs. Sr. Nota: en la leyenda en lo que se refiere a Amazcala, las muestras representan las 3 fases principales de la caldera: Pómez Ezequiel Montes, Ignimbrita Colón, Domos post colapso.

6 DISCUSIÓN

6.1 Evolución volcánica de la caldera de Amazcala

En base a la geología y estratigrafía descrita en el Sub-capítulo 4.2 y los datos reportados previamente (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001), se establece por vez primera la evolución volcánica de la caldera de Amazcala que incluye 4 fases principales, las cuales se muestran esquemáticamente en la Figura 32. En la fase 1 se formaron los depósitos de caída de la Pómez Ezequiel Montes, derivadas de columnas eruptivas plinianas a subplinianas llegando a acumular hasta 40 m de

espesor, representando un volumen DRE (Equivalencia a Roca Densa) mínimo de 4.4 km³, considerando hasta la isopaca de 5 m de espesor. En la fase 2, tuvo lugar el colapso de la caldera, después de haberse evacuado parte del magma de la cámara magmática por la fase de la Pómez Ezequiel Montes, dando lugar a la erupción de flujos piroclásticos masivos, o PDCs densos, que formaron la ignimbrita Colón, la cual tiene espesor de 120 m y volumen DRE mínimo de 27.5 km³. Fase 3, una vez pasada la erupción climática y formación de la caldera, el magma remanente de la cámara magmática fue extraído formando los domos post-colapso a lo largo de la fractura anular. En la fase 4 se emplazaron los domos post-colapso intracaldera, el Domo Central y el Domo Oriental, que incluyeron una fase explosiva previa al domo, formando depósitos piroclásticos en los bordes de los domos, terminando así la actividad de la caldera. El establecer la evolución volcánica de la caldera de Amazcala, como se muestra en la Figura 32, es fundamental para brindar las explicaciones necesarias sobre su formación y desarrollo, tanto para el mejor conocimiento vulcanológico sobre las calderas en general, como de la Geozona de la Caldera de Amazcala, la cual es parte del Proyecto de Geoparque Mundial UNESCO Triángulo Sagrado.

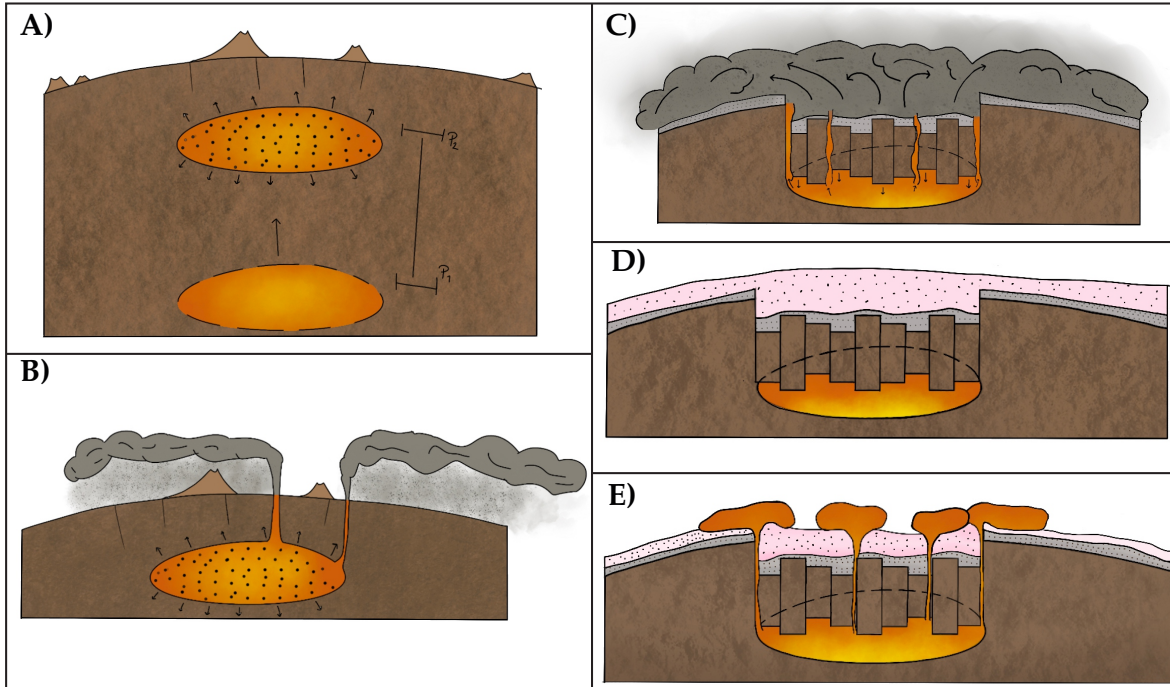


Figura 32.- Modelo esquemático que muestra las fases de formación para la caldera de Amazcala. A) Ascenso de la cámara magmática de niveles profundos (P1) a niveles someros (P2) indicando la sobrepresión magmática por exsolución de volátiles en el nivel somero (flechas y puntos), y fracturamiento de la corteza sobre la cámara magmática B) Erupciones plinianas a subplinianas (Hernández et al., 2009) que dieron origen a la Pómez Ezequiel Montes con el efecto de despresurización de la cámara magmática. C) Colapso de la caldera con estilo despedazada (Piecemeal) y formación de flujos piroclásticos formadores de la ignimbrita Colón. D) Post-colapso de la caldera con los productos piroclásticos resultantes: Pómez Ezequiel Montes: depósito gris; Ignimbrita Colón: depósito rosa. E) Emplazamiento de domos post-caldera incluyendo domos del anillo y domos intracaldera.

6.2 Interpretación de la Geoquímica de la Caldera Amazcala

Con base en los resultados obtenidos podemos establecer que los productos de la caldera de Amazcala son riolitas hiperalcalinas de composición comendítica, similares en lo general a comenditas de otras regiones en el mundo, como por ejemplo Corbetti (Etiopia), Gedemsa (Etiopia) y la Ignimbrita Hermosillo-San Felipe (Sonora), y contrastan químicamente con las riolitas calcialcalinas de La Pacana (Los Andes), Los Humeros (México) y Okataina (Nueva Zelanda), como se puede observar en la Figura 22. Por lo general, las riolitas hiperalcalinas se relacionan con magmas basálticos alcalinos que se han generado en islas oceánicas y zonas de

extensión continental. Estos magmas se caracterizan por estar enriquecidos en los elementos HFSE sugiriendo la existencia de una fuente de manto enriquecido. Esto se puede confirmar con la ausencia de anomalías negativas de Nb y Ta en los diagramas multielementales, que es contrario a lo que sucede en magmas de zona de subducción (Wilson, 1984). Además, los patrones de otros elementos traza no son los típicos de zonas de subducción, como el enriquecimiento de Cs, Rb, Ba y K. La Figura 26 muestra que los patrones de los REE de la caldera de Amazcala son relativamente altos, y con un enriquecimiento en las REE pesadas, lo cual no es común en los productos calcialcalinos de subducción (Wilson, 1989)

Observando los patrones geoquímicos bi-elementales de elementos traza, la caldera de Amazcala sobresale por su enriquecimiento en Zr (>1000 ppm) e Y (>200 ppm) con respecto a la línea de tendencia general que forman las comenditas de otras calderas en el mundo. Por otro lado, las riolitas calcialcalinas están empobrecidas en estos elementos (Zr, Y y Nb; Fig. 28). Respecto a Th, HREE y Sm (LREE), Amazcala, Naivasha (Kenia) y Corbetti (Etiopía) sobresalen de la línea de tendencia principal de las comenditas de otros sitios al estar muy enriquecidas en estos elementos. Respecto a las otras LREE (Ce, Pr, Nd, Eu), Amazcala está ligeramente enriquecida y apenas sobresaliendo de la línea de tendencia principal. En contraste, las riolitas calcialcalinas están sumamente empobrecidas en LREE y HREE respecto a las comenditas de Amazcala y otras regiones (Figs. 29 y 30).

En los diagramas multielementales y de tierras raras son notorias las similitudes entre los patrones de Amazcala con las comenditas de Dabbahu (Etiopía), Naivasha (Kenia), Gedemsa (Etiopía), Toba San Felipe (México) y GOVC (Kenia), manteniéndose Amazcala con un comportamiento intermedio en cuanto a contenidos de los elementos graficados (Figs. 22 y 24). A diferencia de las

comenditas, las riolitas calcialcalinas muestran un patrón muy diferente (Figs. 23 y 25). Amazcala muestra en los diagramas multielementales marcadas anomalías negativas en Ba, Sr, Eu y P que se pueden observar también en todas las comenditas de las otras regiones (Fig. 22); en los casos que no se observan estas anomalías es debido a la ausencia de datos. Lo anterior sugiere una cristalización fraccionada extrema de plagioclasa y apatito para las comenditas, incluyendo Amazcala, mientras que en las riolitas calcialcalinas no se observan estas anomalías negativas tan marcadas, y en particular, la anomalía negativa de Eu que es prácticamente nula (Fig. 23A), sugiriendo procesos magmáticos diferentes a los de los magmas de Amazcala.

En relación con el ambiente geodinámico y tectonomagmático, y basándose en los diagramas de elementos traza clave como Rb, Nb e Y (Fig. 21), se observa que Amazcala se ubica en los campos de ambiente intraplaca junto con comenditas de otras regiones intraplaca (Fig. 21A). En el campo de “comenditas de transición”, Amazcala se agrupa junto con la Toba San Felipe-Hermosillo y las comenditas de Taupo y Nueva Zelanda (Fig. 21B), regiones que han sido interpretadas como vulcanismo de transición entre ambiente de subducción a rift continental (Aranda-Gómez et al., 2007; Vidal-Solano et al., 2005; Vidal-Solano, 2007; Stock, 1999; Kovalenko, 2010).

Las comenditas de Amazcala muestran semejanzas geoquímicas con las comenditas intraplaca de Naivasha (Kenia; Fig. 32), GOVC (Kenia; Fig. 32), Dabahhu (Etiopía; Fig. 32), Corbetti (Etiopía; Fig. 32) y Gedemsa (Etiopía; Fig. 32), que son regiones que se han interpretado en general como vulcanismo de rift continental (MacDonald et al., 1986; Marshall, 2009; Peccerillo, 2007; Anexo 3). Por otro lado, Amazcala también se asemeja a comenditas de Las Navajas y La Primavera, del CVM, las que han sido

interpretadas como productos hiperalcalinos de un ambiente mixto de subducción y rift continental (Mahood, 1981). En contraste, Amazcala se comporta geoquímicamente muy diferente a los casos de Los Humeros (México), Okataina (Nueva Zelanda; Fig. 32) y La Pacana (Chile; Fig. 32), que han sido interpretados como vulcanismo riolítico calcialcalino de subducción de margen continental (Raymundo, 1994; Smith, 2006; Lindsay, 2001).

Sin embargo, es evidente que la caldera de Amazcala está ubicada, en espacio y tiempo, en el sector central del CVM; en espacio, al encontrarse a 30 km de la Ciudad de Querétaro, en una región con volcanes andesíticos-dacíticos calcialcalinos, típicos de ambientes de subducción de margen continental, como son los estratovolcanes de El Zamorano y La Joya (Aguirre-Díaz, 2008a), domos dacíticos, como la cercana Peña de Bernal (8.7 Ma; Aguirre-Díaz et al., 2013), y entre calderas riolíticas-andesíticas calcialcalinas, como las de Amealco y Huichapan (Aguirre-Díaz, 1996; Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2009). En tiempo, al ubicarse estratigráficamente entre unidades volcánicas andesíticas-dacíticas-riolíticas calcialcalinas, como los volcanes antes mencionados de 10-11 Ma (Aguirre-Díaz, 2008a) y la Peña de Bernal, y volcanes andesítico-basálticos post-Amazcala, como El Cimatarío (5.6 Ma) y el cono Cenizas (4.2 Ma; Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001).



Figura 33. Localización de los centros volcánicos utilizados en esta tesis. Nota: Localización mediante coordenadas en un sistema de información geográfica.

Por lo que hace falta una hipótesis que permita explicar la presencia del importante volumen de magmas comendíticos representados por la caldera de Amazcala, en el medio de una provincia de margen continental predominantemente calcialcalina.

En esta hipótesis se debe considerar el espesor de la corteza continental, pues es generalmente aceptado que, por un lado, las calderas continentales más comunes suceden en zonas de corteza continental relativamente gruesa (>30 km) y que son de composición calcialcalina (Geyer y Martí, 2008); por otro lado, se tiene el consenso de que la corteza continental se adelgaza en zonas de rift continental (referencias).

La región con el mayor espesor cortical se localiza en el sector oriental de la CVM, extendiéndose desde el frente volcánico hasta el norte de Puebla (Gómez-Tuena, 2005). Los valores mayores se encuentran sobre todo en las cercanías del Valle de México y el valle de Toluca (47 km). El sector central del CVM muestra un espesor cortical relativamente menor (40 km) y más variable (Gómez-Tuena, 2005). Las

zonas donde la corteza es más delgada se localizan hacia las costas del Pacífico y el Golfo de México (15-20 km; Gómez-Tuena, 2005). Por lo tanto, por el espesor de 40 km de la corteza es poco probable la existencia de una zona de rift continental en la zona central del CVM, aunque no imposible. Varios estudios describen sistemas de fallas regionales que aparentemente favorecieron el ascenso de los magmas a través de la corteza, como el Sistema Intra-arco o Chapala-Tula, y el Sistema Taxco-San Miguel de Allende o Querétaro (Nixon, 1982; Johnson y Harrison, 1992; Suter, 1992; Suter et al., 1995; Aguirre-Díaz, 1996; Aguirre-Díaz et al., 2005). En particular, el Sistema Taxco-San Miguel Allende, representa fallas profundas que aparentemente marcan una zona de influencia cortical (Alaníz et al., 2002; Aguirre-Díaz et al., 2005).

En algunos sitios de margen continental de subducción, con presencia de productos alcalinos contemporáneos a los productos calcialcalinos, se ha argumentado que esta situación podría deberse a una zona de fractura, desgarre, o ventana de la placa oceánica subducida (Hole, M.J., 1991,1995; Thorkelson, D.J., 1996; Brown et al., 2022), permitiendo así el ascenso de fluidos del manto enriquecido que se encuentran debajo de la placa oceánica. Para el caso de Amazcala, esta zona de fractura o ventana pudo haber influido en el ascenso del magma o fluidos ricos en elementos HFSE de la zona fértil del manto que se encuentra por debajo de la placa de Cocos (magmas intraplaca). Estos fluidos o magmas enriquecidos se incorporaron en la cuña astenosférica de la zona de subducción generando magmas alcalinos enriquecidos en esos elementos. Este magma enriquecido, evolucionó durante su ascenso a la superficie, principalmente por procesos de cristalización fraccionada prolongada y fusión parcial de la base de la corteza, como se ha propuesto en otros casos (e.g., Hildreth, 1979; Shao et al., 2015), hasta desarrollar los magmas hiperalcalinos de la caldera de Amazcala.

Es importante señalar que esta tesis de Licenciatura no pretende establecer la petrogénesis ni modelos cuantitativos o cualitativos de los magmas comendíticos que dieron lugar a los productos de la caldera de Amazcala, que representan al menos 35 km³ de magma o DRE, según la estimación de Aguirre-Díaz y López-Martínez (2001). Un estudio petrogenético de este tipo involucra mayor tiempo de investigación, conocimientos más avanzados, y la elaboración de análisis químicos igualmente más avanzados, como isótopos y de microsonda electrónica, estudios que corresponden más propiamente a una tesis de posgrado. El objetivo principal de esta tesis, como se indica en la Sección 1.3, es realizar un análisis comparativo de la geoquímica de Amazcala con calderas comendíticas de otras regiones del mundo, para definir similitudes con esas calderas y a qué ambiente tectónico son vinculadas, para discernir sobre estas comparaciones, y proponer, de una manera preliminar, una hipótesis para explicar la presencia de un volumen considerable de riolitas comendíticas en la zona central del CVM, hipótesis que tendrá que ser desechada o confirmada con estudios más avanzados en un futuro.

7 CONCLUSIÓN

- Con base en estudios previos, la caldera de Amazcala forma parte del CVM, siendo la más septentrional y la más antigua de esta provincia reportada hasta ahora, con un rango de edad de 7.3 a 6.6 Ma. Los productos de la caldera incluyen a la Pómez Ezequiel Montes, ignimbrita Colón, domos de lava del anillo e intracaldera. Todos los productos de la caldera son riolitas con alto contenido de sílice ($\text{SiO}_2 = 73\text{-}75 \text{ wt. } \%$) y valores de K_2O alrededor del 5 wt. %, clasificándose como comenditas. Se estima un volumen DRE mínimo de 35 km³ para las comenditas de Amazcala.

- En el presente estudio se comparó geoquímicamente las comenditas de Amazcala con otras comenditas y riolitas de calderas de diferentes lugares en el mundo, empleando diagramas de clasificación química, bi-elementales, multielementales, tierras raras y de ambiente tectónico.
- Con base en estas comparaciones, se infiere que los productos de la caldera de Amazcala tienen afinidad magmática similares a calderas con comenditas de ambientes intraplaca y/o de zonas de transición de subducción a rift continental.
- Sin embargo, dado el hecho de que la caldera de Amazcala se ubica en espacio y tiempo en el sector central de un régimen de subducción de margen continental (CVM), se propone hipotéticamente que fluidos o magmas de un manto fértil debajo de la placa oceánica de Cocos se incorporan a la cuña astenosférica empobrecida de la zona de subducción, a través de una fractura o ventana subducida en la placa de Cocos, generando así magmas enriquecidos en HFSE y REE, que evolucionaron a magmas comendíticos durante su ascenso a la superficie.
- El presente estudio es parte de la descripción científica de la Geozona de la Caldera de Amazcala, la cual es parte del Proyecto de Geoparque Mundial Triángulo Sagrado.

8 REFERENCIAS

- Aguilar-Vargas, V.H. y Verma, S.P., 1987. Composición química (elementos mayores) de los magmas en el Cinturón Volcánico Mexicano: *Geofis. Int.*, v. 26, p. 273-290
- Aguirre-Díaz, G. J., Tristán-González, M., Gutiérrez-Palomares, I., Martí, J., López-Martínez, M., Labarthe-Hernández, G., Nieto-Obregón, J., 2021. Graben-type calderas: The Bolaños case, Sierra Madre Occidental, Mexico: *Journal of Volcanology*

and Geothermal Research, v. 417, 107315
(June); <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107315>.

- Aguirre-Díaz, G., López-Martínez, M., 2009. Geologic evolution of the Donguinyó–Huichapan caldera complex, central Mexican Volcanic Belt, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 179, 133–148
- Aguirre-Díaz, G.J, Nieto-Obregón, J., Zúñiga, R., 2005. Seismogenic Basin and Range and intra-arc normal faulting in the central Mexican Volcanic Belt, Querétaro, México. *Geological Journal*, vol. 40, p. 1-29. DOI: 10.1002/gj.1004.
- Aguirre-Díaz, G.J., 1996. Volcanic stratigraphy of the Amealco caldera and vicinity, central Mexican Volcanic Belt. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 13, p. 10-51.
- Aguirre-Díaz, G.J., 1998. Tectonic and Magmatic Evolution of Mexico during the Cenozoic. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 15, 197 p. (ISSN: 0185-0962).
- Aguirre-Díaz, G.J., 2003. Características generales del Cinturón Volcánico Mexicano. Una revisión por sectores (Parte 1 de 2): Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana, *Geos*, v. 23, p. 118-119.
- Aguirre-Díaz, G.J., 2008a. Capítulo III –Historia volcánica del entorno del valle de Querétaro: en “El Valle de Querétaro y su geoentorno”, Lozano-Guzmán, A. y Arzate, J., eds., *Publicación Especial del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro, CONCYTEQ, Querétaro, México*, pp. 27-43, ISBN 978-607-7710-02-8.
- Aguirre-Díaz, G.J., Ferrari, L., Nelson, S.A., Carrasco-Núñez, G., López -Martínez, M., Urrutia-Fucugauchi, J., 1998. El Cinturón Volcánico Mexicano: Un Nuevo Proyecto Multidisciplinario. *Unión Geofísica Mexicana, Geos*, v. 18, No. 2, p. 131138. <http://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/geos1998.html>; ISSN: 0186-1891
- Aguirre-Díaz, G.J., y 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*, v. 31, p. 773-776. doi: 10.1130/G19665.1

Aguirre-Díaz, GJ, Aguillón-Robles A, Tristán-González M, Labarthe-Hernández G, López-Martínez M, Bellón H, Nieto-Obregón J., 2013. Geological setting of the Peña de Bernal Natural Monument, Querétaro, México: an endogenous volcanic dome. *Geosphere* 9(3): 557–571. <https://doi.org/10.1130/GES00843.1>

Aguirre-Díaz, G. J., y Morton-Bermea, O., 2018. Geochemistry of the Amazcala Caldera, Querétaro, Mexico: An unusual peralkaline center in the central Mexican Volcanic Belt. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol.70 no.3, pp. 731-760.

Aguirre-Díaz, G.J., 2008b, Types of collapse calderas. ResearchGate. DOI: 10.1088/1755-1307/3/1/012021

Aguirre-Díaz, G.J., y López-Martínez, M., 2001. The Amazcala caldera, Queretaro, México. *Geology and geochronology. Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 111(1-4), 203– 218. doi:10.1016/s0377-0273(01)00227-x

Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, Á. F., 2005. El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(1), 63-80.

Alaniz-Alvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F., Orozco-Esquivel, M.T., Vasallo-Morales, L. F., Xu, S.S., 2002. El Sistema de Fallas Taxco San Miguel de Allende: Implicaciones en la deformación post-Eocénica del centro de México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 55, 12-29.

Allan, J.F., S.A. Nelson, J.F. Luhr, I.S.E. Charnichael, M., P.J. Wallace, 1991. Pliocene-Holocene rifting and associated volcanism in southwest Mexico: An exotic terrane in the making, in *The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias*, edited by J.P. Dauphin and R.R.T. Simoneit, AAPG Mere., 47, 425-445.

- Aranda-Gómez, J., Luhr, J., Housh, T., Valdez-Moreno, G., Chavéz-Cabello., G., 2007. Late Cenozoic intraplate-type volcanism in central and northern México: A review. Geological Society of America, a Special Paper 422, p. 93–128, doi: 10.1130/2007.2422(04).
- Blatter, D.L., Carmichael, I.S., 2001. Hydrous phase equilibria of a Mexican siliceous andesite: a candidate for a mantle origin? *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65 (21), 4043–4065.
- Boccaletti, M., Mazzuoli, R., Bonini, M., Trua, T., Abebe, B., 2000. Plio-Quaternary volcanotectonic activity in the northern sector of the Main of Ethiopian Rift: relationships with oblique rifting. *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 29, No. 4, pp. 679-698.
- Branney, M., Kokelaar, P., 1994. Volcanotectonic faulting, soft-state deformation, and rheomorphism of tuffs during development of a piecemeal caldera, English Lake District: *Geological Society of America Bulletin*, v. 106, p. 507-530.
- Brown, H., Colli, L., Bunge, H.P., 2022. Asthenospheric flow through the Izanagi-Pacific slab window and its influence on dynamic topography and intraplate volcanism in East Asia. *Front. Earth Sci.* 10 <https://doi.org/10.3389/feart.2022.889907>.
- Carmichael, I.S., 2002. The andesite aqueduct: Perspectives on the evolution of intermediate magmatism in west-central (105-99 W) Mexico. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 143, p. 641-663.
- Christiansen, E.H., 2005. Contrasting processes in silicic magma chambers: evidence from very large volume ignimbrites: *Geol. Mag.*, v. 142 (6), p. 669–681.
- Cole, J., Milner, D., Spinks, K., 2005. Calderas y estructuras de caldera: una revisión. *Earth-Science Reviews*, 69 (1-2), 1–26. doi: 10.1016/j.earscirev.2004.06.004.
- Cox, K. G., Bell, J. D., Pankhurst, R. J., 1979. *The Interpretation of Igneous Rocks*. George, Allen and Unwin, London.

- Demant, A., 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: Instituto de Geología, UNAM, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas., v. 2, p. 172-187.
- Ferrari, L., 2000. Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. Boletín de la sociedad geológica mexicana v. LIII, 84-92
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G.J., Carrasco-Núñez, G., 1999. Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico. *Geology*, v. 27, p. 303-306.
- Ferriz, H., Mahood, G., 1984. Eruption rates and compositional trends at Los Hornos Volcanic Center, Puebla, Mexico, .1. *Geophys. Res.*, 89, 8511-8524.
- Field, L.P., 2011. The magnetic evolution of Dabbahu Volcano and the 2010 eruption of Erta Ale, Afar, Ethiopia [Ph.D. thesis]: University of Bristol, 182 p. <http://research-information.bristol.ac.uk>.
- Frey, H.M., Lange, R.A., Hall, C.M., Delgado-Granados, H., Carmichael, I., 2007. A Pliocene ignimbrite flare-up along the Tepic-Zacoalco rift: Evidence for the initial stages of rifting between the Jalisco block (Mexico) and North America. *GSA Bulletin*, Vol. 119, No.1-2, pp. 49–64. doi: <https://doi.org/10.1130/B25950.1>.
- Fusillo, R., 2018. Understanding the volcanic history of Corbetti caldera (Main Ethiopian Rift). An integrated study of the stratigraphic reconstruction and the geochemical characterization of the deposits [Ph.D. thesis]: University of Bristol, 153 p. <http://research-information.bristol.ac.uk>.
- Geshi, N., Yamasaki, T., Miyagi, I., 2021. Magma chamber decompression during explosive caldera-forming eruption of Aira caldera. *Commun Earth Environ* 2, 200. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00272-x>.
- Geyer, A., y Marti, J., 2008. The new worldwide collapse caldera database (CCDB): A tool for studying and understanding caldera processes: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 175, p. 334–354.

- Geyer, A., y Marti, J., 2008. The new worldwide collapse caldera database (CCDB): A tool for studying and understanding caldera processes: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 175, p. 334–354.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T., Ferrari, L., 2005. Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 57 (3), 227–285.
- Gottsmann, J., Martí, J., 2008. *Caldera Volcanism: Analysis, Modelling and Response*, *Developments in Volcanology* 10, Elsevier, Amsterdam, 492 p., ISBN 978-0-444-53165-0.
- Harker A. 1909. *The Natural History of Igneous Rocks*. London: Methuen.
- Hasenaka, T., 1994. Size, distribution, and magma output rate for shield volcanoes of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, central Mexico. *J. Volcanol. Geother. Res.*, v. 63, p. 13-31.
- Heiken, G., Goff, F., Stix, J., Tamanyu, S., Shafiqullah, M., 1986. Intracaldera volcanic activity, Toledo caldera and embayment, Jemez Mountains, New Mexico. *J. Geophys. Res.* 91: 1799-1815.
- Hernández, J., Carrasco-Núñez, G., Aguirre-Díaz, G., 2009. Dinámica eruptiva de la “Pómez Ezequiel Montes” en la caldera Amazcala, centro de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(2), 482-500.
- Hildreth, W., 1979. The Bishop Tuff: evidence for the origin of compositional zonation in silicic magma chambers. In: Chapin, C.E., Elston, W.E. (Eds.), *Ash-Flow Tuffs*. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 180, 43 – 75.
- Hole, M.J., Rogers, G., Saunders, A.D. and Storey, M., 1991. Relation between alkalic volcanism and slab window formation. *Geology*, 19: 657-660.
- Iddings, J. P., 1892. The origin of igneous rocks, *Bull. Phil. Soc. Washington*, 8º, Vol. xii, pp. 89-214.

- Irvine T., Baragar W., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8(5): 523-548.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Science*, 8, 523-548.
- Kearey, P., Klepeis, K., Vine, F., 2008. *Global Tectonics*. 3ra Edición. Wiley- Blackwell, Oxford.
- Kovalenko, V.I., Kozlovsky, A.M., Yarmolyuk, V.V., 2010, Comendite-Bearing Subduction-Related Volcanic Associations in the Khan-Bogd Area, Southern Mongolia: Geochemical Data. *Petrology*, Vol. 18, No.6, pp. 571-595.
- Kozlovsk, A. M., Yarmolyuk, V. V., Kovalenko, V. I., Savatenkov, V. M., Velivetskaya, T. A., 2007. Trachytes, Comendites, and Pantellerites of the Late Paleozoic Bimodal Rift Association of the Noen and Tost Ranges, Southern Mongolia: Differentiation and Contamination of Peralkaline Salic Melts. *Petrology*, Vol. 15, No 3, pp.257-282.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total álcali silica diagram: *Journal of Petrology*, 27, 745-750.
- Lindsay, J.M., Schmitt, A.K., Trumbull, R.B., De-Silva, S.L., Sielbel, W., Emmermann, R., 2001. Magmatic Evolution of the La Pacana Caldera System, Central Andes, Chile: Compositional Variation of Two Cogenetic, Large-Volume Felsic Ignimbrites. *Journal of Petrology*, Vol. 42, No. 3, pp. 459–486 2001.
- Lipman, P.W., 1995. Subsidence of ash-flow calderas; role of magma chamber geometry. IUGG General Assembly 21 (Week A), p. 452
- Lipman, P.W., 2000. Calderas. Sigurdsson, H. (Ed.), *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press; pp 643-662. San Francisco.
- Luhr, J.F., Nelson, S.A., Allan, J.F., Carmichael, I., 1985. Active rifting in southwestern Mexico: Manifestations of an incipient eastward spreading-ridge jump. *Geology*,

Vol. 13, No. 1, pp. 54–57. doi: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1985\)13<54:ARISMM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1985)13<54:ARISMM>2.0.CO;2)

- Luhr, J.F., Simkin, T., 1993. Parícutín: The volcano born in a Mexican cornfield. Phoenix. Geoscience Press, Smithsonian Institution, 427 pp.
- Macdonald, R., 1974. Nomenclature and petrochemistry of the peralkaline oversaturated extrusive rocks: *Bulletin Volcanologique*, 38, 498-516.
- Macdonald, R., Baginski, B., Leat, P.T., White, J.C., Dzierzanowski, P., 2011. Mineral stability in peralkaline silicic rocks: Information from trachytes of the Menengai volcano, Kenya. *Lithos* 125, 553–568.
- MacDonald, R., Davies, G.R., Bliss, C.M., Leat, P., Bailey, D., Smith, R.L., 1986. Geochemistry of High-silica Peralkaline Rhyolites, Naivasha Kenya Rift Valley. *Journal of Petrology*, Vol. 28, pp. 979-1008
- Mahood, G. A., 1981. Chemical evolution of a Pleistocene rhyolitic center: Sierra La Primavera, Jalisco, México. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 77: 129-149
- Mahood, G. A., Gilbert, C. M., y Carmichael, I. S., 1985. Peralkaline and metaluminous mixed-liquid ignimbrites ignimbrites of the Guadalajara region, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25: 259-71.
- Mahood, G.A., 1980. Geological evolution of a Pleistocene rhyolitic center Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 8: 199-230.
- Mahood, G.A., 1981. A Summary of the Geology and Petrology of the Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86, No. B11, pp. 10137-1015.
- Mahood, G.A., 1981. Chemical Evolution of a Pleistocene Rhyolitic Center: Sierra La Primavera, Jalisco, México. *Contributions to mineralogy and petrology*, Vol. 77, pp.129-149
- Maniar, P., Piccoli, P., 1989. Tectonic discrimination of granitoids, *Geological Society of America Bulletin*. Vol. 101: 635-643.

- Marshall, A.S., Hinton, R.W., MacDonald, R., 1998. Phenocrystic fluorite in peralkaline rhyolites, Olkaria, Kenya Rift Valley. *Mineralogical Magazine*, Vol. 62(4), pp. 477–486.
- Marshall, A.S., MacDonald, R., Rogers, N.W., Fitton, J.G., Tindle, A.G., Nejbirt, K., Hinton, R.W., 2009. Fractionation of Peralkaline Silicic Magmas: the Greater Olkaria Volcanic Complex, Kenya Rift Valley. *Journal of Petrology*, Vol. 50, No. 2, pp. 323-359. doi:10.1093/petrology/egp001
- Milán-Valdez, M., Yáñez-García, C., Navarro L., Verma, S.P., Carrasco-Núñez, G., 1993. Geología y geoquímica de elementos mayores de la caldera de Huichapan, Hidalgo, México: *Geofísica Internacional (México)*, v. 32, núm. 2, p. 261-276.
- Nelson, S. A., Hegre, J., 1990, Volcán Las Navajas, a Pliocene-Pleistocene trachyte/peralkaline rhyolite volcano in the northwestern Mexican volcanic belt. *Bull Volcanol*, Vol. 52, pp.186-204
- Nelson, S. A. y Hegre, J., 1990. Volcán Las Navajas, a Pliocene-Pleistocene trachyte/peralkaline rhyolite volcano in the northwestern Mexican Volcanic Belt: *Bulletin of volcanology*, 52, 186-204.
- Nixon, G.T., 1982. The relationship between Quaternary volcanism in central Mexico and the seismicity and structure of subducted ocean lithosphere: *Geol. Soc. Amer. Bull.*, v. 93, p. 514-523
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. y Tindle, A.G., 1984, Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Classification of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25, 956-983.
- Peccerillo, A., Barberio, M.R., Yirgu, G., Ayalew, D., Barbieri, M., Wu, T.W., 2003. Relationships between mafic and peralkaline acid magmatism in continental rift settings: a petrological, geochemical and isotopic study of the Gedemsa volcano, central Ethiopian rift. *Journal of Petrology* Vol. 44, No.11, pp. 2003–2032.

- Peccerillo, A., Donati, C., Santo, A.P., Orlando, A., Yirgu, G., Ayalew, D., 2007. Petrogenesis of silicic peralkaline rocks in the Ethiopian rift: Geochemical evidence and volcanological implications. *Journal of African Earth Sciences* 48, 161–173.
- Remesal, M., Salani, F., Massafarro, G., Cerredo, M., 2004. Estratigrafía y petrología del sector noreste de sierra de Apas. Provincia del Chubut. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Vol. 59, No. 4, pp. 578-590.
- Ronga, F., Lustrino, M., Marzoli, A., Melluso, L., 2010. Petrogenesis of a basalt-comendite-pantellerite rock suite: the Boseti Volcanic Complex (Main Ethiopian Rift). *Mineralogy and Petrology*, Vol. 98, pp. 227–243.
- Shand, S. J., 1927, *Eruptive Rocks*. New York: D. Van Nostrand Company.
- Shao, F., Niu, Y., Regelous, M., Zhu, D., 2015. Petrogenesis of peralkaline rhyolites in an intra-plate setting: Glass House Mountains, southeast Queensland, Australia. *Lithos*, 216-217: pp. 196-21.
- Siebe, C., Macías, J.L., Aguirre-Díaz, G.J., 2006. Neogene-Quaternary continental margin volcanism: A perspective from Mexico: Geological Society of America Special Paper 402, 329 p. (ISBN-10 0-81 37-2402-3).
- Smith, V., Shane, P., Nairn, I., Williams, C., 2006. Geochemistry and magmatic properties of eruption episodes from Haroharo linear vent zone, Okataina Volcanic Centre, New Zealand during the last 10 kyr. *Bull Volcanol*, Vol. 69, pp.57-88. DOI 10.1007/s00445-006-0056-7.
- Solari, L., Gómez-Tuena, A., Bernal, J., Pérez-Arvizu, O., and Tanner, M., 2010. U-Pb zircon geochronology with an integrated LA-ICP-MS microanalytical workstation: achievements in precision and accuracy. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 34(1): 5-18
- Stock, J., Lewis, C., Nagy, E., 1999. The Tuff of San Felipe: an extensive middle Miocene pyroclastic flow deposit in Baja California, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 93, pp. 53–74.

- Suárez, G., Singh S. K., 1986. Tectonic interpretation of the Trans-Mexican Volcanic Belt-Discussion, *Tectonophysics*, 127, 155– 160.
- Sun, S. S., 1980. Lead isotopic study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges, ocean islands and island arcs. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 297, 409-445.
- Sun, S.S. y McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. En: *Magmatism in the ocean basins*. Saunders, A.D. and Norry, M.J. (Editors), Geological Society of London, London. 42: 313-345.
- Suter, M., López-Martínez, M., Quintero-Legorreta, O., Carrillo-Martínez, M., 2001. Quaternary Structure of an extensional Intra-Arc-Rift the Central Trans-Mexican Volcanic Belt: *Geological Society of America Bulletin*, 113, 693-703.
- Suter, M., Quintero-Legorreta, O., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G., Farrar, E., 1995. The Acambay graben: Active intraarc extension in the trans-Mexican volcanic belt, Mexico, *Tectonics*, 14, 1245-1262.
- Suter, M., Quintero, O., Johnson, C. A., 1992. Active faults and state of stress in the central part of the Trans-Mexican volcanic belt, Mexico, 1. The Venta de Bravo fault: *Journal of Geophysical Research*, 97, 11983-11993.
- Tadesse, A.Z., Ayalew, D., Pik, R., Yirgu, G., Fontijn, K., 2018. Magmatic evolution of the Boku Volcanic Complex, Main Ethiopian Rift, *Journal of African Earth Sciences*, doi: 10.1016/j.jafrearsci.2018.08.003
- Thompson, D.T., 1982. EUIDPH: A New Technique for Making Computer-Assisted Depth Estimates from Magnetic Data. *Geophysics*, 47, 31-37.
<https://doi.org/10.1190/1.1441278>
- Thorkelson, D.J., 1996. Subduction of diverging plates and the principles of slab window formation. *Tectonophysics* 255, 47–63.

- Tilley, C., 1950. Some aspects of magmatic evolution. *Quarterly Journal of the Geological Society* 106, 37–61.
- Urrutia, J.H. y Del Castillo, L., 1977. Un Modelo del Eje Volcanico Mexicano. *Bol. Soc. Geol. Mex.*, 38, 1, 18-28.
- Valdéz-Moreno, G., Aguirre-Díaz, G.J., López-Martínez, M., 1998. El Volcán La Joya, estados de Querétaro y Guanajuato—un estratovolcán Miocénico del Cinturón Volcánico Mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 15, 181–197
- Vidal-Solano, J., Paz-Moreno, F.A., Demant, A., López-Martínez, M., 2007. Ignimbritas hiperalcalinas del Mioceno medio en Sonora Central: revaluación de la estratigrafía y significado del volcanismo terciario. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 24, No. 1, pp. 47-6.
- Vidal-Solano, J., Paz, F.A., Iriondo, A., Demant, A., Cochemé, J.J., 2005. Middle Miocene peralkaline ignimbrites in the Hermosillo region (Sonora, Mexico): Geodynamic implications. *C. R. Geoscience*, Vol. 337, pp. 1421–1430
- Wilson, M., 1989. *Igneous petrogenesis. A global tectonic approach.* Unwin Hyman, London, pp. 466
- Winchester, J., Floyd, P., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical geology* 20, 325–343.
- Winter, J. D., 2003. *Principles of igneous and metamorphic petrology.* Pearson, pp.737.
- Wood D.A., 1980, The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth and Planetary Science Letters* 50: 11-30.

ANEXOS

- 1.- Tabla de análisis químicos de roca total.
- 2.- Resultado circones muestra AMAZ-06.
- 3.- Tabla de características de los centros hiperalcalinos.

1.- Tabla de análisis químicos de roca total utilizados en los diagramas geoquímicos

SAMPLE	Qro45 ¹	Qro65 ¹	Qro67 ¹	Qro85 ¹	Qro86 ¹	QRO6a ¹	Qro 36 ¹
LOCATION	AMAZCALA (OBSIDIANAS)	AMAZCALA (OBSIDIANAS)	AMAZCALA (OBSIDIANAS)	AMAZCALA (OBSIDIANAS)	AMAZCALA (OBSIDIANAS)	AMAZCALA (IGNIMBRITA)	AMAZCALA (IGNIMBRITA)
SiO ₂	75.46	75.57	75.80	75.85	75.36	73.86	73.94
TiO ₂	0.15	0.14	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14
Al ₂ O ₃	10.90	10.99	11.02	11.02	11.06	11.00	10.58
Fe ₂ O ₃	1.69	1.43	1.43	1.43	1.69	2.40	2.29
FeO	1.30	1.45	1.45	1.41	1.18	0.78	1.04
MnO	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.03	0.05
MgO						0.32	
CaO	0.15	0.16	0.16	0.17	0.17	0.35	0.28
Na ₂ O	5.11	4.93	4.90	4.97	5.01	1.50	3.58
K ₂ O	4.36	4.43	4.55	4.50	4.52	6.26	5.37
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
Pc	0.60	0.63	0.61	0.46	0.54	3.73	3.36
SUM	99.78	99.79	100.13	100.02	99.74	100.38	100.64
La	52.46	49.39	55.45	57.86	52.75	70.16	56.47
Ce	142.56	132.09	151.73	160.75	143.47	83.25	157.56
Pr	19.17	17.60	16.41	21.78	19.09	16.05	19.97
Nd	84.08	77.23	73.56	83.71	70.31	51.96	84.60
Eu	0.52	0.47	0.52	0.63	0.50	0.32	0.68
Gd	24.32	21.87	25.20	27.94	23.76	19.99	29.75
Tb	4.20	3.74	4.35	5.18	4.09	0.56	5.58
Dy	27.88	24.71	29.39	33.42	27.22	22.79	36.19
Ho	5.56	4.93	5.87	7.16	5.47	0.78	7.78
Er	17.16	15.15	18.29	21.21	16.91	13.90	23.11
Tm	2.43	2.21	2.64	3.16	2.45	1.84	3.43
Lu	2.43	2.16	2.64	3.08	2.43	2.00	3.30
Ba	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	44.00	50.00
Rb	233.00	213.00	212.00	213.00	213.00	238.00	257.00
Th	49.00	45.00	46.00	46.00	45.00	38.00	55.00
Nb	72.00	63.00	64.00	63.00	64.00	55.00	73.00
Sr	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	26.00	1.00
Sm	21.14	19.07	21.45	24.73	20.51	15.68	25.90
Zr	1819	1577	1587	1579	1580	1335	2005
Y	174	159	160	160	159	193	177

SAMPLE	PCD ²	TT-E ²	TT-L ²	SCD ²	NCD ²	ORD ²	YRD ²
LOCATION	LA PRIMAVERA	LA PRIMAVERA	LA PRIMAVERA	LA PRIMAVERA	LA PRIMAVERA	LA PRIMAVERA	LA PRIMAVERA
SiO ₂	76.84	76.44	77.02	76.67	76.43	76.1	76.85
TiO ₂	0.09	0.09	0.13	0.13	0.18	0.17	0.12
Al ₂ O ₃	11.79	11.7	11.7	11.67	11.66	11.71	11.44
Fe ₂ O ₃							
FeO	1.55	1.7	1.72	1.76	1.79	2.02	1.72
MnO	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.05
MgO	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04
CaO	0.21	0.18	0.26	0.27	0.2	0.27	0.2
Na ₂ O	4.25	4.7	3.88	4.42	4.6	4.62	4.54
k ₂ O	4.89	4.74	4.81	4.66	4.8	4.83	4.71
P ₂ O ₅							
Pc							
SUM	99.7	99.64	99.62	99.68	99.76	99.84	99.67
La	48	41	66	67	81	81	57
Ce	112	92	141	135	171	172	124
Pr							
Nd	46	50	56	54	67	66	52
Eu	0.07	0.09	0.06	0.06	0.12	0.12	0.09
Gd							
Tb	1.54	2.58	1.63	1.63	1.59	1.48	1.55
Dy							
Ho							
Er							
Tm							
Lu	0.96	1.41	0.9	0.86	0.86	0.84	0.9
Ba							
Rb	188	275	171	172	141	144	163
Th	18.4	27.3	18.9	19.1	18.1	17.6	18.2
Nb	66	112	69	71	70	66	65
Sr							
Sm	9.6	13.1	11.9	10.9	11.3	11.3	10.3
Zr	454	615	499	526	683	682	584
Y	65	139	54	76	51	47	53

SAMPLE	60 ²	30 ²	252 ¹⁸	218 ¹⁸	317 ¹⁸	234 ¹⁸	283 ¹⁸
LOCATION	LA PRIMAVERA	LA PRIMAVERA	LA PRIMAVERA	LA PRIMAVERA	LA PRIMAVERA	LA PRIMAVERA	LA PRIMAVERA
SiO ₂	77.02	77.28	74.16	74.33	76	73.76	74.64
TiO ₂	0.09	0.06	0.13	0.13	0.13	0.16	0.18
Al ₂ O ₃	11.71	11.91	11.53	11.29	11.57	11.33	11.39
Fe ₂ O ₃			1.12	1.59	0.74	0.79	0.72
FeO	1.42	1.18	0.59	0.23	1.08	1.01	1.02
MnO	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05
MgO	0.03	0.02	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05
CaO	0.23	0.3	0.16	0.25	0.27	0.22	0.2
Na ₂ O	4.69	4.51	3.67	3.74	4.38	3.77	4.49
k ₂ O	4.44	4.47	4.75	4.64	4.62	4.74	4.69
P ₂ O ₅							
Pc			3.31	3.85	0.43	4.13	2.52
SUM	99.67	99.77	99.5	100.15	99.32	100.01	99.95
La	39	35	66	64	66	80	79
Ce	89	79	140	136	134	164	167
Pr							
Nd	39	35	54	54	54	60	65
Eu	0.06	0.03	0.07	0.06	0.06	0.11	0.12
Gd			9.1	9.3	9.3	8.7	9.2
Tb	1.36	1.25	1.6	1.57	1.62	1.49	1.55
Dy							
Ho							
Er							
Tm			0.88	0.8	0.83	0.77	0.83
Lu	0.8	0.79	0.88	0.888	0.87	0.85	0.82
Ba							
Rb	167	195					
Th	16.6	19.6	19	18.2	18.9	17.3	17.7
Nb	68	68					
Sr							
Sm	8.4	8	11.6	11.5	10.8	11.4	11
Zr	379	228					
Y	50	47					

SAMPLE	174 ¹⁸	175 ¹⁸	92 ³	152A ³	205 ³	VC-86-134 ⁴	VC-86-150 ⁴
LOCATION	LA PRIMAVERA	LA PRIMAVERA	LAS NAVAJAS	LAS NAVAJAS	LAS NAVAJAS	TOBA SAN FELIPE	TOBA SAN FELIPE
SiO ₂	75.08	76.14	74.6	73.7	74.4	75.75	74.87
TiO ₂	0.12	0.12	0.13	0.2	0.21	0.15	0.14
Al ₂ O ₃	11.09	11.43	12	9.4	10.5	12.56	12.15
Fe ₂ O ₃	0.88	0.84	2.36	5.05	3.58	1.91	1.83
FeO	0.88	0.95					
MnO	0.05	0.05	0.08	0.22	0.15	0.03	0.04
MgO	0.04	0.05	0.1	0.3		0.28	0.17
CaO	0.19	0.24	0.05	0.44	0.22	0.45	2.02
Na ₂ O	4.32	4.66	4.3	2.8	2.7	3.84	3.93
K ₂ O	4.66	4.54	4.64	5.07	6.15	5.06	4.98
P ₂ O ₅			0.01	0.02	0.01	0.02	0.02
Pc	2.76	0.96	0.92	2.8	2.83		
SUM	100.07	99.98	99.19	100	100.75	100.05	100.15
La	56	60	7	113	89	56	52
Ce	119	130	101	130	154	120	111
Pr							
Nd	54	51					
Eu	0.09	0.09					
Gd		9.4					
Tb	1.53	1.53					
Dy							
Ho							
Er							
Tm		0.83					
Lu	0.94	0.88					
Ba			17	117	10	158	169
Rb			175	162	172	176	166
Th	18.2	17.9				18	16
Nb						24.4	22.5
Sr			4	25	10	19	22
Sm	10.1	10.6					
Zr			889	839	740	398	384
Y			4	127	114	51.6	51.9

SAMPLE	VC-89-01 ⁴	VC-89-70 ⁴	SMN115 ⁵	SMN117 ⁵	BL416a ⁵	SMN175 ⁵	SMN15 ⁵
LOCATION	TOBA SAN FELIPE	TOBA SAN FELIPE	GOVC	GOVC	GOVC	GOVC	GOVC
SiO ₂	74.88	75.87	72.8	74.24	75.85	74.59	74.3
TiO ₂	0.14	0.15	0.12	0.14	0.09	0.18	0.15
Al ₂ O ₃	12.55	12.19	10.76	12.1	11.66	11.12	10.61
Fe ₂ O ₃	1.85	1.84	2.25	1.8	1.89	2.62	3.3
FeO							
MnO	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.06	0.05
MgO	0.36	0.17	0.17	0.02	0.02	0.02	0.01
CaO	1.08	0.88	0.47	0.53	0.11	0.28	0.13
Na ₂ O	3.81	3.68	4.49	4	4.58	4.87	5.44
K ₂ O	5.41	4.94	4.55	5.1	4.29	4.62	4.35
P ₂ O ₅	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Pc			3.18	0.98	1.3	0.79	0.66
SUM	100.17	99.78	98.84	98.96	99.83	99.16	99.01
La	55	52	83	90	69	118	126
Ce	119	120	174	166	134	219	289
Pr							
Nd			67	59	48	83	124
Eu							
Gd							
Tb							
Dy							
Ho							
Er							
Tm							
Lu							
Ba	107						
Rb	188	165	379	267	295	223	467
Th	18	16					
Nb	24.3	22.8	289	180	206	178	361
Sr	31	60	7.6	6.7	3.5	6.4	0.9
Sm							
Zr	350	402	894	461	435	775	2001
Y	48.7	48.1	144	93	97	105	247

SAMPLE	SMN160 ⁵	SMN62 ⁵	SMN40 ⁵	SMN44 ⁵	SMN34 ⁵	SMN03 ⁵	SMN162 ⁵
LOCATION	GOVC	GOVC	GOVC	GOVC	GOVC	GOVC	GOVC
SiO ₂	74.89	74.76	73.47	73.46	72.83	72.84	72.44
TiO ₂	0.13	0.11	0.16	0.17	0.16	0.16	0.15
Al ₂ O ₃	11.19	12.02	10.29	10.23	10.28	10.46	10.49
Fe ₂ O ₃	2.21	1.7	3.9	3.91	3.85	3.72	3.64
FeO							
MnO	0.04	0.04	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06
MgO	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02
CaO	0.2	0.3	0.11	0.11	0.07	0.02	0.12
Na ₂ O	4.6	4.48	5.77	5.73	5.88	5.84	5.69
K ₂ O	4.5	4.65	4.29	4.29	4.26	4.28	4.36
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Pc	1.56	0.69	0.63	0.61	0.75	0.84	1.14
SUM	99.35	98.79	98.7	98.61	98.19	98.26	98.12
La	84	59	186	185	180	171	153
Ce	175	140	381	384	387	371	328
Pr							
Nd	71	44	150	151	149	144	129
Eu							
Gd							
Tb							
Dy							
Ho							
Er							
Tm							
Lu							
Ba							
Rb	368	357	523	526	746	723	666
Th							
Nb	272	290	473	474	673	654	582
Sr	2.5	2.3	1.5	1.6	0.3	0.3	0.2
Sm							
Zr	807	552	2025	2034	2380	2375	2056
Y	156	81	265	265	330	326	285

SAMPLE	SMN29 ⁵	SMN205 ⁵	BB85.20 ⁵	Vent-97h-4a ⁶	Pujs-96h-13a ⁶	Jama-96h-7b ⁶	Quis-96h-21a ⁶
--------	--------------------	---------------------	----------------------	--------------------------	---------------------------	--------------------------	---------------------------

LOCATION	GOVC	GOVC	GOVC	LA PACANA	LA PACANA	LA PACANA	LA PACANA
SiO ₂	74.02	74.01	72.83	73.3	73.8	73.4	74.1
TiO ₂	0.17	0.17	0.26	0.19	0.09	0.1	0.1
Al ₂ O ₃	10.5	10.57	10.79	13.4	12.6	12.6	12.8
Fe ₂ O ₃	3.46	3.44	3.67	1.2	0.57	0.61	0.63
FeO							
MnO	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.07	0.07
MgO	0.03	0.02	0.09	0.3	0.1	0.08	0.08
CaO	0.15	0.15	0.3	1.13	0.66	0.61	0.54
Na ₂ O	5.44	5.47	5.5	1.88	3.54	3.36	2.82
k ₂ O	4.36	4.38	4.38	4.38	4.97	5.06	5.7
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.02	0.07	0.03	0.03	0.03
Pc	0.59	0.6	0.88	4.07	2.54	3.15	2.26
SUM	98.79	98.88	98.78	99.97	98.96	99.07	99.13
La	146	146	149			14	15
Ce	300	300	295			35	31
Pr						5	4
Nd	119	118	115			16	16
Eu						0.7	0.7
Gd						4.4	4.3
Tb						0.82	0.74
Dy						4.9	4.8
Ho						0.93	0.93
Er						2.8	2.7
Tm						0.45	0.4
Lu						0.42	0.42
Ba				839	270	532	536
Rb	434	436	390	189	281	223	257
Th						16	16
Nb	371	372	335	11	18	20	19
Sr	2.2	2	13	186	47	37	43
Sm						4.4	4.3
Zr	1539	1541	1366	87	52	67	66
Y	206	206	184	15	22	28	28

SAMPLE	Quis-96h-4b ⁶	693 ⁷	700 ⁷	700A ⁷	T15 ⁷	NB-16 ⁸	NB-15 ⁸
LOCATION	LA PACANA	SIERRA DE APAS	SIERRA DE APAS	SIERRA DE APAS	SIERRA DE APAS	BOKU	BOKU
SiO ₂	74.2	67.85	69.25	68.12	73.37	73.16	73.3
TiO ₂	0.1	0.31	0.34	0.32	0.25	0.39	0.19
Al ₂ O ₃	12.7	14.38	13.29	13.22	11.45	9.97	13.68
Fe ₂ O ₃	0.52	4.56	4.58	3.79	4.65	6.34	2.29
FeO							
MnO	0.7	0.14	0.13	0.95	0.08	0.3	0.02
MgO	0.1	0.07	0.14	0.1	0.01	0.07	0.07
CaO	0.61	0.55	0.79	0.46	0.23	0.33	0.18
Na ₂ O	2.75	5.71	5.24	5.01	5.39	4.22	4.91
K ₂ O	5.04	5.11	5.04	4.88	4.6	4.52	5.1
P ₂ O ₅	0.03	0.04	0.05	0.05	0.01		
Pc	3.05	0.18	0.27	0.94	0.08	1.52	0.88
SUM	99.8	98.9	99.12	97.84	100.12	99.3	99.74
La	13	99.7	98.8	98.3	77.6	68.48	66.12
Ce	26	183	196	260	177	215.1	95.39
Pr	4	19.6	21.3	21.2	17.1	18.98	16.22
Nd	14	65.4	74.5	72.1	59.4	69.12	57.06
Eu	0.6	1	1.3	1.16	1.02	2.943	0.899
Gd	4.1	10.3	13.2	11.5	9.26	11.4	8.066
Tb	0.81	1.66	2.06	2.1	1.53	2.012	1.342
Dy	4.9	9.52	12	11.7	8.15	13.18	8.343
Ho	0.94	1.91	2.33	2.27	1.52	2.786	1.75
Er	2.8	5.92	7.01	6.93	4.56	7.881	4.901
Tm	0.4	0.918	1.06	1.04	0.72	1.217	0.746
Lu	0.41	0.837	0.947	0.9	0.717	1.347	0.83
Ba	444	97	59	321	15	280.5	345.5
Rb	242	167	175	181	329	131.1	129
Th	16	16.7	16.8	17.1	23.6	16.98	14.09
Nb	21	169	137	137	256	108.4	57.02
Sr	37	9	13	77	4	5.727	12.16
Sm	3.9	11.5	14.1	13.9	11.4	14.01	10.55
Zr	63	885	775	767	1.46	791.4	557.4
Y	29	55.3	67.8	57.8	35.6	60.53	45.96

SAMPLE	NB-14 ⁸	NB-09 ⁸	NB-22 ⁸	NB-18 ⁸	NB-17 ⁸	NB-30 ⁸	NB-28 ⁸
LOCATION	BOKU	BOKU	BOKU	BOKU	BOKU	BOKU	BOKU
SiO ₂	74.7	75.45	71.9	73.13	75.4	73.01	73.09
TiO ₂	0.26	0.19	0.42	0.19	0.2	0.44	0.38
Al ₂ O ₃	9.47	10.88	10.45	13.66	10.96	10.86	10.43
Fe ₂ O ₃	5.17	4.09	5.86	2.32	4.08	6.06	6.04
FeO							
MnO	0.17	0.1	0.32	0.07	0.04	0.33	0.28
MgO	0.07	0.05	0.09	0.1	0.06	0.12	0.1
CaO	0.29	0.12	0.31	0.21	0.22	0.4	0.5
Na ₂ O	4.88	3.8	5.25	4.94	3.53	1.87	1.75
k ₂ O	4.43	4.87	4.76	5.11	5.04	6.25	6.77
P ₂ O ₅							
Pc	0.73	0.85	2.51	0.44	1.74	7.4	7.03
SUM	99.44	99.55	99.36	99.73	99.57	99.34	99.34
La	90.46	75.94	87.64	64.1	106	90.11	120.5
Ce	219	234.1	189.5	133.1	210.5	185.3	222.5
Pr	19.15	20.8	21.88	15.08	25.72	21.6	26.53
Nd	68.38	76.43	83.06	53.64	93.18	82.06	102
Eu	1.494	1.438	3.777	0.853	1.322	3.729	4.373
Gd	12.96	16.94	14.91	8.541	17.42	14.69	18.41
Tb	2.244	2.983	2.461	1.4	2.815	2.402	2.957
Dy	15.11	19.34	15.37	8.83	17.37	15.09	18.36
Ho	3.292	4.064	3.267	1.877	3.681	3.212	3.825
Er	9.104	10.88	8.667	5.181	9.896	8.583	10.06
Tm	1.369	1.634	1.275	0.773	1.451	1.275	1.459
Lu	1.522	1.684	1.317	0.841	1.471	1.281	1.465
Ba	26.74	46.5	293.8	346.4	19.41	284.9	372
Rb	1991	197.5	122	127.3	195.3	158.3	178.5
Th	24.33	21.85	14.21	13.67	21.18	13.96	16.14
Nb	145.6	108.4	91.63	55.74	106	89.42	98.76
Sr	7.829	8.33	3.723	11.73	13.53	7.489	22.04
Sm	13.78	18.23	17.09	10.24	20.01	16.63	20.87
Zr	958.5	980	706.1	544.5	946.2	702.3	713.4
Y	89.1	97.57	84.69	52.12	96.69	87.5	98.87

SAMPLE	LFAF08 011 ⁹	LFAF08 029 ⁹	LFAF08 054 ⁹	LFAF08 071 ⁹	DA ¹⁰	UR1 ¹⁰	CH1 ¹⁰
LOCATION	Dabbahu	Dabbahu	Dabbahu	Dabbahu	CORBETTI	CORBETTI	CORBETTI
SiO ₂	70.06	70	70.49	74.03	74.63	75.4	74.23
TiO ₂	0.34	0.4	0.33	0.16	0.24	0.21	0.41
Al ₂ O ₃	13.75	12.1	13.55	12.37	8.96	9.09	9.27
Fe ₂ O ₃							
FeO	4.67	5.69	4.6	2.74	4.74	4.67	4.86
MnO	0.15	0.18	0.14	0.08	0.22	0.21	0.19
MgO	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0.05	0.04	0.24
CaO	0.95	0.67	0.7	0.33	0.31	0.04	1.15
Na ₂ O	5.75	6.2	5.59	5.16	5.33	4.55	4.37
K ₂ O	4.25	4.48	4.33	4.61	4.98	4.87	4.64
P ₂ O ₅	0.2	0.02	0.01	0	0.02	0.02	0.09
Pc	1.28	0.6	0.66	0.64	4.32	4.74	3.99
SUM	101.15	100.39	100.35	100.1	100	100	100
La	101	114	112	103	17.19	17.17	15.83
Ce	219	243	209	220	163.36	162.05	136.85
Pr					48.81	48.35	40.52
Nd	94	110	104	99	178.88	176.32	147.65
Eu					4.82	4.84	3.99
Gd					33.79	33.32	27.26
Tb					5.47	5.43	4.48
Dy							
Ho							
Er					18.29	17.91	14.84
Tm					2.66	2.67	2.23
Lu					2.55	2.56	2.14
Ba	971	421	763	48	49.95	46.5	83.6
Rb	110	131	107	162	145.42	139.59	124.88
Th	13	15	15	20	23.98	23.15	23.65
Nb	136	157	146	127	131.35	129.09	128.22
Sr	50	17	35	3	3.99	3.81	31.22
Sm					31.39	31.89	26.48
Zr	928	1041	1007	845	1214.85	1184.05	1023.68
Y	103	126	113	143	190.47	187.67	159.26

SAMPLE	CH5P ¹⁰	CH6P ¹⁰	P-640 ¹¹	P-600 ¹¹	P-600p ¹¹	P-1040 ¹¹	P-920 ¹¹
LOCATION	CORBETTI	CORBETTI	Los Humeros	Los Humeros	Los Humeros	Los Humeros	Los Humeros
SiO ₂	74.47	74.61	76.41	76.13	73.78	75.38	73.44
TiO ₂	0.25	0.24	0.13	0.19	0.23	0.27	0.45
Al ₂ O ₃	9.11	8.97	12.49	12.57	12.71	13.43	13.51
Fe ₂ O ₃			1.18	1.65	1.47	2.06	2.64
FeO	4.7	4.74	0	0	0	0	0
MnO	0.21	0.21	0	0.02	0.02	0.02	0.03
MgO	0.04	0.06	0.12	0.26	0.33	0.35	0.3
CaO	0.21	0.21	1.06	1.18	3.55	0.96	1.85
Na ₂ O	5.54	5.37	3.93	3.54	3.62	3.1	3.86
k ₂ O	4.92	5.04	4.62	4.36	4.17	4.3	3.77
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.07	0.1	0.11	0.14	0.16
Pc	2.96	3.16					
SUM	100	100	100.01	100	99.99	100.01	100.01
La	16.63	16.69					
Ce	164.48	163.38					
Pr	49.02	46.95					
Nd	179.98	151.4					
Eu	4.92	4.99					
Gd	33.41	33.99					
Tb	5.45	5.6					
Dy							
Ho							
Er	17.61	17.97					
Tm	2.63	2.67					
Lu	2.51	2.58					
Ba	69.54	80.41	164	194	200	191	358
Rb	143.62	139.79	147	140	126	117	109
Th	24.79	20.85	21	17	17	18	17
Nb	140.68	167.71					
Sr	2.98	4.11	42	58	98	78	167
Sm	32.07	30.26					
Zr	1220.6	1611.67	139	149	144	152	198
Y	193.85	180.5	17	19	20	20	16

SAMPLE	GD19 ¹²	GD5 ¹²	GD20 ¹²	GD16 ¹²	GD12 ¹²	GD34 ¹²	B269 ¹³
LOCATION	GEDEMSA	GEDEMSA	GEDEMSA	GEDEMSA	GEDEMSA	GEDEMSA	BOSETI
SiO ₂	71.59	72.49	72.87	71.69	72.18	71.64	73.89
TiO ₂	0.37	0.37	0.34	0.16	0.19	0.18	0.39
Al ₂ O ₃	10.46	8.95	9.27	7.95	8.27	8.13	9.65
Fe ₂ O ₃	6.69	3.11	3.39	4.85	4.56	5.29	5.39
FeO	0.4	3.87	3.12	3.35	3.29	3.14	
MnO	0.27	0.3	0.24	0.33	0.31	0.32	0.2
MgO	0.13	0.01	0.01	0.08	0.02	0.03	0.48
CaO	0.47	0.26	0.24	0.3	0.23	0.27	0.31
Na ₂ O	4.07	5.8	5.61	6.03	6.42	6.12	4.28
K ₂ O	4.32	4.15	4.22	4.01	4.04	3.99	4.53
P ₂ O ₅	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03
Pc	1.21	0.7	0.68	1.24	0.51	0.88	0.85
SUM	100	100.02	100	100	100.03	100	100
La	149	106	110	159	192	163	
Ce	264	226	246	348	411	376	202
Pr							
Nd	114	97	95	156	160	157	
Eu	3.9	3.33	3	6.04	5.6	5.65	
Gd							
Tb	4.04	2.94	2.2	4.95	5.46	5.13	
Dy							
Ho							
Er							
Tm							
Lu	1.49	1.1	1.69	2.2	2.2	1.53	
Ba	161	123	123	236	265	233	38
Rb	116	136	147	171	225	170	115
Th	32	27	28	25	44	31	
Nb	191	153	153	223	263	212	103
Sr	55	3	3	13	6	11	74
Sm	27	20	20.6	31	35	36	
Zr	1016	782	846	1251	1565	1185	761
Y	163	132	116	204	217	171	105

SAMPLE	B262 ¹³	B175 ¹³	B302 ¹³	B357 ¹³	V4 ¹⁴	V29 ¹⁴	M47 ¹⁴
LOCATION	BOSETI	BOSETI	BOSETI	BOSETI	OKATAINA (ROTOMA)	OKATAINA (ROTOMA)	OKATAINA (ROTOMA)
SiO ₂	70.75	70.04	71.42	70.63	76.73	77.2	77.87
TiO ₂	0.49	0.45	0.35	0.38	0.18	0.17	0.17
Al ₂ O ₃	10.97	12.36	11.45	12.7	13.02	12.69	12.42
Fe ₂ O ₃	5.52	5.95	5.64	5.2	0.16	0.15	0.17
FeO					1.06	1.04	0.85
MnO	0.15	0.27	0.2	0.21	0.07	0.07	0.06
MgO	0.38	0.16	0.14	0.02	0.21	0.22	0.2
CaO	0.18	0.66	0.55	0.64	1.18	1.2	1.07
Na ₂ O	3.94	5.67	5.08	5.75	4.26	4.15	4.13
K ₂ O	4.29	3.89	4.29	3.89	2.97	2.95	3.04
P ₂ O ₅	0.03	0.03	0.01	0.02	0.03	0.03	0.02
Pc	3.29	0.51	0.87	0.54	3	2.99	
SUM	99.99	99.99	100	99.98	102.87	102.86	100
La				19.1	24	21	23
Ce	170	156	192	70.7	46	47	44
Pr				14.8			
Nd				2.8			
Eu				2.5			
Gd				15.1			
Tb				2.9			
Dy				9.1			
Ho				1.4			
Er				9.1			
Tm				1.4			
Lu				7.6			
Ba	467	821	603	83			
Rb	111	79	88	84	91	95	97
Th					9	10	10
Nb	110	106	119	0.8	8	8	8
Sr	7	12	11	675	103	108	96
Sm				14.3			
Zr	806	590	721	603	136	136	130
Y	78	64	95	116	26	26	26

SAMPLE	V16 ¹⁴	V55 ¹⁴	V67 ¹⁴	V53 ¹⁴	M26 ¹⁴	M28 ¹⁴	13—07 ¹⁵
LOCATION	OKATAINA (ROTOMA)	OKATAINA (ROTOMA)	OKATAINA (ROTOMA)	OKATAINA (ROTOMA)	OKATAINA (MAMAKU)	OKATAINA (MAMAKU)	TAUPO
SiO ₂	76.46	76.65	76.62	75.34	76.37	76.36	71.92
TiO ₂	0.19	0.21	0.2	0.24	0.21	0.2	0.25
Al ₂ O ₃	12.99	12.9	12.99	14.05	12.98	13.22	14.47
Fe ₂ O ₃	0.17	0.18	0.17	0.19	0.23	0.23	
FeO	1.15	1.2	1.16	1.29	1.16	1.15	1.76
MnO	0.07	0.07	0.07	0.09	0.07	0.06	0.04
MgO	0.23	0.26	0.25	0.27	0.27	0.24	0.29
CaO	1.39	1.33	1.39	1.32	1.32	1.27	0.73
Na ₂ O	4.3	4.18	4.12	4.19	4.17	4.1	5.06
k ₂ O	2.88	2.86	2.88	2.83	3.2	3.13	4.15
P ₂ O ₅	0.03	0.03	0.02	0.05	0.04	0.03	0.05
Pc	2.91	2.89	2.9	2.88			
SUM	102.77	102.76	102.77	102.74	100.02	99.99	98.72
La	20	20	18	21	20	22	35.2
Ce	48	49	42	48	43	47	65.9
Pr							8.12
Nd							29.2
Eu							0.837
Gd							4.16
Tb							0.623
Dy							3.83
Ho							0.777
Er							2.25
Tm							0.369
Lu							0.379
Ba							678
Rb	90	90	91	92	103	101	93.4
Th	8	8	8	9	10	10	9.27
Nb	8	8	8	8	8	8	11.9
Sr	120	116	121	134	110	106	511
Sm							5.35
Zr	146	152	147	175	132	132	467
Y	25	25	24	25	25	24	20

SAMPLE	14/20 ¹⁵	10—27 ¹⁵	14/24 ¹⁵	14/29 ¹⁵	H95-13a ¹⁶	H95-13b ¹⁶	H96-61 ¹⁶
LOCATION	TAUPO	TAUPO	TAUPO	TAUPO	IGNIMBRITA HERMOSILLO 1	IGNIMBRITA HERMOSILLO 1	IGNIMBRITA HERMOSILLO 1
SiO ₂	70.94	71.08	75.29	71.06	73.12	76.43	74.98
TiO ₂	0.55	0.3	0.23	0.27	0.17	0.15	0.14
Al ₂ O ₃	12.29	14	11.76	14.38	12.45	12.36	12.37
Fe ₂ O ₃					1.2	1.7	1.42
FeO	5.56	2.5	3.05	2.12	0.66	0.08	0.36
MnO	0.14	0.08	0.04	0.05	0.03	0.02	0.03
MgO	0.27	0.21	0.16	0.27	0.13	0.02	0.12
CaO	0.3	0.38	0.3	0.72	0.76	0.55	0.58
Na ₂ O	3	3.93	3.44	4.11	3.85	3.9	4.27
k ₂ O	4.61	5.79	4.79	5.46	4.25	4.55	5.09
P ₂ O ₅	0.05	0.05	0.03	0.05	0.06	0.12	0.03
Pc	1.77	1.35	0.58	1.22	2.47	0.42	0.33
SUM	99.48	99.67	99.67	99.71	99.15	100.3	99.72
La	38.5	23.7	53.8	43.6			51
Ce	101	54.8	122.391	99.6			114
Pr	12.7	7.12	15.1	12.4			13.3
Nd	54.1	28.8	60.8	48.3			48
Eu	1.52	0.6	0.32	1.13			0.1
Gd	12.3	5.11	12.3	9.53			9.2
Tb	2.12	0.942	2.12	1.61			1.3
Dy	13.1	5.52	13.5	10.6			9.1
Ho	2.68	1.23	2.89	2.25			1.7
Er	7.4	3.5	8.26	6.72			5.3
Tm	1.17	0.602	1.3	1.09			0.5
Lu	1.19	0.602	1.22	1.1			0.6
Ba	84.8	387	110	455	88	45	35
Rb	68.5	104	140	115	196	185	191
Th	6.66	4.94	12.6	10.1			25
Nb	17.9	17.9	19.5	16.6			
Sr	75.5	43.3	32.6	51.5	72	25	3
Sm	12.7	5.78	13.2	10.3			9.8
Zr	657	191	647	426	275	304	384
Y	62.4	27.4	72.8	56.1	52	62	57

SAMPLE	H2-94 ¹⁶	H3-94 ¹⁶	H98-5 ¹⁶	H98-7 ¹⁶	H98-8 ¹⁶	JR03-7* ¹⁷	JR02-11A* ¹⁷
LOCATION	IGNIMBRITA HERMOSILLO 1	IGNIMBRITA HERMOSILLO 1	IGNIMBRITA HERMOSILLO 1	IGNIMBRITA HERMOSILLO 1	IGNIMBRITA HERMOSILLO 1	IGNIMBRITA HERMOSILLO 2	IGNIMBRITA HERMOSILLO 2
SiO ₂	74.66	72.88	74.14	76.14	73.26	74.54	72.26
TiO ₂	0.15	0.15	0.11	0.13	0.13	0.17	0.13
Al ₂ O ₃	12.53	12.2	12.4	11.83	12.31	11.95	11.85
Fe ₂ O ₃	1.4	0.77	0.75	1.52	0.85	1.51	1.41
FeO	0.28	0.83	0.92	0.34	0.79	0.16	0.39
MnO	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04
MgO	0.17	0.13	0.05	0.06	0.05	0.15	0.2
CaO	0.42	0.52	0.52	0.48	0.52	0.59	0.65
Na ₂ O	5.28	5.23	3.88	3.68	3.89	4.3	3.37
K ₂ O	4.95	4.53	4.41	4.6	4.28	4.62	4.67
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.16	0.03
Pc	0.33	2.88	2.98	0.55	3.64	0.9	3.59
SUM	100.24	100.18	100.21	99.38	99.76	99.08	98.59
La	55.5	54.5	56.5		55	9.08	28.74
Ce	118	117.5	118		117.5	50.5	83.89
Pr	14.5	13.5	13.8		14	3.25	7.76
Nd	53	49	51.5		51.5	13.1	28.79
Eu	0.1	0.1	0.1		0.1	0.05	0.07
Gd	10.7	10.2	10.6		10.9	3.43	5.79
Tb	1.4	1.4	1.4		1.4	0.65	1.08
Dy	9	9.7	9.3		9.9	3.95	6.66
Ho	1.8	1.7	2		1.9	0.87	1.43
Er	5.5	5.6	5.4		5.4	2.56	4.32
Tm	0.5	0.6	0.6		0.6		
Lu	0.6	0.6	0.7		0.6	0.41	0.66
Ba	71	53	39	50	34	20.1	19.4
Rb	180	180	178		189	143	134.4
Th	23	24	25		25	8.4	15.9
Nb						23.3	24.7
Sr	17	14	13	12	18		7.4
Sm	11	10.3	10.2		10.8	3.45	6.28
Zr	340	304	332	333	313	334	333.6
Y	59	56	54	49	51	25.9	43.9

SAMPLE	JR02- 21A* ¹⁷	JR04-40 ¹⁷	JR04- 30A ¹⁷	JR04- 37B ¹⁷	JR03-9 ¹⁷	JR04-32 ¹⁷	JR04-39 ¹⁷
LOCATION	IGNIMBRITA HERMOSILLO 2	IGNIMBRITA HERMOSILLO 2	IGNIMBRITA HERMOSILLO 2	IGNIMBRITA HERMOSILLO 2	IGNIMBRITA HERMOSILLO 2	IGNIMBRITA HERMOSILLO 2	IGNIMBRITA HERMOSILLO 2
SiO ₂	74.4	72.63	72.65	73.3	73.6	73.74	73.79
TiO ₂	0.13	0.13	0.13	0.15	0.17	0.13	0.08
Al ₂ O ₃	11.93	12.72	12.2	12.61	11.89	11.8	12.44
Fe ₂ O ₃	1.14	1.77	1.85	2.36	0.8	1.74	1.17
FeO	0.59	0.23	0.47	0.12	0.85	0.68	0.46
MnO	0.04	0.03	0.04	0.09	0.04	0.03	0.04
MgO	0.09				0.9		
CaO	0.65	0.5	0.76	0.34	0.55	0.63	0.67
Na ₂ O	3.89	3.49	4.09	3.23	3.81	2.96	3.14
k ₂ O	4.38	5.19	3.93	6	3.83	5.42	5.14
P ₂ O ₅	0.04			0.04	0.03		
Pc	3.08	3.52	4.15	0.96		4.05	3.87
SUM	100.36	100.21	88.07	99.2	96.47	101.18	100.8
La	21.72	58.4	55.2	8.67	56.9	12.3	29.97
Ce	63.03	122	117	39.3	118	59.3	61.95
Pr	6.33	14.4	14	2.66	13.7	4.16	7.01
Nd	24.45	51.9	51.1	9.88	50.2	16.9	24.46
Eu	0.06	0.13	0.14	0.05	0.12	0.23	0.42
Gd	5.56	9.22	8.62	2.07	8.47	4.36	4.29
Tb	0.96	1.54	1.45	0.34	1.43	0.82	0.75
Dy	5.87	9.17	8.42	2.03	8.68	5.12	4.49
Ho	1.28	1.91	1.84	0.42	1.83	1.11	0.93
Er	3.95	5.47	5.2	1.24	5.41	3.47	2.72
Tm							
Lu	0.59	0.8	0.77	0.22	0.78	0.58	0.43
Ba	19.8	36	44.6	95.7	48.1	91	348.2
Rb	160.1	171	203	149	178	170	146.9
Th	15.2	19.3	18.1	4.5	18.9	11.6	8.1
Nb	26	23.2	23.3	21	23.7	22.5	19.2
Sr	2.7	11.4	42.2	13.8	3.3	32.3	31.1
Sm	5.57	10.5	9.73	2.21	9.74	4.37	5.32
Zr	360.8	314	321	335	317	246	97.1
Y	40.6	54.5	52.9	12.5	53.1	35.3	29.9

SAMPLE	JR04-35A ¹⁷	JR02-19 ¹⁷	2 ¹⁹	117 ¹⁹	143b ¹⁹	410b ¹⁹	583b ¹⁹
LOCATION	IGNIMBRITA HERMOSILLO 2	IGNIMBRITA HERMOSILLO 2	NAIVASHA	NAIVASHA	NAIVASHA	NAIVASHA	NAIVASHA
SiO ₂	74.18	74.31	75.2	75.2	74.7	73.7	73.8
TiO ₂	0.14	0.24	0.17	0.2	0.15	0.23	0.22
Al ₂ O ₃	11.75	12.89	12.11	12.17	12.11	10.64	10.64
Fe ₂ O ₃	1.8	2.09	0.83	0.88	0.94	1.93	1.72
FeO	0.63	0.39	1.06	1.04	1.05	1.62	1.81
MnO	0.03	0.07	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05
MgO		0.15	0.07	0.07	0.08	0.01	0.01
CaO	0.58	0.51	0.44	0.53	0.65	0.21	0.22
Na ₂ O	3.12	3.85	4.59	4.71	4.69	5.46	5.5
k ₂ O	5.08	5	4.73	4.71	4.75	4.44	4.41
P ₂ O ₅		0.08			0.01		
Pc	3.42		0.18	0.24	0.27	0.26	0.2
SUM	100.73	99.58	99.42	99.78	99.44	98.54	98.58
La	55.3	47.57	74	75	74	111	119
Ce	119	105.06	142	143	143	238	263
Pr	14.4	12.15					
Nd	54	46.06	53	60	53	120	121
Eu	0.55	0.54	0.15	0.19	0.17	0.52	0.59
Gd	9.3	8.53	15.6	14.2	14.2	33.3	36.3
Tb	1.63	1.4	2.53	2.51	2.46	6.68	7.83
Dy	9.93	8.16					
Ho	2.03	1.73					
Er	5.89	5.08					
Tm			1.19	1.44	1.1	3.33	3.55
Lu	0.87	0.71	1.38	1.39	1.36	3.17	3.48
Ba	170	451.6	13	15	13	1	1
Rb	188	148	290	279	285	439	429
Th	20.8	16.7	38.8	38.7	39.5	69.5	77.7
Nb	22.4	22.2	200	211	211	346	346
Sr		10	6.15		7.852	0.875	1.079
Sm	10.9	9.17	12.3	12.3	12.1	25.3	31.5
Zr	272	499.2	439	450	444	1859	1905
Y	58.4	50.9	108	112	105	240	246

Pie de tabla. Los datos de la tabla fueron tomados de varios autores y publicaciones científicas, que incluyen las siguientes referencias (Listadas en el capítulo de Referencias):

- ¹ Aguirre-Díaz, G.J., y López-Martínez, M. (2001)
- ² Mahood, G.A., (1981a)
- ³ Stephen, A., Nelson, A., Hegre, J. (1990)
- ⁴ Stock, J., Lewis, C., Nagy, E. (1999)
- ⁵ Marshall, A.S., MacDonald, R., Rogers, N.W., Fitton, J.G., Tindle, A.G., Nejbert, K., Hinton, R.W. (2009)
- ⁶ Lindsay, J.M., Schmitt, A.K., Trumbull, R.B., De-Silva, S.L., Sielbel, W., Emmermann, R., 2001.
- ⁷ Remesal, M., Salani, F., Massafferro, G., Ceredo, M., (2004)
- ⁸ Tadesse, A.Z., Ayalew, D., Pik, R., Yirgu, G., Fontijn, K. (2018)
- ⁹ Field, L.P. (2011)
- ¹⁰ Fusillo, R. (2018)
- ¹¹Raymundo, G., Martínez-Serrano, G., Aliber, A. (1994)
- ¹² Peccerillo, A., Donati, C., Santo, A.P., Orlando, A., Yirgu, G., Ayalew, D. (2007)
- ¹³ Ronga, F., Lustrino, M., Marzoli, A., Melluso, L. (2010)
- ¹⁴ Smith, V., Shane, P., Nairn, I., Williams. C. (2006)
- ¹⁵ Kovalenko, V.I., Kozlovsky, A.M., Yarmolyuk, V.V. (2010)
- ¹⁶ Vidal-Solano, J., Paz, F.A., Iriondo, A., Demant, A., Cochemé, J.J. (2005)
- ¹⁷ Vidal-Solano, J., Paz-Moreno, F.A., Demant, A., López-Martínez, M. (2007)
- ¹⁸ Mahood, G.A. (1981b)
- ¹⁹ MacDonald, R., Davies, G.R., Bliss, C.M., Leat, P., Bailey, D., Smith, R.L. (1986)

2.- Resultados de la muestra AMAZ-06 para datación.

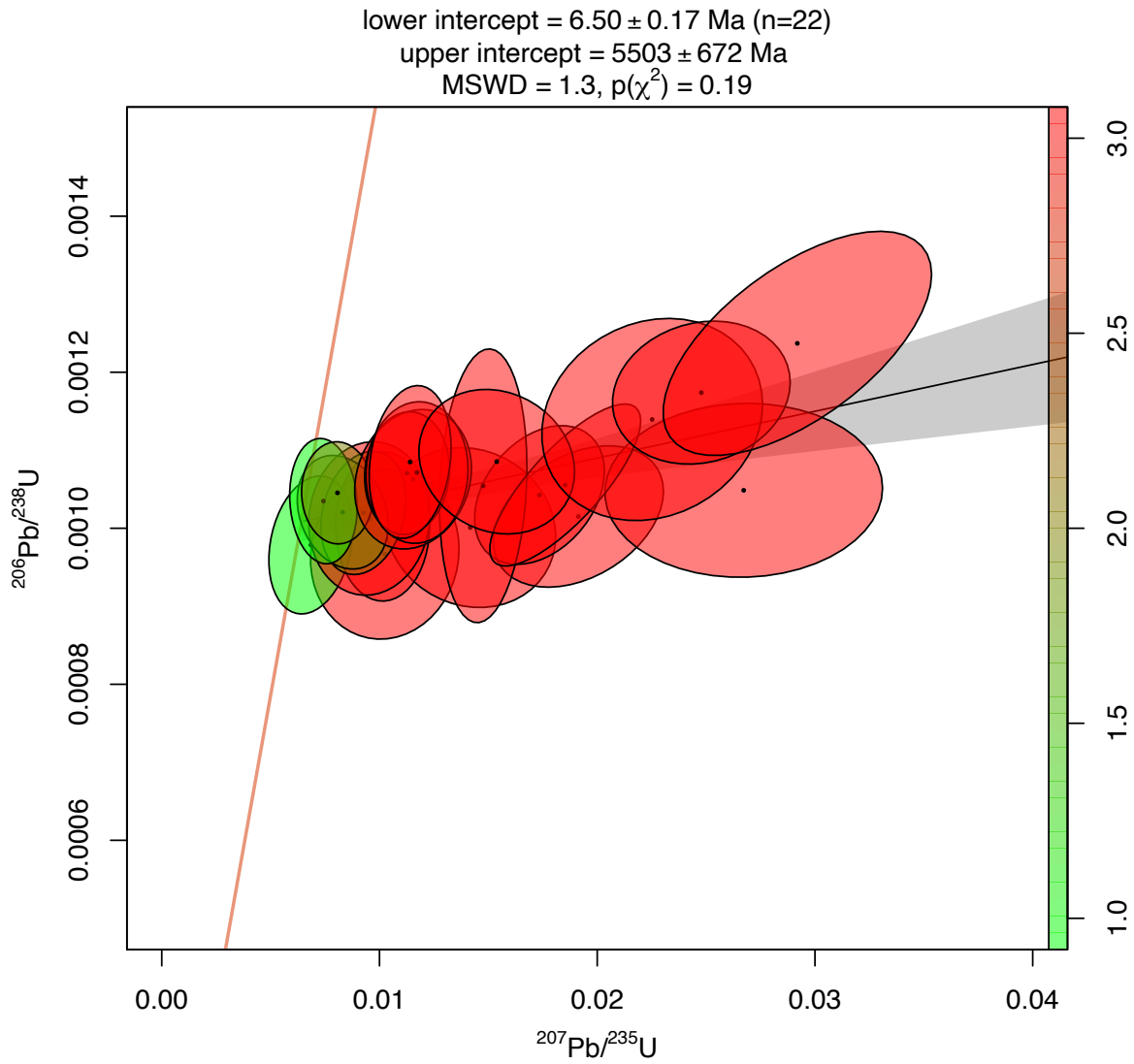


Tabla 2. Resumen comparativa de características geoquímicas de calderas seleccionadas.

DIAGRAMA	Geoquímica					Ambiente		Multi-elemental			Tierras raras		HARKER							HFSE ¹			LREE ²					HREE ³						ACTINIDOS Y ALCALINOS						
	A	B	C	D	E	A	B	A	B	C	A	B	FeO ₃	FeO	MnO	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	P ₂ O ₅	K ₂ O	A	B	C	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	
LA PRIMAVERA	s	s	±	s	s	s	±	±	±	±	s	s	s	s	s	s	±	±	s	nd	±	n	n	s	s	±	n	n	st	n	n	n	n	n	n	n	st	s	±	
LAS NAVAJAS	s	s	±	s	n	s	±	n	n	n	s	s	±	nd	n	s	±	n	n	±	n	n	n	n	s	s	±	n	n	st	n	n	n	n	n	n	n	st	s	±
TOBA SAN FELIPE	s	s	n	±	n	s	x	±	±	s	s	s	s	nd	s	±	±	n	n	s	n	n	n	s	s	±	n	n	st	n	n	n	n	n	n	n	st	s	±	
GOVC	s	s	s	s	±	s	±	±	±	s	s	s	o	nd	s	±	s	n	±	±	±	n	n	s	s	±	n	n	st	n	n	n	n	n	n	n	st	s	±	
LA PACANA	s	s	n	n	n	n		n	n	n	n	n	±	nd	s	s	n	n	n	n	n	n	n	n	s	s	±	n	n	st	n	n	n	n	n	n	n	st	s	±
BOKU	±	±	s	±	s	s	±	±	±	±	s	s	n	nd	n	±	n	n	±	nd	s	n	n	n	s	s	±	n	n	st	n	n	n	n	n	n	n	st	s	±
Dabbahu	±	±	s	s	s	s	n	s	s	s	s	s	nd	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	s	s	±	n	n	st	n	n	n	n	n	n	n	st	s	±
CORBETTI	±	±	s	s	s	s	±	±	±	±	±	±	nd	nd	n	±	n	±	s	±	±	n	n	s	s	±	n	n	st	n	n	n	n	n	n	n	st	s	±	
Los Humeros	±	±	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	s	nd	±	±	n	n	n	n	±	n	n	s	s	±	n	n	st	n	n	n	n	n	n	n	st	s	±	
GEDEMSA	±	±	s	s	s	s	±	±	±	s	±	±	n	n	n	n	n	n	±	±	n	n	n	n	s	s	±	n	n	st	n	n	n	n	n	n	n	st	s	±
BOSETI	±	±	s	±	±	s	±	n	n	n	s	s	n	nd	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	s	s	±	n	n	st	n	n	n	n	n	n	n	st	s	±
OKATAINA	±	±	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	s	±	±	n	n	n	n	n	n	n	n	s	s	±	n	n	st	n	n	n	n	n	n	n	st	s	±
TAUPO	±	±	n	n	n	s	s	±	±	n	s	s	nd	n	±	n	n	n	n	n	n	n	n	n	s	s	±	n	n	st	n	n	n	n	n	n	n	st	s	±
IGNIMBRITA HERMOSILLO	s	s	n	±	±	±	s	±	±	±	s	s	±	±	s	s	n	±	n	s	±	n	n	s	s	±	n	n	st	n	n	n	n	n	n	n	st	s	±	
NAIVASHA	s	s	s	±	±	s	±	s	±	s	s	s	s	±	s	s	s	n	n	s	±	n	n	s	s	±	n	n	st	n	n	n	n	n	n	n	st	s	±	

¹HFSE: Elementos de alto campo de esfuerzo.²LREE: tierras raras ligeras.³HREE: tierras raras pesadas.

s: Sí presenta similitudes con la caldera de Amazcala.

n: No presenta similitudes con la caldera de Amazcala.

±: Presenta ciertas similitudes con la caldera de Amazcala.

nd: No datos.

st: Sin tendencia

3.- Tabla de las principales características de los centros volcánicos mencionados en el presente trabajo.

Centro Volcánico	Localización	Edad	Composición	Ambiente tectónico	Caldera	Volumen
<i>LA PRIMAVERA</i>	México	145 000 años	Riolitas peralcalinas	Subducción y rift continental	Sí	20 Km ³
<i>GOVC</i>	Kenia	20 000 años	Riolitas peralcalinas	Rift continental	Sí	13 Km ³
<i>LA PACANA</i>	Chile	5 Ma	Riolitas calcialcalinas	Subducción	Sí	2700 Km ³
<i>BOKU</i>	Etiopía	_____	Riolitas peralcalinas	Rift continental	Sí	_____
<i>Dabbahu</i>	Etiopía	63.6 Ka	Riolitas peralcalinas	Rift continental	Sí	>10 Km ³
<i>CORBETTI</i>	Etiopía	176.8 Ka	Riolitas peralcalinas	Rift continental	Sí	_____
<i>Los Humeros</i>	México	500 Ka	Rocas calcoalcalinas	Subducción	Sí	153 Km ³
<i>GEDEMSA</i>	Etiopía	0.26 Ka	Riolitas peralcalinas	Rift continental	Sí	_____
<i>BOSETI</i>	Etiopía	0.44-0.56 Ma	Riolitas peralcalinas	Rift continental	Sí	_____
<i>OKATAINA</i>	Nueva Zelanda	~400 Ka	Riolitas peralcalinas	Rift continental	Sí	>100 Km ³
<i>IGNIMBRITA HERMOSILLO</i>	México	12.5 Ma	Riolitas peralcalinas	Rift continental	Sí	
<i>LAS NAVAJAS</i>	México	4.5 Ma	Traquitas y riolitas peralcalinas	Subducción y rift continental	No	_____
<i>TOBA SAN FELIPE</i>	México	12.6 Ma	Riolitas peralcalinas	Subducción y rift continental	Sí	54 Km ³
<i>TAUPO</i>	Nueva Zelanda	300 Ka	Riolitas peralcalinas y traquitas	Subducción y rift continental	No	1000 Km ³
<i>NAIVASHA</i>	Kenia	15 Ka	Riolitas peralcalinas	Rift continental	Sí	_____