



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudio de inclusiones de fundido en
cristales de unidades post-caldera en
la sierra de La Primavera, Jalisco,
México.**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Victor Morales Gaona

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Aldo Ramos Rosique



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

Índice

Agradecimientos	IV
Resumen.....	V
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Área de Estudio.....	2
1.1.1. Localización del Área de Estudio	2
1.2. Hipótesis	3
1.3. Objetivos y metas	4
1.3.1. Generales	4
1.3.2. Particulares	4
1.3.3. Metas Científicas	4
1.4. Contenido de la tesis	5
1.4.1 Capítulo 2. El magmatismo de la FVTM	5
1.4.2 Capítulo 3. Estudio de inclusiones de fundido en rocas ígneas	5
1.4.3 Capítulo 4. Evolución del magmatismo en la Caldera de La Primavera.....	5
1.4.4 Capítulo 5. Discusión	5
1.4.5 Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones.....	5
Capítulo 2. El magmatismo de la Faja Volcánica Transmexicana	6
2.1. Introducción.....	6
2.2. Evolución geológica de la Faja Volcánica Transmexicana	7
2.2.1. Arco del Mioceno medio y tardío (~19 - 10 Ma).....	8
2.2.2. Episodio máfico del Mioceno tardío (~11- 7.5 Ma)	8
2.2.3. Vulcanismo silíceo del final de Mioceno (~7.5-5 Ma) y bimodal del Plioceno temprano (~5-3 Ma)	9
2.2.4. Arco del Plioceno tardío-Cuaternario	9
2.3. Petrogénesis de la Faja Volcánica Transmexicana.....	11
2.3.1. El magmatismo silíceo en la Faja Volcánica Transmexicana	12
Capítulo 3. Inclusiones de fundido en rocas ígneas.....	14
3.1. Introducción.....	14

3.2. Características generales	16
3.2.1. Mecanismos de atrapamiento	18
3.2.2. Evolución de las inclusiones de fundido después del atrapamiento	20
3.2.3. Inmiscibilidad de fluidos	21
3.2.4. Inclusiones de fundido en depósitos piroclásticos	21
3.3. Técnicas de estudio.....	22
3.3.1. Microsonda electrónica o EPMA (<i>Electron probe micro-analysis</i>).....	24
3.3.2. Microsonda iónica (SIMS: Secondary ion mass spectrometer).....	25
3.3.3. Espectroscopía infrarroja (FTIR: <i>Fourier-transform infrared spectroscopy</i>).....	26
3.3.4. Espectroscopía RAMAN	29
3.3.5. Microtermometría	31
Capítulo 4. Evolución del magmatismo en la Caldera de La Primavera.....	33
4.1. Introducción	33
4.2. Estudios Previos y Geología de la Sierra de La Primavera	33
4.2.1. Tectónica regional	33
4.2.2. Basamento	34
4.2.3. Evolución Geológica de la Sierra de La Primavera.....	34
Lavas pre-caldera	37
Erupción de La Toba Tala	37
Colapso de la caldera.....	39
Domos centrales y depósito del horizonte de pómez gigante	39
Erupción de domos anulares antiguos.....	42
Erupción de domos anulares más jóvenes.....	42
Levantamiento	43
Erupción del Arco de Lavas Sur	43
Hidrotermalismo actual en La Primavera	43
Depósitos piroclásticos y lacustres de la caldera.....	44
4.3. Características de inclusiones de fundido en unidades post-caldera de La Primavera	46
4.3.1 Trabajo de campo y unidades post-caldera muestreadas	46
4.3.2. Preparación de muestras.....	55
Trituración y lavado de muestras.....	55

Selección de cristales	56
Montado de cristales	58
Pulido de muestras	58
4.3.3 Pómez, fenocristales e inclusiones de fundido	60
Fragmentos de pómez	61
Petrografía de Inclusiones de fundido	63
4.3.4 Geoquímica de pómez e inclusiones de fundido	68
Geoquímica de roca total	68
Elementos mayores	68
Elementos traza	73
Geoquímica de inclusiones de fundido	79
Condiciones analíticas	79
Cristaloquímica de Feldespatos.....	81
Composición de Inclusiones de fundido	82
4.3.5 Contenido de H₂O en inclusiones de fundido	94
Microespectroscopía infrarroja: Condiciones analíticas	94
Resultados FTIR.....	96
Capítulo 5. Discusión	102
5.1 Evolución de procesos magmáticos y su relación con el sistema geotérmico	102
5.1.1 Mezcla de magmas en la química de roca total	103
5.1.2 Mezcla de magmas en la geoquímica de inclusiones de fundido	105
5.1.3 Condiciones barométricas del sistema geotérmico actual reveladas por análisis de inclusiones de fundido	107
5.2 Mezcla de magmas como detonante de la formación de la caldera de La Primavera	109
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones	111
6.1. Conclusiones	111
6.2. Recomendaciones	112
Bibliografía	113
Anexos	118
Petrografía de Inclusiones de fundido	118
Datos geoquímicos sin procesar de Inclusiones de fundido y cristales	145

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México así como a la Facultad de Ingeniería por los conocimientos brindados, por formarme como profesionista y persona.

A mi director de tesis el Dr. Aldo Ramos Rosique, por sus enseñanzas, paciencia y criterio; sin su ayuda no me hubiera sido posible terminar esta tesis.

Al Dr. Giovanni Sosa Ceballos por su guía, conocimientos e interés en este proyecto.

A la Dra. Laura Mori, al Ing. Marco Rubio y al Dr. José Luis Arce, gracias por sus enseñanzas durante mi formación académica, por sus observaciones y el tiempo dedicado en la revisión de este trabajo.

Quiero agradecer al Instituto de Geología de la UNAM, en especial: a la Dra. Barbara Martiny y la Ing. Consuelo Macias, por contribuir con en préstamo de herramientas y equipo requerido.

De igual manera al Instituto de Geofísica de la UNAM Unidad Michoacán, por facilitarme sus instalaciones y equipos, así como a las personas que de alguna forma contribuyeron en este proceso como el Dr. José Luis Macias, Mtro. Felipe García, Mtra. Gabriela Reyes, Dra. Noemi Salazar, Mtra. Fabiola Mendiola, cDra. Delphine Sourisseau y al Mtro. Mario Boijseauneau.

Agradezco al Proyecto 15 (P15) "*Exploración geotérmica de los complejos volcánicos de Cerritos Colorados, Acozulco y El Aguajito-La Reforma: estudios de vulcanología, estratigrafía, geoquímica y petrología experimental*" del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CEMIE-Geo) el apoyo financiero para realizar está investigación. También agradezco al P15 la beca que se me proporcionó durante el transcurso de esta investigación.

Finalmente quiero agradecer a mi familia, amigos y seres queridos por su apoyo incondicional, durante mi formación como Ingeniero Geólogo.

Resumen

El territorio de México se caracteriza por estar asociado a intensa actividad ígnea, en el cual la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) representa uno de los arcos volcánicos activos más inusuales en el mundo. Dicho arco muestra una gran variedad composicional en las diversas estructuras volcánicas que lo componen. Los grandes centros de vulcanismo riolítico en la FVTM están representados principalmente por calderas volcánicas, de las cuales la Caldera de La Primavera en el estado de Jalisco representa, además, un potencial geotérmico importante. En la región se observan manifestaciones termales activas. Estudios previos han caracterizado a las rocas de la caldera como riolitas comendíticas, y reconocido una evolución geológica identificando eventos pre-, sin- y post-caldera. Para entender de mejor manera el magmatismo así como el sistema geotérmico actual, se realizó trabajo de campo con el fin de coleccionar rocas representativas de eventos post-caldera y hacer análisis de geoquímica de roca total en fragmentos de pómez, así como de geoquímica de inclusiones de fundido (IFu) alojadas en fenocristales contenidos en las pómez. Esta tesis presenta los resultados obtenidos y sus implicaciones en cuanto a la evolución del magmatismo y su composición química así como su relación con el sistema geotérmico actual.

Se observó que la evolución del magmatismo en La Primavera durante la transición de la etapa pre-caldera a post-caldera, fue producto de una mezcla de magmas riolíticos, cuyos contenidos de H₂O (2-7 wt. %) implican presiones de 100 a 230 MPa. En conclusión el reservorio magmático fue modificado después de la formación de la caldera, dando como resultado en un sistema multi-reservorio, que pudo facilitar la mezcla de magmas peralcalinos con otros más peraluminosos. Dicho sistema multi-reservorio se encuentra a una profundidad de 4 a 8 km, lo que situaría a la fuente de calor del sistema geotérmico a dicha profundidad. Este estudio se integrará junto con otros (geología, geofísica, geoquímica) para conocer de manera integral el sistema geotérmico en la caldera.

Capítulo 1. Introducción

La Sierra de La Primavera es una caldera volcánica formada durante el Cuaternario, en un periodo de vulcanismo silíceo del arco magmático continental que conforma la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). Su estudio es importante ya que se sabe bien que, en algunas calderas o regiones volcánicas del mundo y de México, se puede generar energía eléctrica gracias al agua y el calor interno proveniente de la cámara magmática que se encuentra en el subsuelo, desarrollando así un sistema hidrotermal del que se puede obtener un beneficio.

Por lo anterior la Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha realizado estudios de exploración geotérmica en la zona desde el siglo pasado y, muchos investigadores como Mahood (1977, 1980, 1981a, 1981b, 1982, 1983a, 1983b y 1985), Clough (1981 y 1982) Wright (1981 y 1983), Demant y Vincent (1978), entre otros, han tratado de contribuir con el entendimiento de la formación y evolución de la caldera. En la actualidad la Sierra de La Primavera, como se denomina al área que corresponde a la estructura volcánica y las rocas que la caracterizan, sigue siendo estudiada y se encuentra resguardada por ser considerada una zona de protección a la flora y fauna.

En este trabajo se estudió la evolución de la caldera después de haberse formado, a través del estudio de inclusiones de fundido en cristales de unidades post-caldera, empleando técnicas analíticas como microsonda electrónica (EPMA) y espectroscopia Infrarroja (FTIR).

1.1. Área de Estudio

El área de estudio está localizada al NNW de la ciudad de Guadalajara, en el estado de Jalisco (Fig. 1.1) y consiste en una caldera volcánica alojada en el sector occidental de la Provincia Fisiográfica de la FVTM. La caldera tiene aproximadamente un diámetro de 15 km.

La latitud y longitud de La Primavera es 20 ° 38' N, 103° 32' W' respectivamente. Toda el área de la caldera La Primavera queda comprendida en la carta de "Guadalajara Oeste", con la clave F13D65 de INEGI, a la escala 1: 50,000 (Fig. 1.2).

La Sierra de La Primavera se declaró zona de protección forestal y refugio de la fauna silvestre (ZPFRFSLP) y, en el año 2000, la SEMARNAT la declara área de protección de flora y fauna La Primavera (APFFLP).

1.1.1. Localización del Área de Estudio

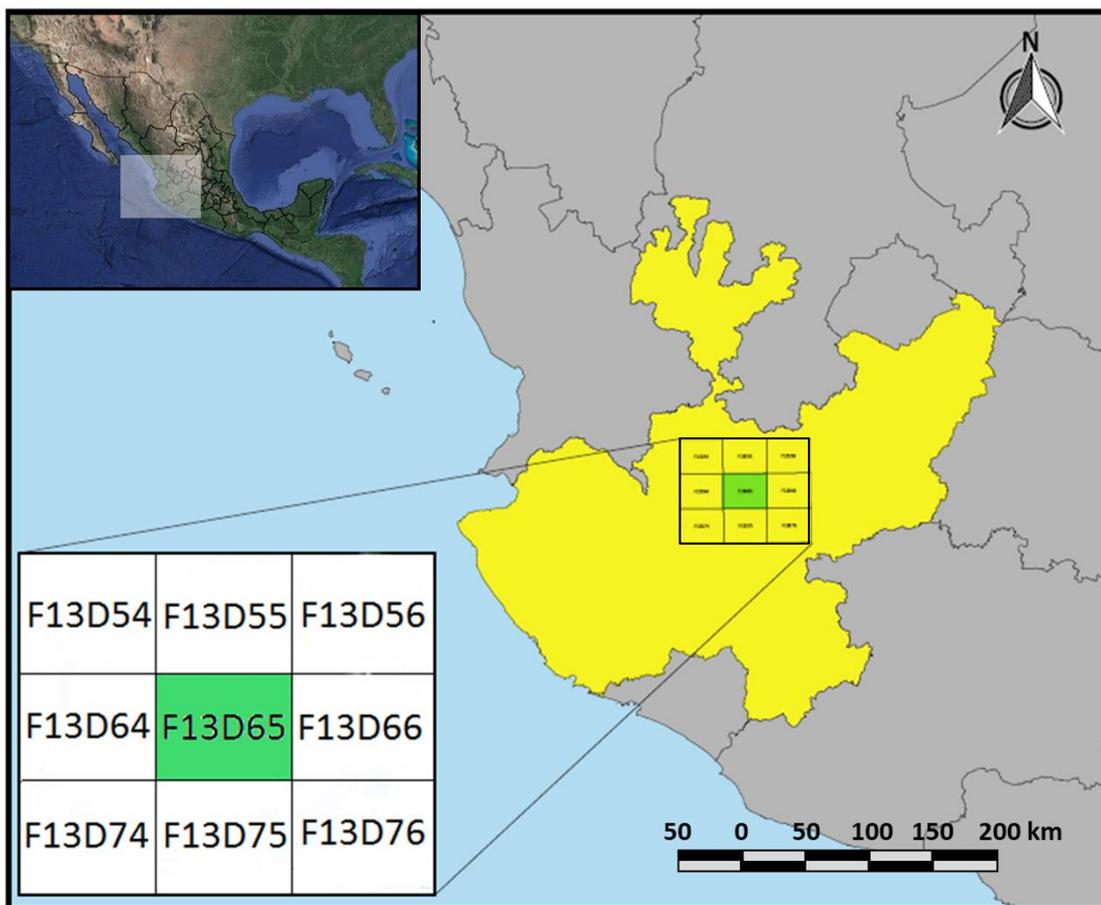


Fig. 1.1. Localización regional del Área de estudio (recuadro verde) en el Edo. de Jalisco, con clave de la carta del INEGI a escala 1:50,000, y claves de las cartas circundantes .

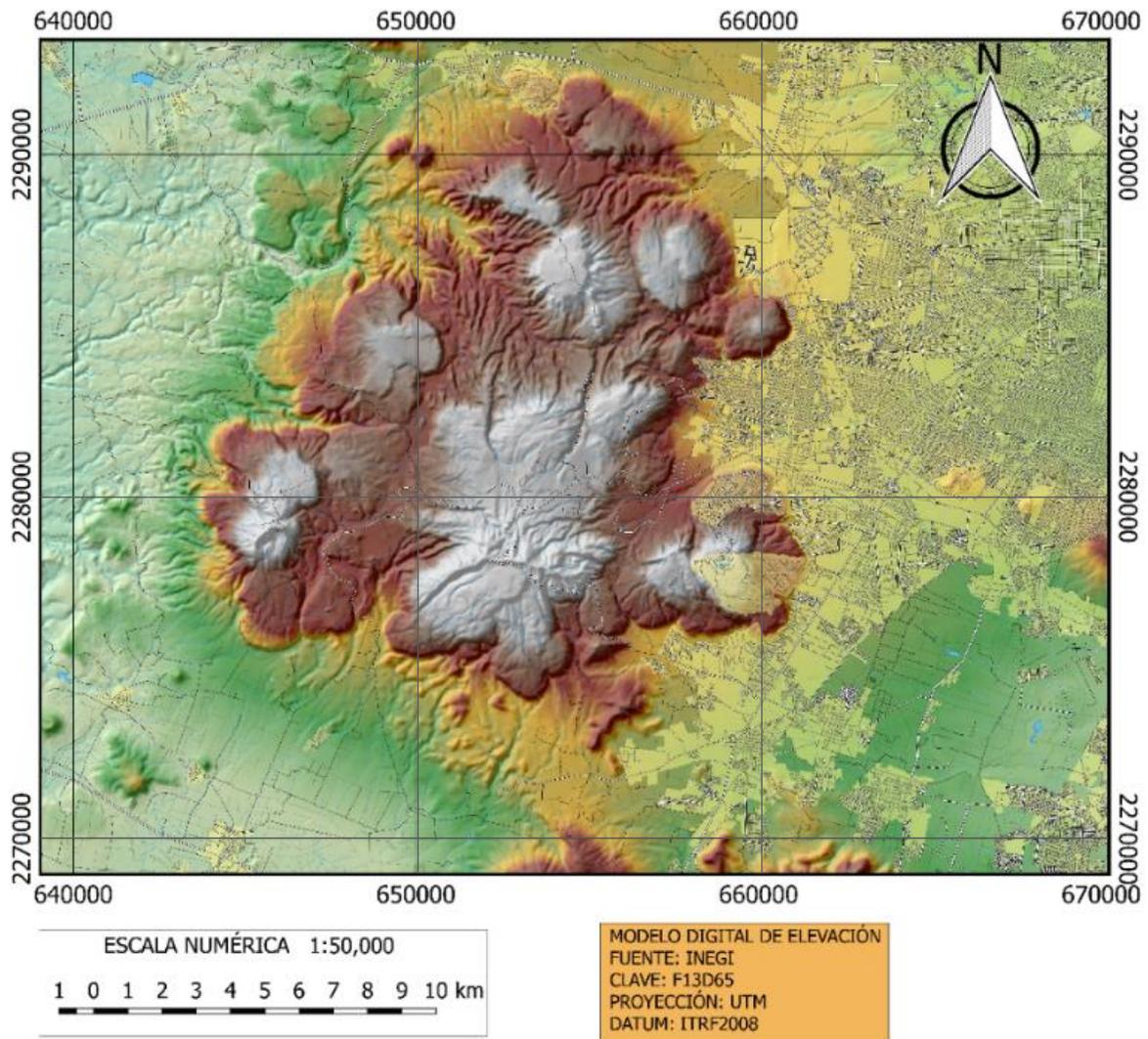


Fig. 1.2. Localización de la caldera de La Primavera. Mapa con modelo digital de elevación. Se puede observar la ciudad de Guadalajara del lado derecho del mapa.

1.2. Hipótesis

- El estudio de la geoquímica de inclusiones de fundido atrapadas en fenocristales permitirá interpretar las condiciones de presión y profundidad de la cámara magmática alimentadora de erupciones post-caldera.
- La caracterización de dichas condiciones puede aportar información importante acerca de la posición de la fuente de calor del sistema geotérmico actual.

- El magmatismo post-caldera de La Primavera puede ser una fuente importante de calor para el desarrollo de un sistema geotérmico de importancia energética.

1.3. Objetivos y metas

1.3.1. Generales

Determinar la evolución magmática y las condiciones barométricas de los eventos eruptivos post-caldera en la caldera La Primavera así como su relación con el sistema geotérmico actual.

1.3.2. Particulares

- Determinar la composición química de las inclusiones de fundido alojadas en cristales, así como de las rocas que contienen a dichos cristales.

1.3.3. Metas Científicas

- Realizar trabajo de campo en la caldera La Primavera para contar con un control estratigráfico de las muestras a analizar.
- Realizar análisis de Inclusiones de fundido, empleando microsonda electrónica (EPMA), para obtener la composición de óxidos mayores.
- Realizar análisis microespectrométricos de inclusiones de fundido, empleando espectrometría Infrarroja (FTIR), para conocer el contenido de volátiles.
- Análisis de geoquímica de roca total de las unidades que tienen cristales con inclusiones de fundido.

1.4. Contenido de la tesis

1.4.1 Capítulo 2. El magmatismo de la FVTM

En este capítulo se hace una introducción a la evolución geológica de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), así como de su petrogénesis. Se presenta un análisis de la transición entre la Sierra Madre Occidental y la FVTM, así como un recorrido del vulcanismo desde el Mioceno medio hasta el Cuaternario.

1.4.2 Capítulo 3. Estudio de inclusiones de fundido en rocas ígneas

El tercer apartado trata sobre las inclusiones de fluido y especialmente las inclusiones de fundido (IFu), algunas de sus características generales, así como los mecanismos de atrapamiento y su evolución post-atrapamiento. Asimismo, se muestran las generalidades de distintas técnicas analíticas que se usan principalmente para el estudio de IFu en rocas ígneas.

1.4.3 Capítulo 4. Evolución del magmatismo en la Caldera de La Primavera

En el capítulo 4 se presenta el contexto geológico de la Caldera de La Primavera basado en estudios previos, incluyendo tectónica regional, basamento y evolución geológica. También se muestra un reporte de lo visto y descrito en el campo. Además, se presentan los materiales, métodos y resultados de este trabajo, que son comparado con resultados de IFu en la Toba Tala realizados por Miguel-Cruz (2016).

1.4.4 Capítulo 5. Discusión

Se discuten los resultados obtenidos del análisis de las inclusiones de fundido en las unidades post-caldera de La Primavera, enfocado a los procesos magmáticos post-caldera y al “plumbing system”.

1.4.5 Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

En este apartado se presentan las conclusiones de este trabajo, y las recomendaciones para estudios de inclusiones de fundido IFu en rocas ígneas.

Capítulo 2. El magmatismo de la Faja Volcánica Transmexicana

2.1. Introducción

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) es un arco magmático continental muy singular en el mundo debido a su posición con respecto a la trinchera y por la gran variedad composicional de magmas que alimentaron las miles de estructuras volcánicas y cuerpos intrusivos. Por esto y porque se concentra la mayoría de la población e infraestructura del país y es al ser una de las regiones geológicamente activas, es de las más estudiadas del planeta (Gómez-Tuena et al., 2005). Su límite en las costas del Pacífico va entre San Blás, Nayarit y Bahía de Banderas, Jalisco, hasta las costas del Golfo de México, en la región de Palma sola Veracruz (Demant y Vincent, 1978).

La gran diversidad de rocas que forman el arco volcánico va desde lavas basálticas, andesíticas y hasta riolíticas; esto puede deberse a la evolución que ha tenido este régimen tectónico convergente, en donde dos placas oceánicas independientes (Rivera y Cocos) de diferente composición, velocidad, espesor y edad, están subduciendo a la placa de Norteamérica. Así como a la composición y grosor de los basamentos que subyacen el arco. Influyen en la dinámica convergente.

Para facilitar el estudio se acostumbra a dividir a la FVTM en tres sectores con base en su geología y tectónica (Demant y Vincent, 1978). Una porción occidental entre la costa del Golfo de California y la junta triple de los rifts de Tepic-Zacoalco, Chapala y Colima; una porción central comprendida entre la junta triple y el sistema de fallas regionales Taxco-San Miguel de Allende; y la porción oriental entre este sistema y la costa del Golfo de México (Fig. 2.1). Su distribución en la parte central y oriental es preferencialmente E-W, en su parte occidental es WNW-ESE, formando un ángulo cercano a los 16° con respecto a la Trinchera Mesoamericana (Gómez-Tuena et al., 2005).

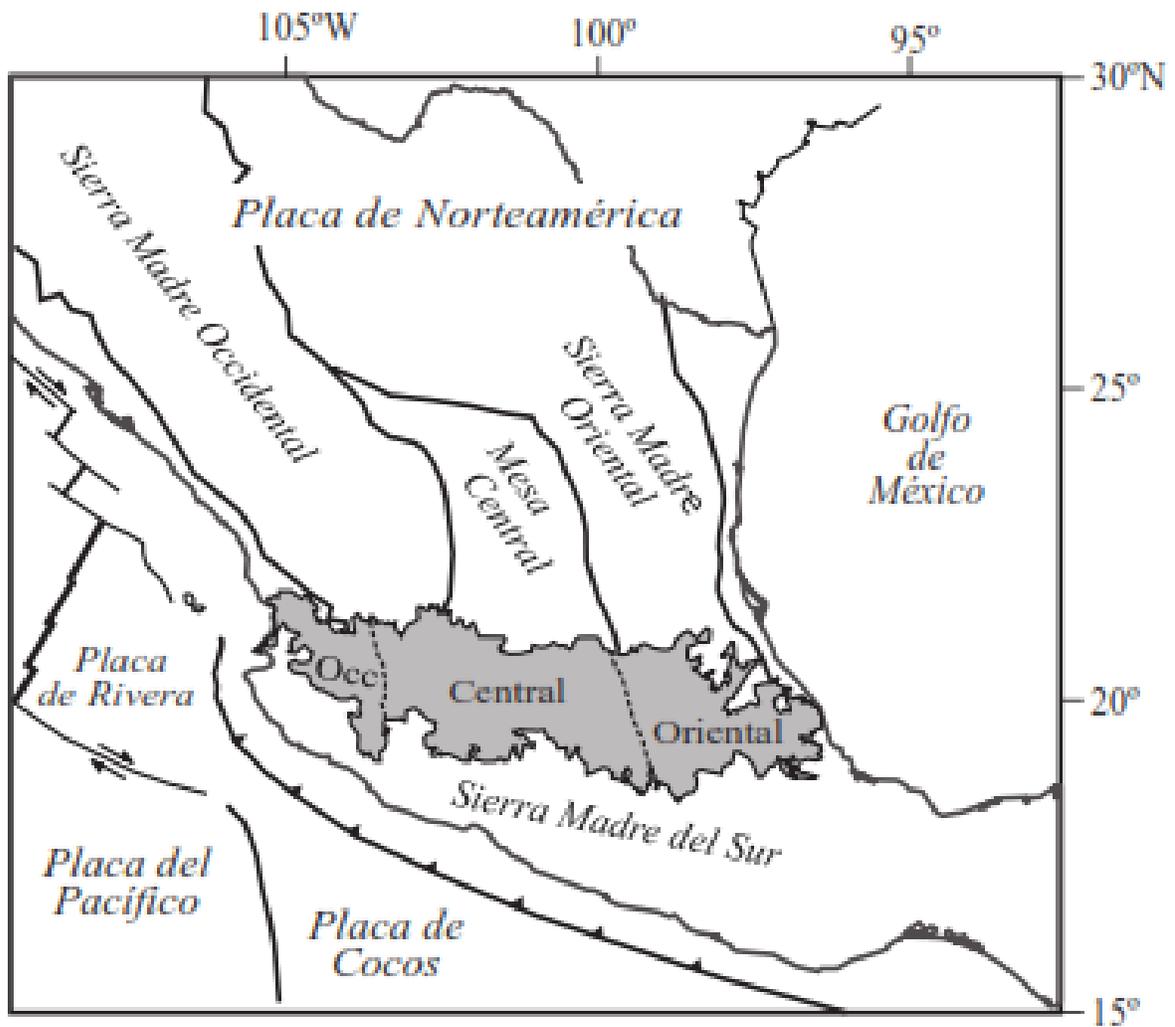


Fig. 2.1. Ubicación de la Faja Volcánica Transmexicana (en gris), de las principales provincias geológicas de México y de las placas tectónicas actuales. También se muestra la ubicación de los tres sectores de la FVTM (Gómez-Tuena et al., 2005).

2.2. Evolución geológica de la Faja Volcánica Transmexicana

De manera muy sintética la historia geológica de la FVTM se puede dividir en cuatro episodios principales: (1) la instauración de un arco composición intermedia en el Mioceno medio y tardío, (2) un episodio máfico del Mioceno tardío, (3) un episodio silíceo de finales de Mioceno que llega a ser bimodal en el Plioceno temprano, y (4) la reinstauración de un arco con gran variabilidad composicional a partir del Plioceno tardío (Gómez-Tuena et al., 2005).

2.2.1. Arco del Mioceno medio y tardío (~19 - 10 Ma)

Los inicios del vulcanismo en la FVTM son desde el Mioceno medio, cuando se emplazó un arco en el centro de México con una orientación preferencial E-W, entre la longitud y la latitud de Morelia-Querétaro (Gómez-Tuena et al., 2005). Los vestigios de la actividad inicial de la FVTM se encuentran en el sector central: en los complejos volcánicos de la Sierra de Mil Cumbres y la Sierra de Angangueo, en Michoacán (Pasquaré et al., 1991; Capra et al., 1997), así también en Tenancingo y Malinalco, Estado de México, y en las rocas de la parte más profunda del relleno de la cuenca de la Ciudad de México (Ferrari et al., 2003) (Fig. 2.2a).

Después, la actividad volcánica del arco se aleja de la trinchera y forma estratovolcanes, conos de lava y el campo volcánico de Apan (García-Palomo et al., 2002) con edades que varían entre aproximadamente 13 y 10 Ma (Gómez-Tuena et al., 2005). En la parte oriental, se originaron cuerpos plutónicos y subvolcánicos de composición gabrítica a diorítica con edades que varían entre 15 y 11 Ma (Gómez-Tuena et al., 2003; Ferrari et al., 2005).

Al parecer no hay vestigios de actividad volcánica en la parte oeste de Morelia y Querétaro durante este lapso. En los pozos profundos perforados en el área del Ceboruco y en la caldera de La Primavera, las lavas del Mioceno superior sobreyacen directamente las lavas andesíticas del Eoceno (Ferrari y Rosas-Elguera, 2000; Ferrari et al., 2003). Sin embargo, algunos centros volcánicos aislados del Mioceno medio se encuentran en Nayarit (Gastil et al., 1979; Ferrari et al., 2000).

2.2.2. Episodio máfico del Mioceno tardío (~11- 7.5 Ma)

La actividad que se desarrollaba en el Mioceno medio y principios del tardío se ve interrumpida por un extenso episodio de vulcanismo máfico que es emplazado desde la costa del Pacífico hasta la costa del Golfo de México (Fig. 2.2b). Este episodio está esencialmente conformado por mesetas basálticas, de carácter fisural (Gómez-Tuena et al., 2005). Ferrari et al. (2000) mostraron que el vulcanismo máfico del Mioceno superior que se desarrolló desde el Golfo de California hasta el estado de Hidalgo tiene características geoquímicas típicas de subducción. Y en cambio, la parte oriental, hacia el norte de Veracruz, presentan características de magmas de intraplaca (Orozco-Esquivel et al., 2003).

2.2.3. Vulcanismo silícico del final de Mioceno (~7.5-5 Ma) y bimodal del Plioceno temprano (~5-3 Ma)

En este episodio la actividad magmática de tipo máfico empieza a disminuir y se vuelve más diferenciado. A finales del Mioceno se expulsan grandes volúmenes de ignimbritas emitidas por calderas, y se emplazan domos riolíticos y dacíticos, formando una franja que se distribuye justo hacia el sur de las rocas producidas en el episodio máfico anterior (Gómez-Tuena et al., 2005) (Fig. 2.2c).

Después de finalizar el vulcanismo silícico del Mioceno tardío, las siguientes manifestaciones se presentaron en el área de Guadalajara y en la parte norte del rift de Colima (Gómez-Tuena et al., 2005). Se ha logrado distinguir que la mayoría de las lavas tipo intraplaca se distribuyen en la parte más alejada del arco; donde, junto con las riolitas, forman una típica asociación bimodal (Ferrari, 2004) en el Plioceno temprano.

En la parte central de la FVTM se pueden encontrar calderas que dieron origen a grandes volúmenes de ignimbritas y tobas. Entre las más conocidas están los Azufres en Michoacán, Amealco en Querétaro.

2.2.4. Arco del Plioceno tardío-Cuaternario

La actividad silícica y bimodal que estaba dominando sobre la FVTM ahora empieza a disminuir y comienza a emplazarse un arco con composición predominantemente andesítico-basáltica (Fig. 2.2d). Las lavas que tienen características geoquímicas de intraplaca siguen apareciendo en la parte occidental de la FVTM, aunque también Richter et al. (1995) y Ferrari et al. (2000) reportan lavas con características más típicas de subducción al parte noroccidente (Gómez-Tuena et al., 2005). Durante el Cuaternario se forman los principales estratovolcanes de la parte occidental, teniendo al complejo volcánico de Colima como el que mayor cantidad de material expulsó en esta porción occidental. Los demás volcanes son más pequeños y están alineados a lo largo de fallas que corresponden con el límite norte del bloque Jalisco. El bloque Jalisco se define como un cuerpo batolítico de edad Cretácica (100-75 Ma) (Schaaf et al., 1995) que aparentemente se levantó durante el Paleógeno (Rosas-Elguera et al., 1996).

En la parte central de la FVTM (Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato) se desarrollaron aparatos monogenéticos, domos de composición intermedia a silícica y campos poligenéticos conformados principalmente por volcanes escudo. Solo hay un estratovolcán que es el Cerro Tenancingo, que ha sido fechado aproximadamente en 0.5 Ma (Ban et al., 1992). En la parte oriental del campo Michoacán-Guanajuato, el vulcanismo se vuelve ligeramente más evolucionado, pero menos continuo.

El vulcanismo en la parte oriental de la FVTM se ve disminuido con algunas excepciones locales, pero se restablece aproximadamente a los 3.7 Ma con el emplazamiento de distintos centros poligenéticos alineados NNW-SSE, al occidente de la ciudad de México (Mora-Álvarez et al., 1991; Osete et al., 2000) y otros centros poligenéticos de tamaño medio hacia el norte de la Cuenca de México, en el campo de Apan (García-Palomo et al., 2002). El vulcanismo máfico lo conforman los conos monogenéticos y los productos más evolucionados los conforman las calderas y los domos. Al oriente de la ciudad de México se desarrolla una cadena de volcanes alineada preferencialmente N-S con algunos de los estratovolcanes más importantes. Aparentemente, todos los estratovolcanes de esta parte de la FVTM son de edades menores a 1 Ma (Gómez-Tuena et al., 2005) (Fig. 2.2d).

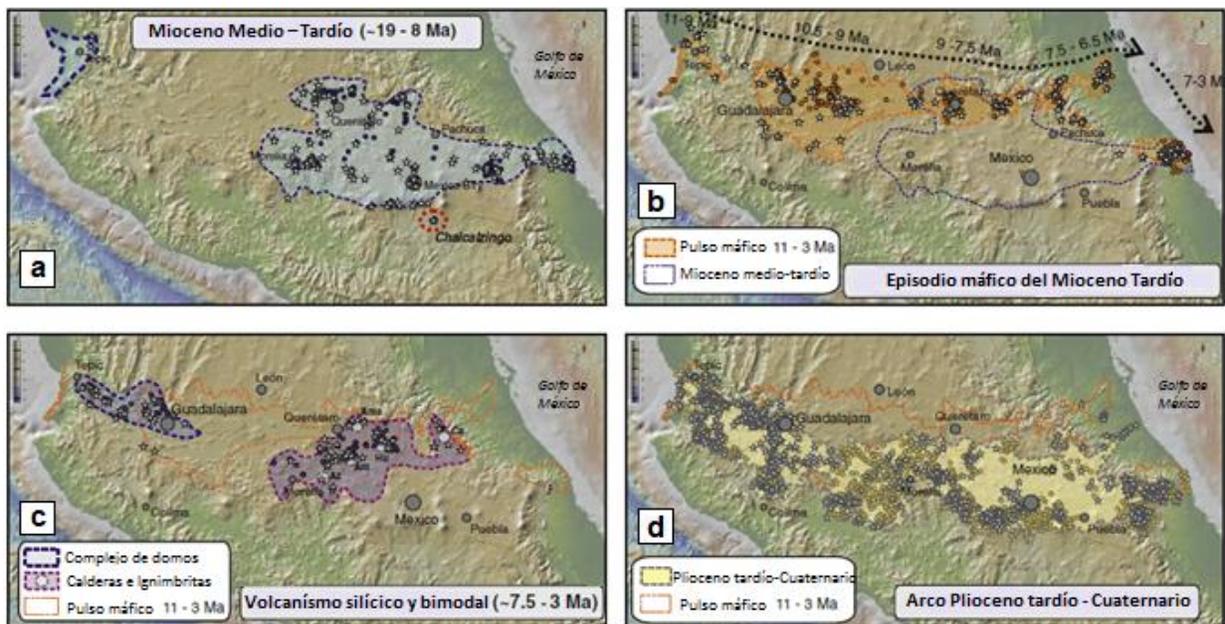


Fig. 2.2 Distribución del vulcanismo en cada etapa. a) Arco del Mioceno Medio – Tardío. b) Episodio Máfico del Mioceno Tardío. c) Vulcanismo Silíceo del Mioceno Tardío al Plioceno Temprano. d) Arco Del Plioceno Tardío –Cuaternario. Modificado de Ferrari et al. (2011)

2.3. Petrogénesis de la Faja Volcánica Transmexicana

Se ha podido distinguir en toda la FVTM distintas composiciones de rocas ígneas emplazadas a partir del Mioceno medio y, gracias al estudio de muchos investigadores se puede contar con un amplio registro de datos geoquímicos de estas rocas. Por conveniencia, Gómez-Tuena et al. (2005) dividieron la variedad composicional de las rocas en cuatro grupos: rocas alcalino-sódicas que tienen características geoquímicas de magmatismo intraplaca; rocas alcalino-potásicas relacionadas con el metasomatismo por la subducción; rocas calcialcalinas comprendidas por los campos monogenéticos y estratovolcanes; y por último, el vulcanismo riolítico principalmente representado por calderas y domos.

En diversas localidades de la FVTM se han identificado rocas alcalinas de carácter sódico con características geoquímicas similares a las observadas en rocas generadas en ambientes tectónicos intraplaca, en general no muestran señales geoquímicas que permitan asumir contribuciones significativas de la placa de subducción o de la corteza continental, lo que implica que existen fuentes del manto enriquecidas que no han sido modificadas significativamente por el proceso de subducción. La presencia de estas lavas es significativa en los extremos occidental y oriental de la FVTM.

Por otra parte, las rocas alcalino-potásicas son relativamente más abundantes en el denominado bloque Jalisco que en el resto de la FVTM, pero también es posible encontrar rocas de estas características químicas en volcanes monogenéticos o derrames fisurales del campo volcánico Michoacán-Guanajuato, y el campo volcánico de Valle de Bravo-Zitácuaro. La distribución geográfica marca claramente la existencia de un frente potásico en la porción occidental y central de la FVTM.

Las rocas calcialcalinas se encuentran ampliamente distribuidas a todo lo largo y ancho del arco, y se han emplazado durante todos sus periodos de actividad. Rocas de este tipo han sido extravasadas a partir de una gran diversidad de estructuras volcánicas: conos cineríticos, volcanes escudo, domos, estratovolcanes, maares, calderas, y también a través de fisuras y derrames de lava que no parecen estar asociados a una estructura volcánica central. En general, las rocas basálticas más primitivas están siempre asociadas a conos cineríticos monogenéticos y derrames fisurales, mientras que los estratovolcanes y las estructuras caldéricas presentan rocas mucho más evolucionadas (Gómez-Tuena et al. 2005).

Gómez-Tuena et al., (2016) señalan que ningún parámetro tectónico, térmico o de composición química explica por sí mismo el carácter distintivamente enriquecido de la FVTM. Además se sugiere que para futuras investigaciones se deben tomar en cuenta procesos como la erosión por subducción y el reciclaje de la corteza mediante la relaminación y el diapirismo

2.3.1. El magmatismo silíceo en la Faja Volcánica Transmexicana

En la FVTM Ferriz y Mahood (1986) reconocen cinco principales centros volcánicos silíceos en la FVTM: La Primavera, Los Azufres, Amealco, Huichapan y los Humeros (Fig. 2.3). Todos estos centros comprenden desde composiciones riolíticas a andesíticas con excepción de La Primavera que es exclusivamente de composición riolítica.

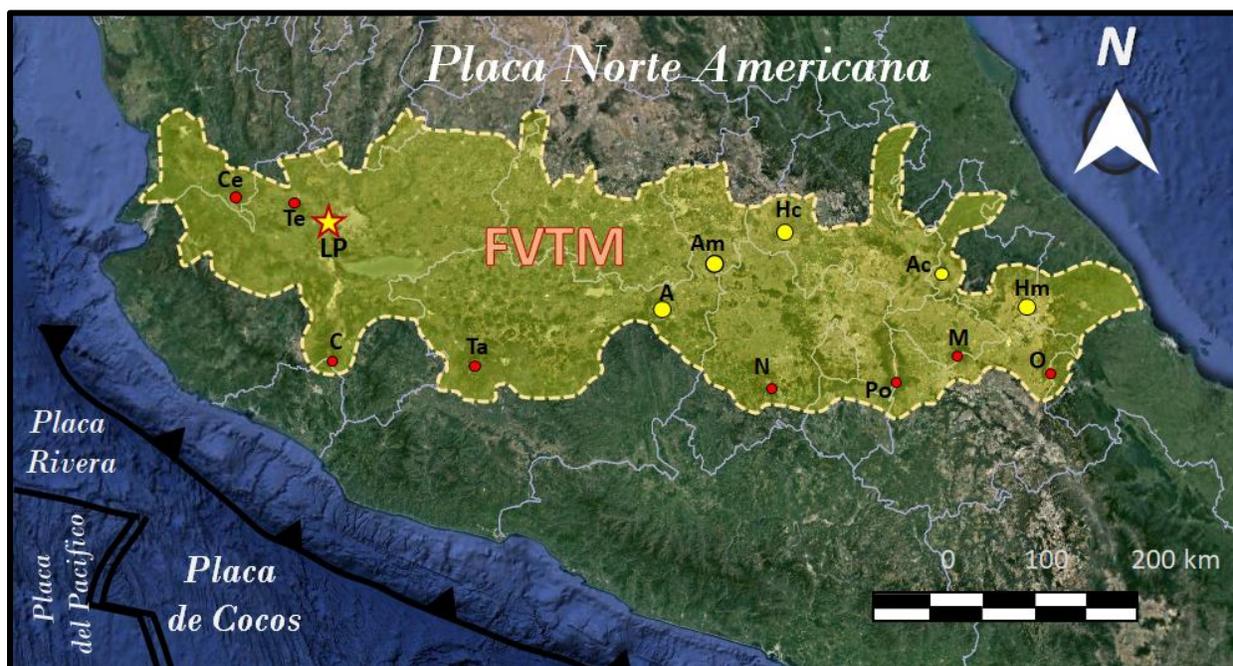


Fig. 2.3. Localización del área de estudio (estrella), de los principales centros riolíticos (círculos amarillos) y de algunos estratovolcanes (círculos rojos) en la FVTM; La Primavera (LP), Los Azufres (A), Amealco (Am), Huichapan (Hc), Aocolulco (Ac), Los Humeros (Hm), Ceboruco (Ce), Tequila (Te), Colima (C), Tancitaro (Ta), Nevado de Toluca (N), Popocatepetl (Po), Malinche (M), Pico de Orizaba (O).

Existen diversas hipótesis para explicar el origen de los magmas riolíticos, aunque Ferriz y Mahood (1986) creen que muchos de los mecanismos para formar magmas riolíticos pueden actuar mutua o secuencialmente. Por otra parte, Gómez-Tuena et al. (2005 y 2007) resumen las características principales del vulcanismo silíceo de la siguiente manera:

(1) En el Mioceno tardío ocurre un episodio exclusivamente riolítico, en el sector occidental y central, en el área norte de la FVTM. En el sector occidental, se emplazaron algunos domos y flujos piroclásticos entre los 7.15 y los 5.2 Ma formando el denominado Grupo Guadalajara. En el sector central se emplaza la caldera de Amazcala (7.3 a 6.6 Ma) y complejos de domos al sur de Querétaro (~6 a 5.4 Ma).

(2) En el Plioceno temprano, las rocas riolíticas coexisten con rocas más máficas e intermedias, y el volumen de las rocas piroclásticas se vuelve proporcionalmente más importante. Se ha observado que los depósitos de ignimbritas presentan un vidrio de composición andesita-basáltica que coexiste con un vidrio de composición riolítica. En el área de Guadalajara, este fenómeno se observó en depósitos con edades comprendidas entre 4.8 y 3.07, en las ignimbritas San Gaspar y Guadalajara. En el sector central, el vulcanismo riolítico se asocia a grandes calderas (Los Azufres, Amealco y Huichapan). En el sector oriental, en una área comprendida entre Tenancingo de Doria y Tlanchinol, afloran depósitos piroclásticos, lavas riolíticas y lavas máficas.

(3) En el Plioceno tardío-Cuaternario se generan magmas peralcalinos asociados a vulcanismo máfico alcalino-sódico en los extremos oriental (en el volcán Las Navajas, en el complejo de domos Magdalena y en La Primavera) y occidental (las calderas de Los Humeros, Acoculco y los domos de la cuenca de Serdán-Oriental), mientras en el centro domina las rocas peraluminosas.

Por otra parte Petrone et al. (2014), modelaron el magmatismo silícico (7.5-3 Ma) en la parte occidental de la FVTM, y concluyeron que se da por la fusión parcial de corteza (complejos gabróticos). El "rollback" del Slab (~7.5 Ma) favorece la fusión por descompresión y magmas máficos ascienden emplazándose en la base de la corteza, dichos magmas funden parcialmente los complejos gabróticos que generan el magmatismo silícico debido a la asimilación cortical y cristalización fraccionada. Fallas extensionales desde el Plioceno (~ 5 Ma) favorece la presencia de magmatismo silícico y máfico en la región.

Capítulo 3. Inclusiones de fundido en rocas ígneas

3.1. Introducción

Las inclusiones de fundido (*melt inclusions*, MI por sus siglas en inglés) son un tipo de inclusiones fluidas (Roedder, 1984), por lo que hay que definir primero a estas. *Las inclusiones fluidas*, son muy pequeñas porciones de fluido que se quedan atrapadas dentro de un mineral a medida que dicho cristal se está formando. El fluido atrapado representa un fluido fósil a partir del cual el mineral huésped precipitó. Una vez formadas, las inclusiones fluidas se comportan como sistemas termodinámicos cerrados, y diversos cambios de fase pueden ocurrir dentro de ellas después de su atrapamiento, si las condiciones termodinámicas en las que se encuentra el cristal huésped cambian. Es por eso que en el laboratorio, donde las condiciones son muy diferentes a las de formación de inclusiones fluidas, las inclusiones normalmente contienen una o más fases en su interior. Así, se pueden observar al microscopio inclusiones monofásicas que contengan una fase líquida (L), o una gaseosa (V); o bien inclusiones multifásicas que contengan una fase líquida dominante y otra gaseosa (L+V); o una fase gaseosa dominante y otra líquida (V+L); y además otras pueden presentar una fase líquida, otra gaseosa y una sólida (L+V+S) (Fig. 3.1).

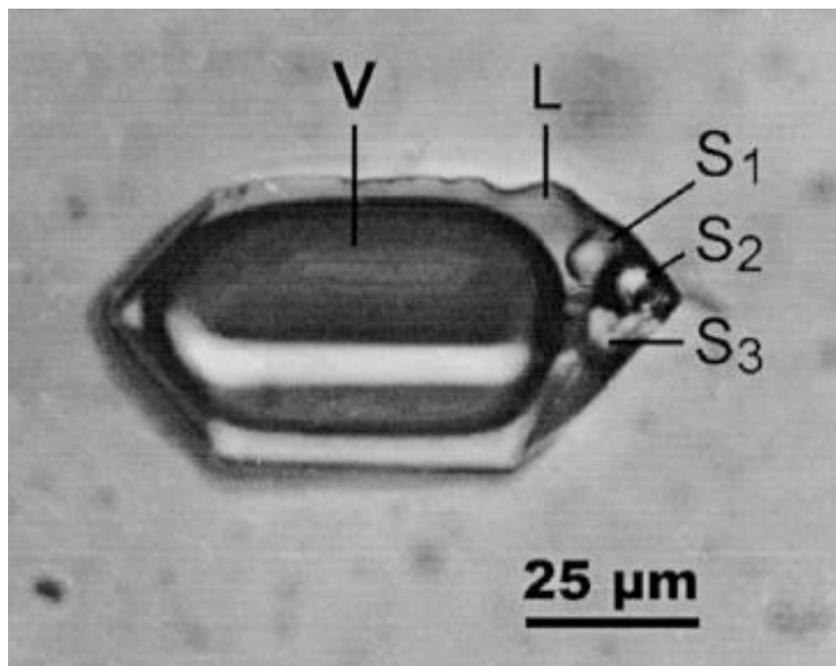


Fig. 3.1. Inclusión fluida multifásica en cuarzo que contiene una burbuja de CO₂ (V), salmuera (L) y varias fases de minerales hijos (S₁, S₂ y S₃). Tomada de Van de Kerkhof y Hein (2001).

En un *atrapamiento homogéneo*, la inclusión originalmente es monofásica, y a medida que las condiciones cambian (p. ej. disminución de temperatura del mineral huésped) una inclusión originalmente líquida puede exsolver una burbuja de gas y una fase sólida también. Dicha inclusión se observaría como una inclusión tipo L+V+S en el laboratorio. En un atrapamiento heterogéneo, puede quedar atrapada más de una fase, como dos fluidos inmiscibles (L_1+L_2). La clasificación de inclusiones como L, V, L+V, L+V+S, etc. se basa en las fases que contienen las inclusiones en condiciones de laboratorio.

Las burbujas de gas (V) dentro de las inclusiones fluidas se forman por la exsolución de volátiles al cambiar las condiciones de atrapamiento. Por otra parte, los cristales hijos son aquellas fases minerales que cristalizaron a partir de los fluidos atrapados en una inclusión fluida, en cuanto el fluido contenido en ellas alcanzó el punto de saturación en un compuesto químico determinado durante su enfriamiento.

Roedder (1984) describe los cambios post-atrapamiento que pueden ocurrir en las inclusiones fluidas. Algunos de estos son: reequilibrio en las paredes de las inclusiones (forma de cristal negativo), coalescencia, estrangulamiento, fuga o decrepitación natural, dilatación, difusión, migración de inclusiones fluidas, etc. Además, Ruth et al. (2018) identifican cambios post-atrapamiento como: deshidratación y rehidratación por la difusión de H a través del cristal huésped, partición de CO_2 en burbujas de vapor, y pérdida de CO_2 debido a la ruptura de la inclusión.

Las inclusiones fluidas también son clasificadas petrográficamente como: primarias, secundarias y pseudosecundarias (Roedder, 1984). Las inclusiones fluidas primarias por definición son atrapadas durante el crecimiento del cristal huésped. Las inclusiones secundarias son atrapadas en algún momento después que concluyó el crecimiento del cristal, formadas por el fracturamiento debido a la penetración de fluidos en zonas de debilidad estructural. Las pseudo-secundarias al igual que las secundarias, son inclusiones formadas en microfracturas, pero a diferencia de las anteriores el crecimiento del cristal aún no había concluido.

Ahora bien, las inclusiones de fundido se forman a partir de un fundido silicatado que es atrapado en una micro cavidad de un cristal ígneo cuando se está formando. Estas inclusiones representan una muy pequeña fracción del fundido silicatado a partir del cual se está formando el mineral que las contiene. Cuando la inclusión está completamente formada y el cristal huésped completamente cristalizado, la inclusión de fundido se enfría y puede transformarse en vidrio, por lo que también en ocasiones se les denomina inclusiones de vidrio (glass inclusions).

En la historia de la petrología, el estudio de las inclusiones fluidas empieza primero con Sorby (1858), seguido de varios autores que han publicado sobre el tema y han aportado con distintos tipos de estudios (Roedder, 1984). En rocas ígneas se está implementando cada vez más en investigaciones petrológicas ya que puede proporcionar información importante para conocer la composición de los magmas y seguir la evolución de sus sistemas (Frezzotti, 2001).

El propósito de este capítulo es describir de manera general qué son las inclusiones de fundido, cuáles son sus características generales (mecanismos de atrapamiento, evolución post-atrapamiento, etc.), y conocer que técnicas analíticas se utilizan para el estudio de estas inclusiones.

3.2. Características generales

Las inclusiones de fundido (en adelante referidas en esta tesis como IFu) son pequeñas porciones de magma que quedan atrapadas en los minerales cuando se están formando, el fundido no cambiará su composición química original si el sistema no se ve perturbado, pues la inclusión se comporta como un sistema cerrado después de su formación (Frezzotti, 2001). En condiciones de laboratorio consisten principalmente de vidrio \pm una o más burbujas de gas \pm minerales hijos (Fig. 3.2a). Generalmente para describir el contenido de las IFu, en los textos se utilizan las letras G (*glass*), V (*vapour*) y S (*solid*) para referirse al vidrio, fases gaseosas y minerales hijos respectivamente. Las fases presentes en inclusiones de un mismo cristal pueden variar, pues puede haber inclusiones monofásicas a multifásicas (Fig. 3.2b). Se pueden encontrar en minerales tanto de rocas intrusivas como de rocas extrusivas. Los minerales huésped más utilizados para analizar las inclusiones de fundido son comúnmente el cuarzo, olivino, feldespatos o minerales formadores de roca.

Los tamaños de las IFu por lo general son de medidas micrométricas, hay menores a 20 μm y algunas llegan a tener más de 500 μm de longitud. Sus formas pueden ser desde alargadas, redondeadas, con forma de cristal negativo, irregulares, etc. Investigadores han visto que las inclusiones con forma de cristal negativo (Fig. 3.2a) tienen tal forma porque las paredes de la inclusión se reequilibran siguiendo preferentemente la forma del cristal que las contiene. El reequilibrio puede darse por el calentamiento de estas inclusiones o porque se formaron antes que otras inclusiones irregulares en el mismo cristal (Frezzotti, 2001).

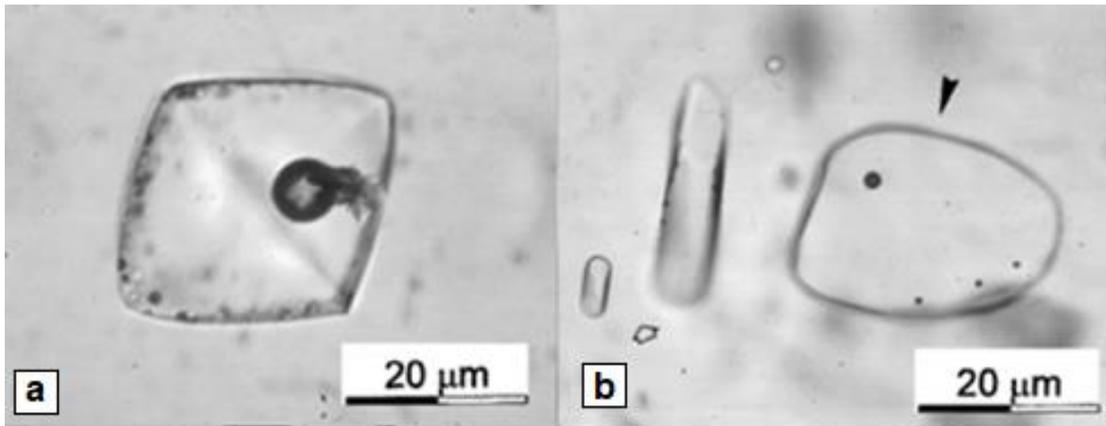


Fig. 3.2. Fotomicrografías de inclusiones de fundido (IFu) alojadas en cuarzo mostrando las fases características de las inclusiones de fundido. (a) IFu con forma de cristal negativo (forma bipiramidal). La inclusión contiene vidrio, una burbuja y un pequeño mineral hijo. (b) Inclusiones de fundido en cuarzo, se puede ver una gran inclusión con muchas burbujas (flecha negra) y se pueden ver una inclusión con forma alargada y una más pequeña sin burbuja de gas (flecha sin relleno). Tomada de Frezzotti (2001).

La distribución de dichas inclusiones dentro de los cristales puede depender de distintos factores como, por ejemplo: la distribución preferencial en un plano de la estructura del cristal (Fig. 3.3a) o distribución preferencial en los planos de debilidad y fractura, aunque también pueden estar distribuidas aleatoriamente. La distribución también depende mucho de los mecanismos de atrapamiento.

Para hacer un buen estudio, primero hay que hacer una descripción de campo ubicando las unidades de donde se obtienen las muestras. Posteriormente hacer petrografía a detalle tanto de rocas como de las mismas inclusiones, y para esto se necesita del microscopio petrográfico, debido a que las inclusiones apenas miden unas cuantas decenas de micras, así se podrá detectar las inclusiones que son útiles (inclusiones primarias) para que los resultados sean representativos y el estudio sea exitoso. Generalmente no se eligen inclusiones que se ven afectadas por procesos posteriores al atrapamiento.

Sorby (1858) propuso dos pasos importantes para el estudio de inclusiones: primero la identificación de las características petrográficas (forma, tamaño, color, fases presentes, etc.), y después caracterizar la evolución post-atrapamiento de la inclusión (Frezzotti, 2001).

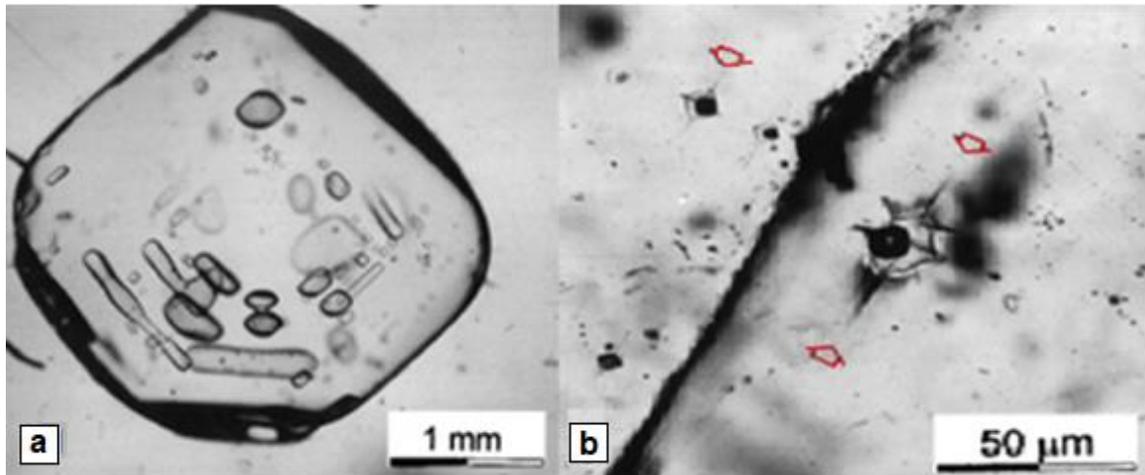


Fig. 3.3. a) Típica distribución de las inclusiones de fundido (IFu) en un fenocristal de cuarzo bipiramidal recortado perpendicularmente al eje cristalográfico c (001). La distribución de las inclusiones primarias sigue la simetría del cuarzo. b) IFu en un fenocristal de cuarzo de un pórfido de microtonalita, Calabona, Cerdeña, Italia (Frezzotti, 2001). Las IFu contienen grandes burbujas de gas, y microfracturas que se extienden desde los ápices de inclusión. Grupos de pequeñas inclusiones fluidas forman halos grisáceos en las microfracturas de las IFu. La forma de las inclusiones fluidas se interpretan como resultado de la decrepitación de las IFu debido a la sobresaturación de volátiles, que ocurrió después de la formación de inclusión..

3.2.1. Mecanismos de atrapamiento

Las inclusiones generalmente son atrapadas dentro de cristales como resultado de alguna irregularidad presente en condiciones de crecimiento del cristal. Roedder (1979), menciona que los principales mecanismos por los que puede ser atrapada una inclusión son:

a) Crecimiento repentino (crecimiento esqueletal). Puede ser causado por pérdida de volátiles como resultado de la liberación de presión en la erupción (Fig. 3.4a).

b) Disolución parcial. Un cristal que está en sus etapas tempranas de crecimiento es disuelto, lo cual da como resultado pequeñas inclusiones, y se disponen siguiendo la superficie de disolución (Fig. 3.4b).

c) Por inclusiones sólidas. Fases sólidas adyacentes a los cristales que están creciendo, son atrapadas como inclusiones, estas pueden o no adherir fundido, pero la fase sólida indica que el fundido estaba saturado al menos en otra fase (Fig. 3.4c).

d) Crecimiento esqueletal o dendrítico. Conforme la temperatura descende, un magma se puede sobresaturar de una fase dada si no nuclea, y cuando finalmente comienza la nucleación, origina un crecimiento rápido del cristal, hasta que el grado de sobresaturación es reducido (Fig. 3.4d).

e) Crecimiento rápido en un hábito tabular. Es muy similar al crecimiento dendrítico, pero en minerales con formas tabulares (Fig. 3.4e).

f) Por fracturamiento del cristal. Estas inclusiones pueden ser las secundarias o las pseudo-secundarias, dependiendo si el crecimiento del cristal estaba concluido. Aquí los cristales pueden ser fracturados por fluidos y “resanados” de tal manera que este fluido no necesariamente es el mismo con el que se formó el cristal (Fig. 3.4f).

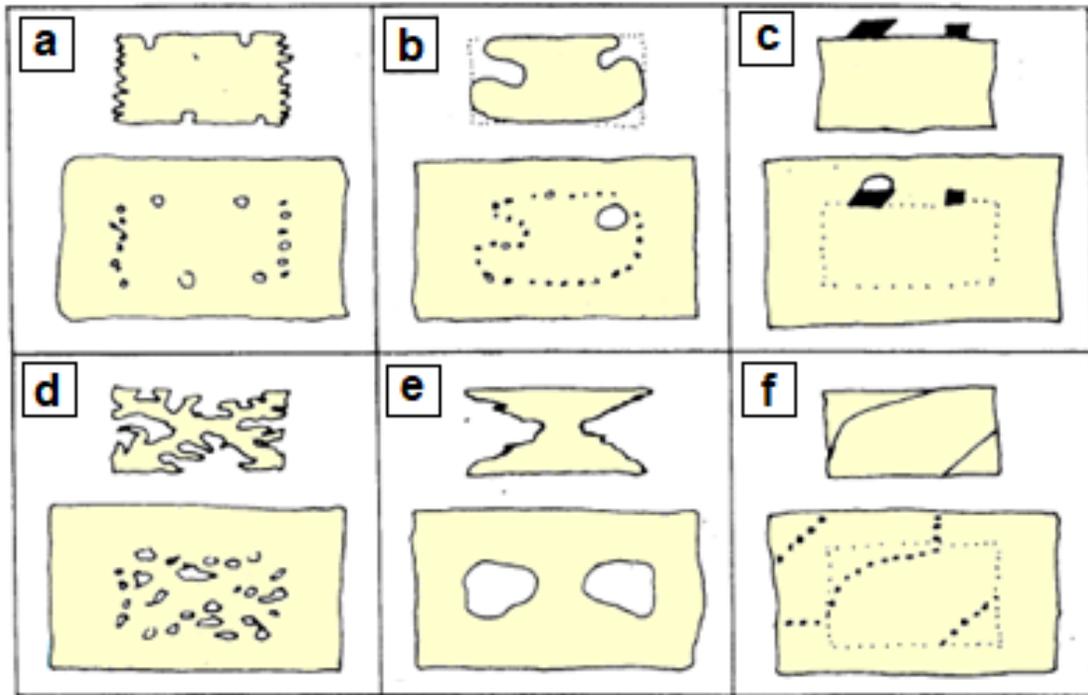


Fig. 3.4. Los seis mecanismos más comunes para el atrapamiento de inclusiones de fundido silicatado. a) Crecimiento repentino. b) Disolución parcial. c) Por inclusiones sólidas. d) Crecimiento dendrítico o esquelético. e) Crecimiento rápido en un hábito tabular. f) Por fracturamiento (Roedder, 1979)

Cabe mencionar que el crecimiento esquelético se puede generar también por un suministro no uniforme de compuestos a las caras cristalinas, y por subenfriamiento. Otro mecanismo que podría atrapar inclusiones es la inmiscibilidad (más adelante en 3.2.3), ya que si se presenta en el momento del crecimiento puede generar irregularidades en el cristal, y resulta en el atrapamiento de las fases inmiscibles (Lowenstern, 1995).

3.2.2. Evolución de las inclusiones de fundido después del atrapamiento

Los magmas antes de hacer erupción se encuentran casi en su totalidad fundidos, por lo que cristalizan fases tempranas de minerales que pueden atrapar el fundido y formar inclusiones. Estas inclusiones suelen tener una evolución post-atrapamiento, pues muchas veces durante el enfriamiento suceden procesos como la cristalización y devitrificación de la inclusión, pudiendo ser modificada (Roedder, 1992; Frezzotti, 2001).

Diversos investigadores han encontrado que hay una relación entre las fases presentes de una inclusión con su velocidad de enfriamiento. Se ha observado que en tasas de enfriamiento lento el fundido atrapado puede precipitar en las paredes de la inclusión fases cristalinas del mineral huésped o minerales hijos. Por otro lado, tasas de enfriamiento rápido pueden formar inclusiones de casi puro vidrio y contener una pequeña burbuja de gas. La burbuja puede ser esencialmente solo vacío, si la presión del fundido es baja, pero muchas especies volátiles tales como el agua y CO₂ pueden ser separados en nuevas fases fluidas, formando un denso fluido gaseoso en altas presiones (Roedder, 1979).

El tamaño de las inclusiones también tiene una relación con las fases presentes en estas. Por ejemplo, en tasas de enfriamiento “moderadas”, las inclusiones más grandes de un cristal pueden contener una o varias burbujas, y las inclusiones más pequeñas de ese mismo cristal, no tienen burbujas por lo que son prácticamente sólo vidrio (Fig. 3.2b y 3.5).

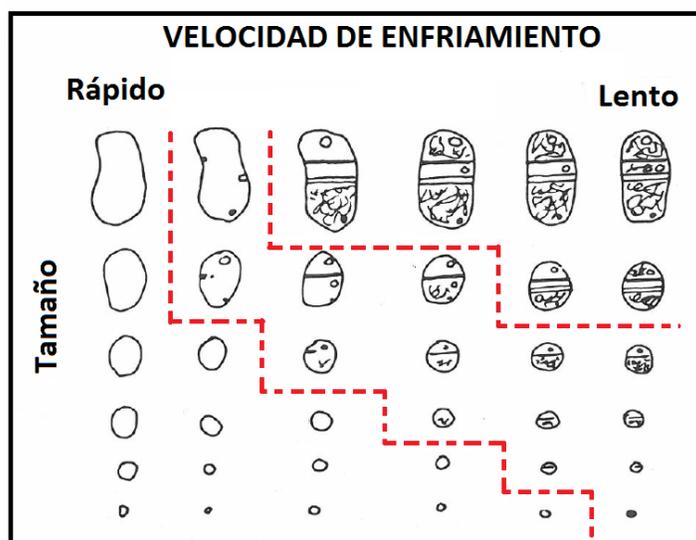


Fig. 3.5. Diagrama que muestra los efectos de la velocidad de enfriamiento y tamaño sobre la nucleación y crecimiento de fases dentro de inclusiones de fundido en olivino. Tomada de Roedder (1979).

3.2.3 Inmiscibilidad de fluidos

Un proceso para evaluar en las inclusiones es la inmiscibilidad de fluidos, ya que es un proceso importante en la formación y/o evolución de una inclusión de fundido. Sorby (1958) utiliza la palabra inmiscibilidad para referirse a la existencia, en equilibrio, de dos o más fluidos policomponentes, con propiedades y composición distintas.

Existen dos tipos de atrapamiento, el homogéneo y el heterogéneo. El primero, se da cuando un fundido homogéneo es atrapado en la cavidad de un cristal en crecimiento y forma una inclusión, en esta inclusión puede haber inmiscibilidad después del atrapamiento *in situ*, ya sea por enfriamiento o por procesos de cristalización. Cabe mencionar que, si el fundido está sobresaturado en volátiles, y el ascenso del magma es muy rápido, la inclusión decrepitará (Fig. 3.3b) por el exceso de presión interna con respecto a la de su entorno (Frezzotti, 2001).

El atrapamiento heterogéneo puede ocurrir por inmiscibilidad magmática. Cuando un cristal se está formando puede atrapar en sus inclusiones dos o más fases fluidas como una mezcla heterogénea, y las relaciones de las fases presentes en las inclusiones, serán diferentes en un mismo mineral. Si el magma fue sobresaturado con fases fluidas distintas en el momento del atrapamiento, las inclusiones tendrán porciones variables de fundido y volátiles (Frezzotti, 2001). A diferencia de lo que pasa con el atrapamiento homogéneo la inmiscibilidad de fases fluidas se produce antes de que se forme la inclusión.

3.2.4. Inclusiones de fundido en depósitos piroclásticos

En fenocristales las inclusiones fluidas no son afectadas por el intemperismo, siempre y cuando el cristal huésped no se encuentre fracturado, por lo que podrían proporcionar la última línea de evidencia sobre los procesos que producen al mineral huésped. Por ejemplo, las IFu en cristales de cuarzo en suelos tropicales puede ser usadas como indicador de un origen volcánico. Asimismo, las IFu en cristales derivados de fragmentos de pómez de caída (enfriamiento rápido) serán vítreas, mientras que las IFu en un flujo piroclástico podrían estar completamente devitrificadas (Roedder, 1984) (Fig. 3.5).

3.3. Técnicas de estudio

Una investigación adecuada sobre inclusiones de fundido se basa en que esta es un sistema cerrado, y en la buena selección de inclusiones hecha con una cuidadosa petrografía. Con la petrografía de las inclusiones podremos caracterizar procesos magmáticos como la inmiscibilidad de fluidos.

Hoy en día es bien conocida la importancia del contenido de volátiles (H₂O, CO₂, S, Cl) en procesos magmáticos (alta temperatura) y procesos de alteración (baja temperatura). Por ejemplo, el H₂O, proporcionan la energía mecánica de las erupciones volcánicas explosivas, y su presión puede afectar la relación cristal-fundido y determinar el orden de cristalización de las fases (Rutherford & Devine, 1988, 1995).

Los datos químicos pueden ser obtenidos mediante varios métodos analíticos (Frezzotti, 2001). Para el estudio de contenidos volátiles y composición de materiales geológicos, han sido aplicadas una variedad de técnicas analíticas. Los principales métodos se dividen generalmente en cuatro clases (Ihinger et al., 1994):

1) Técnicas de extracción de masa.

2) Técnicas de bombardeo de partículas energéticas:

2a) EPMA – Electron probe micro-analysis

2b) SIMS – Secondary ion mass spectrometer

3) Técnicas de espectroscopía vibratoria:

3a) FTIR – Fourier-transform infrared spectroscopy

3b) Espectroscopía RAMAN

4) Microtermometría.

Se dará a continuación una breve explicación de cada una de las técnicas analíticas (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Resumen de técnicas analíticas para el análisis de inclusiones de Vidrio. Tomada y modificada de Frezzotti (2001).

Técnica	Energía Incidente	Energía Emitida	Preparación de la muestra	Datos obtenidos	Pros	Contras
Microtermometría de alta temperatura	$\Delta T^{\circ}C$		Muestra pulida por ambas caras.	Temperatura de cristalización de los minerales hijos y temperatura de homogenización y fusión.	Mínima preparación de la muestra	Puede decrepitar la inclusión.
EPMA (Microsonda electrónica)	Haz de electrones	Rayos X característicos	MI expuesta, pulida montada en portaobjetos y cubierta por grafito u oro.	Elementos mayores y volátiles (Cl, F y S)	Requiere poca cantidad de muestra	Migración de elementos (Na), no mide directamente el H ₂ O y es un método destructivo
SIMS (Secondary ion mass spectrometry)	Haz de iones de alta energía	Iones secundarios	MI Expuesta y pulida y cubierta por grafito u oro	Elementos Mayores, traza e isotopos	Requiere poca cantidad de muestra	Método destructivo
FTIR (Espectrometría Infrarroja con Transformada de Fourier)	Radiación Infrarroja	Energía de transición del modo vibraciones de las moléculas	MI Expuesta y pulida por ambas caras.	Cuantificación de H ₂ O, OH ⁻ , CO ₂ y (CO ₃) ²⁻	Método no destructivo	Se requiere conocer el espesor de la MI
Espectroscopia RAMAN	Laser (azul, verde)	Luz dispersada Inelástica	Muestra pulida	Cuantificación de volátiles presentes en la burbuja de la inclusión, caracterización de los minerales hijos	Método no destructivo	Vidrios con alto contenido de U fluorescen, la resina también puede fluorescen. Haz de alta energía puede ser destructivo

3.3.1. Microsonda electrónica o EPMA (*Electron probe micro-analysis*)

La microsonda electrónica es una de las técnicas más rutinarias para estudios de materiales geológicos. En inclusiones de fundido aporta información sobre la composición de elementos mayores del fundido, y en estudios especialmente desarrollados, de algunos elementos traza. Pequeñas áreas pueden ser analizadas por un haz de electrones con aproximadamente 20 μm de diámetro y un área menor a 320 μm^2 (King et al., 2002). Los elementos que podemos analizar con este proceso son los de número atómico mayor que 3 (a partir de berilio) hasta el uranio. Por desgracia, no se pueden analizar litio o helio, y mucho menos aún, hidrogeno, cosa que implica que el análisis de minerales hidratados tiene más dificultades (Melgarejo et al., 2010). La figura 3.6 muestra una microsonda electrónica modelo *CAMECA SX 100* y un esquema con todos sus componentes internos.

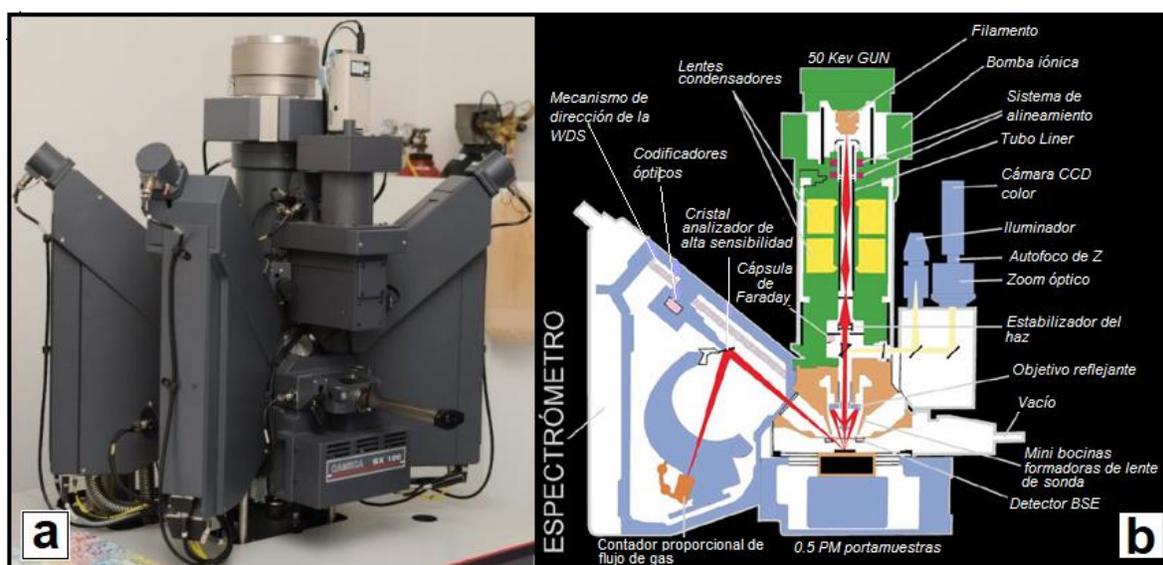


Fig. 3.6. a) Microsonda electrónica CAMECA SX 100 b) Esquema de equipo de microsonda electrónica (Melgarejo et al., 2010).

La preparación de las muestras es rutinaria, se debe exponer a la superficie la inclusión de fundido, estar perfectamente pulida, limpia y seca, también debe ser previamente cubierta por una capa de un material conductor, que por lo general es grafito u oro. La muestra es introducida en la cámara, al vacío, y se busca la zona de interés con el microscopio óptico. Se enfoca el haz de electrones en el punto de interés y comienza el análisis. Mientras dura el impacto electrónico, la muestra emite continuamente diversas radiaciones X en todas las direcciones, cada una de las cuales tiene una energía característica de un elemento. El detector realiza el conteo de la radiación X que detecta de cada elemento en un tiempo determinado, una vez cuantificada esta intensidad,

la medición de un elemento termina y se repite hasta que sean analizados todos los elementos. La intensidad de una determinada radiación X depende de la cantidad del elemento correspondiente que haya en la muestra, para determinar la cantidad del elemento, se compara la intensidad producida por el mineral con la que generan un patrón de composición conocida (Melgarejo et al., 2010).

Las principales ventajas del análisis con microsonda electrónica son una buena resolución espacial, y que es accesible para las Ciencias de la Tierra. Las desventajas son que este, método no determina directamente el contenido de H₂O, muchas veces el H₂O se estima por diferencia, es decir los volátiles totales equivalen al resultado de la resta: (100 wt. %) – (total analítico) de elementos mayores. Los errores analíticos pueden ser grandes (>0.5 wt. %; poca precisión) o sistemáticos (poca exactitud). Generalmente no es factible analizar fundidos con pocas cantidades de H₂O (aproximadamente 1wt. %), también hay que tener cuidado en el análisis para evitar la pérdida de Na y el crecimiento en Al y Si (Devine et al., 1995). Los errores más grandes son usualmente ligados con la estimación de Na, esto debido al fenómeno de migración alcalina o pérdida de Na durante el análisis de vidrios ricos en SiO₂ (Na se aleja del volumen excitado del que se generan los rayos X) (Devine et al., 1995).

3.3.2. Microsonda iónica (SIMS: Secondary ion mass spectrometer)

La SIMS se usa en distintos sectores de la industria (principalmente la industria semiconductora), pero también es una herramienta demasiado útil para la geoquímica. En inclusiones de fundido es posible medir isotopos, así como elementos mayores y traza. En estudios de contenidos volátiles la SIMS ha sido exitosa para analizar H, C, S, F y Cl (Ihinger et al., 1994).

El SIMS usa un haz de iones primarios de alta energética (3-20 KeV) para bombardear la superficie de una muestra pulida. Cada que los iones impactan la superficie, ocurre pulverización catódica, produciendo la emisión de partículas secundarias ionizadas (iones secundarios). En general, los iones secundarios se aceleran en un espectrómetro de masas donde son seleccionados por su masa y energía, y son detectados por un multiplicador de electrones (Ihinger et al., 1994). En la figura 3.7 se ilustra esquemáticamente los componentes básicos en un equipo SIMS.

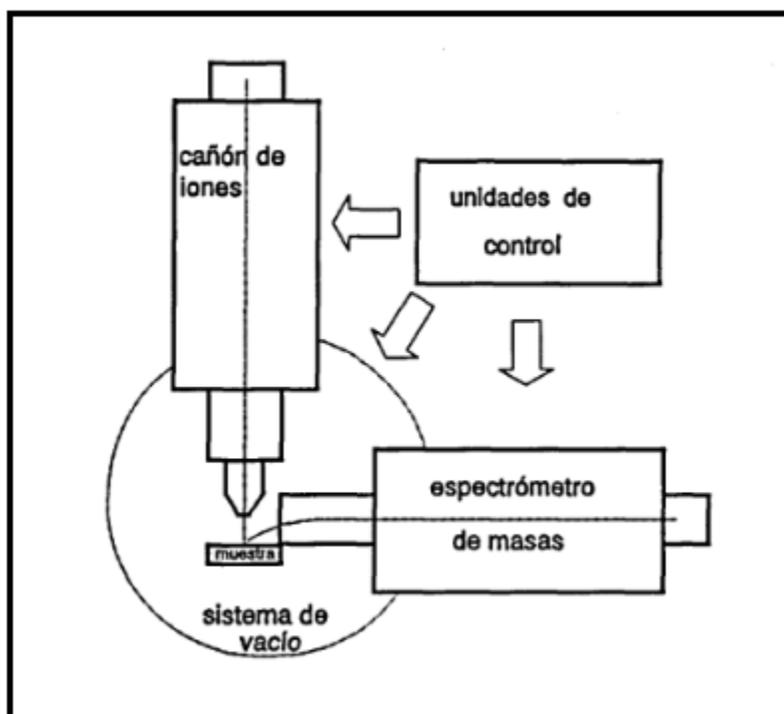


Fig. 3.7. Esquema de los componentes básicos en un equipo SIMS.

La técnica SIMS tiene la ventaja de una preparación fácil de la muestra y análisis de áreas pequeñas (<math> < 200 \mu\text{m}^2 </math>), la precisión del método puede ser mejor que 5 % para muestras que contengan más del 1 % en peso de H_2O . Sin embargo, algunos investigadores han visto que la calibración no es sencilla porque la química de la muestra afecta el rendimiento de iones de H, además el acceso a una microsonda iónica puede no estar disponible para algunos investigadores (Devine et al., 1995; King et al., 2002).

3.3.3. Espectroscopía infrarroja (FTIR: *Fourier-transform infrared spectroscopy*)

El microanálisis con espectroscopia infrarroja (FTIR) tiene la capacidad de detectar especies volátiles en los fundidos, por ejemplo, H_2O , OH^- , CO_2 y CO_3^{2-} , además proporciona excelente sensibilidad analítica (aproximadamente 10 ppm), exactitud y precisión (<math> < 0.1 \text{ wt.}\% </math>) (Devine et al., 1995). Los análisis de muestras geológicas son generalmente en modo de transmisión sobre áreas de aproximadamente 1500 a 8000 μm^2 (King et al., 2002), por lo que radiación infrarroja (IR) es transmitida a través de la muestra y es colectada por un detector. Un análisis de transmisión de FTIR proporciona una amplia señal para el detector, pero tiene desventajas: la muestra debe ser una oblea doblemente pulida (especialmente difícil para trabajos de inclusiones de fundido), el

límite de resolución espacial del instrumento requiere una inclusión >30 μm de diámetro para ser analizadas, y que los valores de los coeficientes de absorción molar (ver capítulo 4, sección 4.3.4) para especies hidratadas (H_2O , OH^-) están en función de la composición global del vidrio. Adicionalmente, se debe conocer el espesor de la muestra (Devine et al., 1995).

En esta técnica se usa un microscopio unido a un espectrómetro, así como un detector que está equipado al microscopio (Fig. 3.8). Para la adquisición de todos los espectros, el sistema se purga con gas seco N_2 para minimizar la interferencia del vapor de H_2O atmosférico y dióxido de carbono (King et al., 2002).

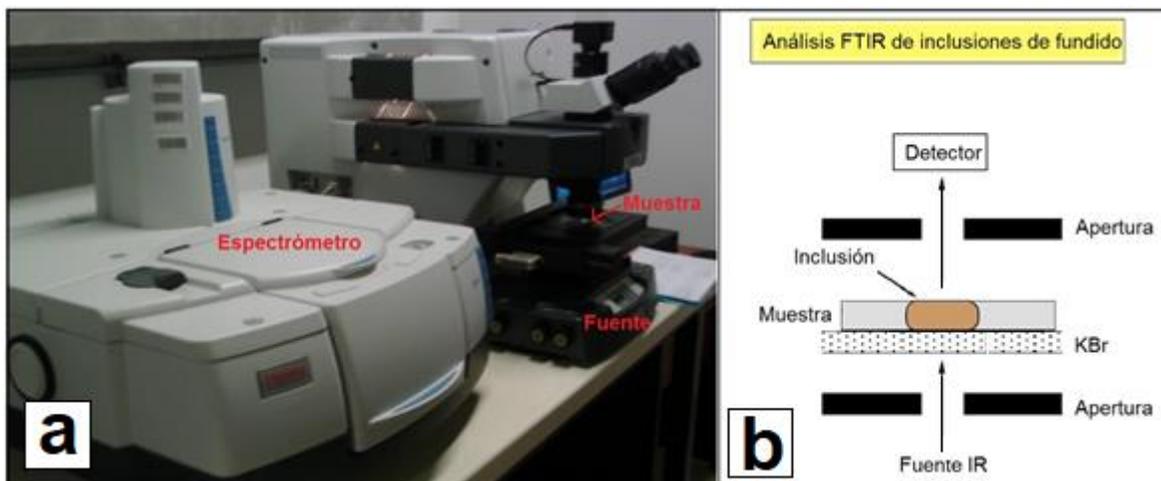


Fig. 3.8. a) Fotografía de equipo FTIR. b) Esquema del análisis FTIR en inclusiones de fundido.

El haz de la fuente infrarroja pasa por un divisor de haz, que separa la luz en dos haces de igual intensidad. Un haz se dirige a un espejo fijo y el segundo haz a un espejo móvil. Ambos espejos reflejan la luz de nuevo en el divisor de haz, donde los dos haces se recombinan y se envían a la muestra (Fig. 3.9). Debido a que uno de los espejos se mueve periódicamente a lo largo del eje del haz de luz, la interferencia constructiva o destructiva se produce cuando los dos haces se recombinan en el divisor de haz, dependiendo de la posición instantánea del espejo móvil. El resultado es un haz de luz incidente con fluctuación regular, y una intensidad dependiente del tiempo $I_0(t)$, que se envía a la muestra. Si no hay muestra presente en el trayecto de la luz, el haz que llega al detector contiene todas las longitudes de onda emitidas por la fuente. La intensidad luminosa fluctuante es registrada por el detector y almacenada como un interferograma. El resultado deseado suele ser un espectro de intensidad en función de la frecuencia, que se obtiene realizando la transformada de Fourier temporal de la función $I(t)$ en el tiempo inverso o en el

dominio de la frecuencia. Cuando no hay ninguna muestra, el resultado es un espectro en blanco de la luz emitida del detector, multiplicada por la curva de sensibilidad del detector y la función de transmisión del instrumento (Ihinger et al., 1994).

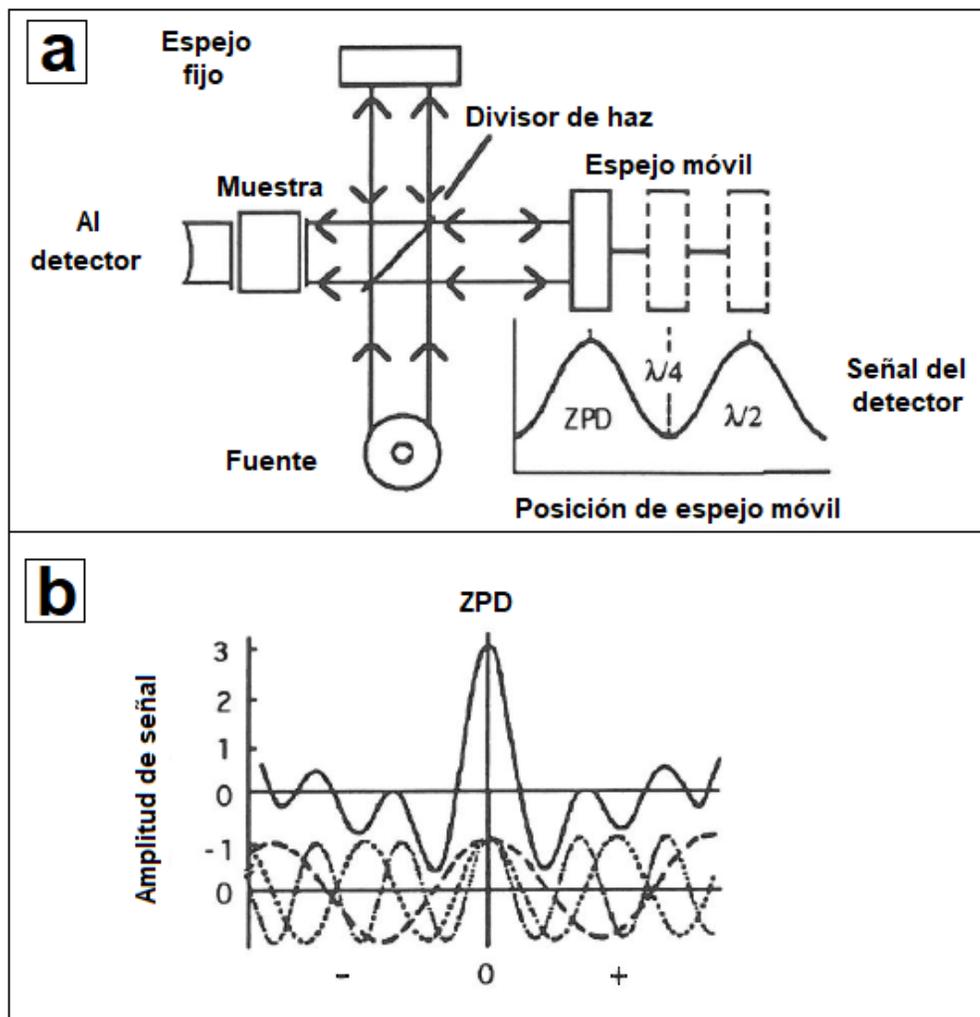


Fig. 3.9. Esquema de la espectroscopía FTIR. (a) El haz de la fuente de infrarrojos es separado en dos haces por el divisor de haz. Un haz se refleja en un espejo fijo, y el otro en uno móvil. Los dos haces reflejados se recombinan nuevamente y se envía al detector pasando por la muestra. Si la fuente emite una sola frecuencia fija, la $I(t)$ resultante es una función sinusoidal debido a la interferencia constructiva y destructiva de los haces reflejados recombinados. La intensidad máxima ocurre cuando la distancia a ambos espejos es la misma (diferencia de trayectoria cero, o ZPD). La mínima ocurre cuando las rutas difieren por $\lambda/4$, donde λ es la longitud de onda de la luz incidente. (b) Cuando la fuente contiene varias (o muchos) componentes diferentes de longitud de onda, el $I(t)$ resultante es una suma de Fourier de ondas sinusoidales, donde todas se agregan constructivamente en el punto ZPD. Si se coloca una muestra en el rayo, su absorción infrarroja eliminará longitudes de onda específicas, o componentes de onda sinusoidal específicos, del interferograma (Ihinger et al., 1994).

En un análisis FTIR pueden estar presentes también pequeños picos debido a la absorción de radiación por el agua atmosférica o CO₂. Un espectro en blanco se almacena en la computadora. El experimento se repite con una muestra en la trayectoria del haz. Esta vez, las longitudes de onda específicas son absorbidas por las vibraciones activas infrarrojas de la muestra, y el interferograma resultante es diferente. El interferograma de la muestra se relaciona con el fondo en blanco almacenado, y el resultado es un espectro FTIR, en el intervalo espectral de interés (Ihinger et al., 1994).

Con la técnica FTIR, la duración para una exploración completa del intervalo espectral se determina por el tiempo que tarda el espejo móvil en completar un ciclo de desplazamiento, que es del orden de unas pocas décimas o centésimas de segundo. Dentro de un tiempo experimental de varios minutos, cientos de ciclos son promediados, lo que permite una mejora dramática en el factor de señal a ruido. Esto significa que se pueden obtener espectros de alta calidad de áreas en pequeñas muestras con bajas concentraciones de volátiles en una fracción del tiempo que sería necesario con un instrumento de escaneo. Asimismo, los espectros se almacenan automáticamente en la computadora, lo que facilita en gran medida las subsiguientes manipulaciones espectrales. Además, la velocidad de escaneo constante asociada con el espejo móvil y la transformada de Fourier de tiempo subsiguiente requiere una referencia de frecuencia absoluta, proporcionada por un pequeño láser montado dentro del banco FTIR, lo que significa que las posiciones de los picos medidos son exactas (Ihinger et al., 1994). La fuente, el divisor de haz y el detector usado en un análisis FTIR dependen de la región espectral de interés (es decir, de las especies que se pretende caracterizar).

3.3.4 Espectroscopía RAMAN

Esta técnica ha sido usada exitosamente para el análisis cuantitativo de agua y otros volátiles en vidrios silicatados y en inclusiones de fundido. La calibración está basada en usar vidrios sintéticos con diferentes contenidos de agua. (Ihinger et al., 1994; Thomas, 2000; Chabiron et al., 2004).

La microespectroscopía Raman confocal describe un nuevo método para determinar el contenido en agua de las inclusiones de fundido. El contenido en agua de las inclusiones de fundido puede determinarse en el intervalo de concentraciones de 0 a 20 wt.% con una alta resolución espacial (~2 µm) y las inclusiones no necesitan estar expuestas, además de una amplia disponibilidad y un tiempo analítico corto (Thomas, 2000; Zajacz et al., 2005). Debido a que el método trabaja en la reflexión, una preparación mínima de la muestra es necesaria. El método tiene buena exactitud y precisión (± 0.25 wt. %) y tiene el potencial de convertirse en una herramienta espectroscópica de

alta resolución útil para estudios de inclusiones de fundido. Burke (2001) explica muy bien en qué se basa la técnica y cómo funciona. En la figura 3.10 se muestra un esquema y un microscopio Raman confocal de alto rendimiento (*Thermo Scientific™ DXR™ 2*).

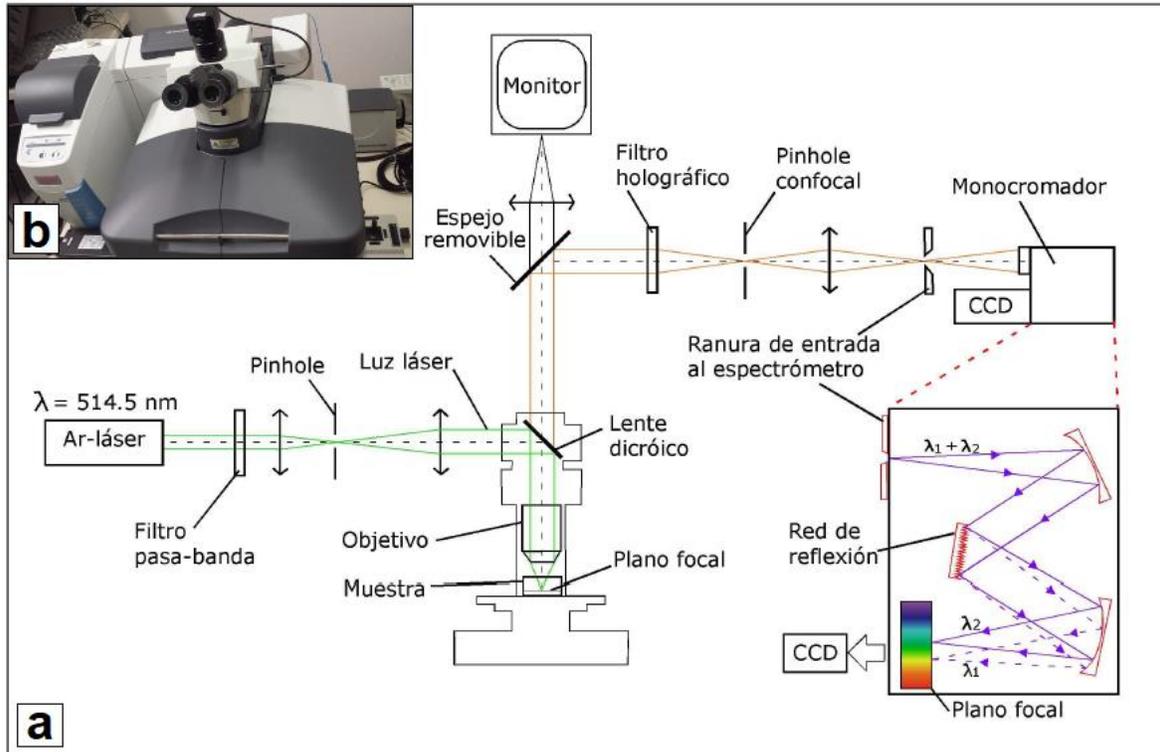


Fig. 3.10. a) Esquema del enfoque del láser en la muestra y la recolección de la dispersión Raman en un detector. b) Microscopio Raman confocal de alto rendimiento (*Thermo Scientific™ DXR™ 2*).

3.3.5. Microtermometría

Sorby (1858) considerado el padre de la petrografía moderna, propuso que las inclusiones fluidas en minerales representan porciones atrapadas de líquidos, gases y fundidos a partir de los cuales el cristal había crecido. Indicó que si se pudiera calentar la inclusión hasta que la burbuja desapareciera, se podría conocer las condiciones en las que el mineral se había formado. En efecto, una de las aplicaciones más importantes del estudio de inclusiones fluidas es su aplicación como paleogeotermómetros y paleogeobarómetros, lo cual requiere necesariamente la medida de la temperatura a la cual ocurren los cambios de fase en el interior de estas como respuesta a la variación de la temperatura. Este tipo de análisis se realiza acoplando una platina térmica a un microscopio petrográfico. De esta manera, se observa directamente los cambios de fase dentro de una inclusión al mismo tiempo que se registra la temperatura a la que ocurren. La platina térmica está diseñada para enfriar y calentar varios tipos de muestras. Para muestras geológicas el modelo THMS 600 de Linkam (*Linkam Scientific Instruments Ltd.*) (Shepherd et al., 1985) es muy utilizado (Fig. 3.11).

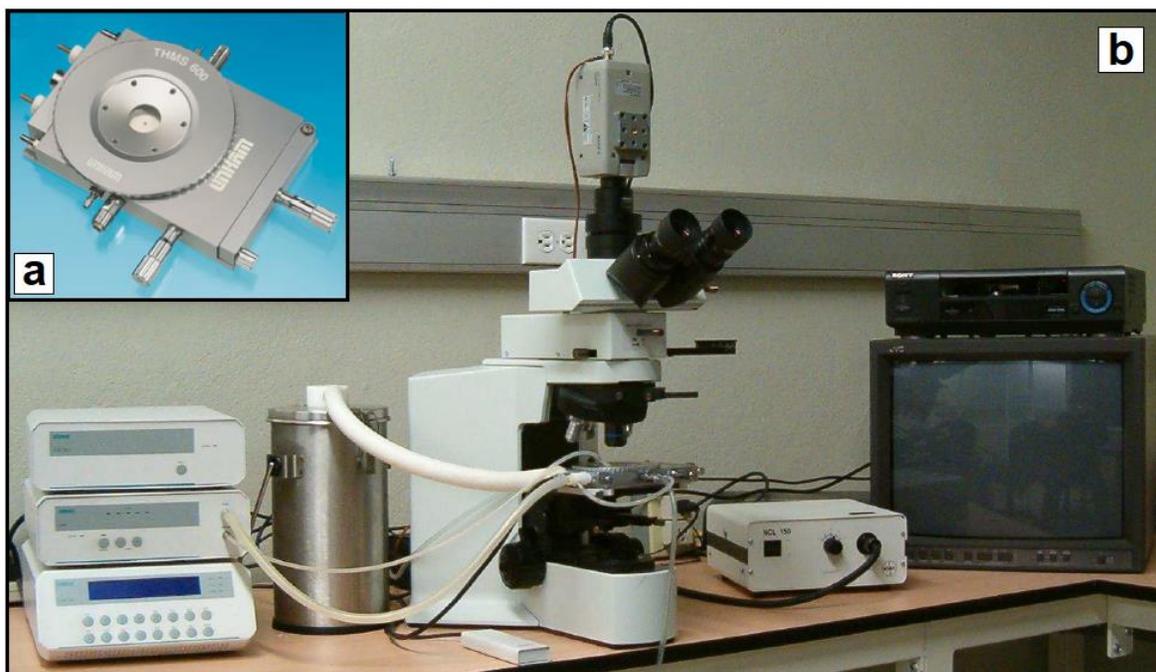


Fig. 3.11. a) Platina térmica Linkam, modelo THMS 600. b) Platina térmica adaptada a un microscopio petrográfico.

En los últimos años, la microtermometría ha sido utilizada en el estudio de IFu (Roedder, 1984, 1992; Touret y Frezzotti, 1993; Li, 1994), debido a que proporciona información directa sobre temperaturas de atrapamiento. Tal técnica representa la única forma posible para trazar la evolución de fluidos magmáticos en temperaturas magmáticas, y una herramienta necesaria para homogenizar el vidrio de la inclusión (Frezzoti, 2001).

Generalmente se supone que la temperatura de atrapamiento (T_a) está dada por la temperatura de homogenización (T_h). La T_h se alcanza cuando se calienta la inclusión y su contenido (gas, vidrio y cristales) se vuelve una sola fase. Dicha temperatura representa la mínima temperatura de cristalización del mineral huésped. Si se utiliza una correlación de presión y es sumada a la T_h se puede obtener la T_a verdadera, como en inclusiones acuosas (Roedder, 1984). La incompresibilidad relativa de fundidos silicatados en comparación con los fluidos acuosos, y la baja presión de la mayoría de los ambientes ígneos representados en los estudios de IFu es tal que estas correcciones pueden ignorarse, particularmente porque varios otros problemas (tiempo inadecuado para el equilibrio, la pérdida de H_2 y H_2O , y gradientes térmicos) resultan en errores más grandes. Roedder (1984) informa muchas de las dificultades relacionadas con los experimentos de la etapa de calentamiento, por lo que recomienda distintos métodos para aplicar la técnica en el estudio de IFu.

Capítulo 4. Evolución del magmatismo en la Caldera de La Primavera

4.1. Introducción

En este capítulo se resumirá la evolución geológica de la caldera, y se presentará la metodología y los resultados de los estudios realizados.

La denominada Sierra de La Primavera es una caldera de vulcanismo silíceo del Cuaternario (Pleistoceno superior), localizada al poniente de la ciudad de Guadalajara (Fig. 1.2). Los principales componentes de la caldera son: domos y coladas de lavas comendíticas, depósitos piroclásticos (caídas, flujos, etc.) y depósitos lacustres. Se puede decir que existen dos tipos de unidades ígneas efusivas: unas porfídicas y otras afíricas. Los domos de lavas porfídicas contienen aproximadamente 10 % de fenocristales o menos, de los cuales tenemos: sanidino sódico > cuarzo >> ferrohendenbergita > fayalita > ilmenita (Mahood, 1980). El diámetro de la caldera es de aproximadamente 11 km.

4.2. Estudios Previos y Geología de la Sierra de La Primavera

La caldera de La Primavera ha sido estudiada desde el siglo pasado por diversos autores, entre ellos Mahood (1977, 1980, 1981, 1982, 1983, 1985 y 1988), quien más la ha estudiado, por lo que la mayoría de la evolución geológica ha sido descrita en sus trabajos. También CFE ha hecho estudios y perforaciones por las evidentes manifestaciones hidrotermales presentes en el sitio. En cuanto a estudios de inclusiones de fundido (IFu), el antecedente que se tiene es de Miguel-Cruz (2016) quien hizo análisis de IFu en la Toba Tala. Hoy en día con el proyecto P15 de CeMIEGeo, se sigue estudiando la caldera para tener un mejor entendimiento de esta, y aprovechar de una mejor manera el recurso energético para el beneficio de la ciudad de Guadalajara.

4.2.1. Tectónica regional

El área donde se encuentra ubicada la caldera de La Primavera es muy interesante debido a dos cosas. Primero, en esta zona la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) intercepta con la Sierra Madre Occidental (SMO), dos de las principales provincias volcánicas de México relacionadas a procesos de subducción. Segundo, esta parte occidental de la FVTM incluye tres estructuras extensionales regionales (Alatorre-Zamora et al., 1992) (Fig. 2.4): el graben de Colima, con una tendencia N-S; el graben de Chapala, que aproximadamente está en una dirección E-W; y el más largo de todos con una dirección preferencial NW-SE el graben Tepic-Zacoalco. La intersección de

estas tres estructuras es conocida como una junta triple. La caldera de La Primavera está localizada aproximadamente 50 km hacia el norte del punto triple (Alatorre-Zamora et al., 1992).

4.2.2. Basamento

Para conocer sobre el basamento en el que se encuentra La Primavera se realizaron perforaciones dentro y fuera de la caldera hace ya más de 35 años por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). También se han realizado estudios gravimétricos y sísmicos con los cuales también se puede saber más sobre este basamento.

Los resultados de las perforaciones dentro de la caldera y levantamientos gravimétricos muestran que la profundidad a donde llegan los materiales que rellenaron la caldera van de 0.3 a 1 km. El basamento andesítico, se encuentra cerca de 1 km de profundidad, y el basamento granítico tiene una profundidad de 3 km (Yokoyama y Mena, 1991). De manera general se puede decir que por debajo de La Primavera hay: una capa de tobas líticas e ignimbritas (>2 Ma), un basamento de rocas andesíticas (Mioceno superior-Plioceno), y por debajo se encuentra un basamento de composición granítica (Mioceno superior) (Yokoyama y Mena, 1991).

Por otra parte Ferrari et al., (2003) señala que en pozos profundos perforados en el área de Ceboruco y en la caldera de La Primavera, las lavas del Mioceno superior sobreyacen directamente a lavas andesíticas del Eoceno (Gómez-Tuena et al., 2007).

4.2.3. Evolución Geológica de la Sierra de La Primavera

Los fechamientos de las lavas pre-caldera van desde 145 a 120 ka. Seguidas por una erupción explosiva (Toba Tala), que formó la caldera, por el colapso del techo de la cámara magmática, hace aproximadamente 95 Ka. Nuevos domos surgen antes de que el lago desaparezca, los cuales se encuentran en el margen sur del lago y se empezaron a formar hace unos 75 ka después de esto existe un levantamiento en la parte sur de la caldera, lo cual le pone fin al lago. La caldera se rellena de agua y sedimentos, y empiezan los eventos post-caldera con dos domos que emergen del centro de la caldera, a estos se les relaciona con el importante horizonte de pómez gigante (Mahood, 1980, 1981a y 1981b). Después surgen dos arcos paralelos de domos con dirección NW-SE uno cruza la mitad de la caldera y el otro se ubica al límite noreste de la caldera, desde la erupción de la Toba Tala hasta estos eventos ocurrieron entre unos 5 y 10 ka (Mahood, 1980). Se piensa que el levantamiento se debió al resurgimiento de una cámara magmática que dio lugar al último arco de lavas (Mahood, 1980 y 1981a) (Fig. 4.1). Este último arco se ubica más al sur del límite que tenía el

lago, se forma aproximadamente hace unos 60 ka, y termina con el domo El Colli hace unos 30 ka (Fig. 4.2). Hoy en día la caldera muestra actividad hidrotermal de diferentes manifestaciones.

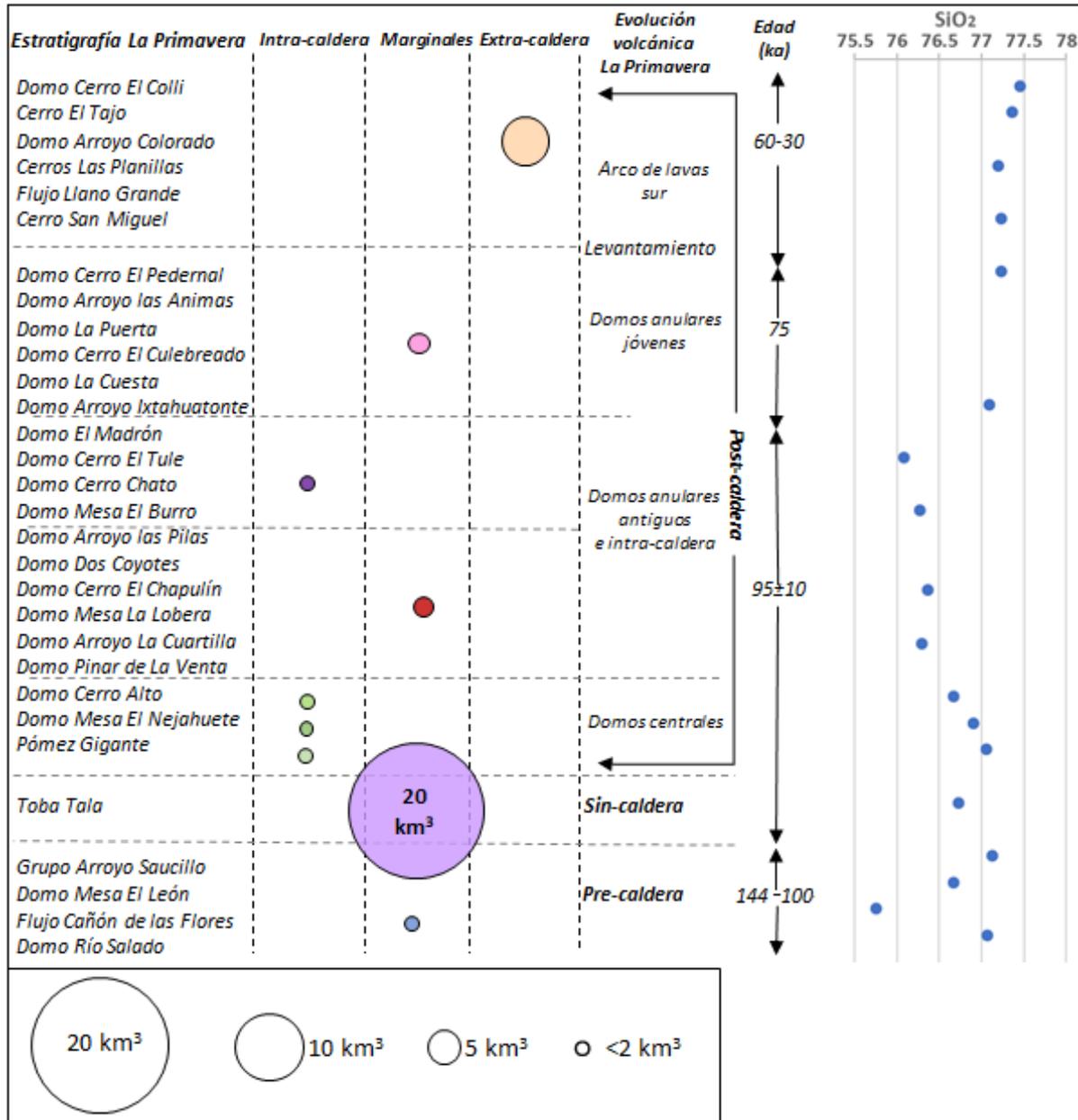


Fig. 4.1. Estratigrafía de La Primavera y la relación con su edad, volumen de magma y contenido en sílice, datos tomados de Mahood (1981).

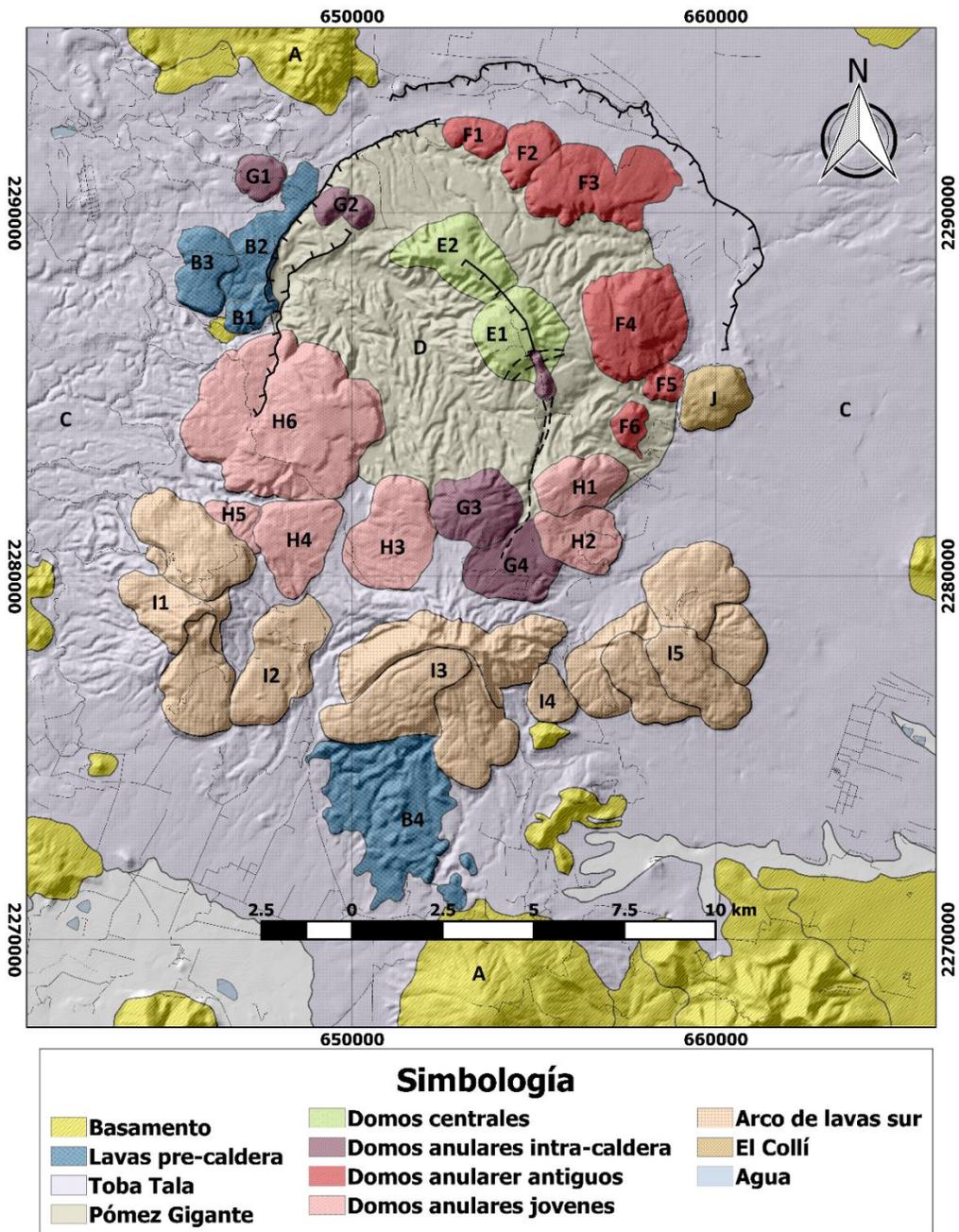


Fig. 4.2. Mapa geológico de la caldera de La Primavera con el nombre de los domos y centros que lo componen. A=Basamento; B₁= Domo Río Salado; B₂= Flujo Cañón de las Flores; B₃= Domo Mesa El León; B₄= Grupo Arroyo Saucillo; C=Toba Tala; D=Pómez Gigante y sedimentos lacustres; E₁=Domo Mesa El Nejahuete; E₂=Domo Cerro Alto; F₁=Domo Pinar de La Venta; F₂=Domo Arroyo La Cuartilla; F₃=Domo Mesa La Lobera; F₄=Domo Cerro El Chapulín; F₅=Domo Dos Coyotes; F₆=Domo Arroyo las Pilas; G₁=Domo Mesa El Burro; G₂=Domo Cerro Chato; G₃=Domo Cerro El Tule; G₄=Domo El Madrón; H₁=Domo Arroyo Ixtahuatonte; H₂=Domo La Cuesta; H₃=Domo Cerro El Culebreado; H₄=Domo La Puerta; H₅=Domo Arroyo las Animas; H₆=Domo Cerro El Pedernal; I₁=Cerro San Miguel; I₂=Flujo Llano Grande; I₃=Cerros Las Planillas; I₄=Domo Arroyo Colorado; I₅=Cerro El Tajo; J=Domo Cerro El Collí. Modificada de Mahood (1980).

Lavas pre-caldera

Las lavas más antiguas de la caldera de La Primavera datan de aproximadamente 145 a 100 ka, estas formaron domos y flujos que están distribuidos en dos zonas apartadas en la caldera, unos al noreste y otros hacia el sur (Fig. 4.3a) (Mahood, 1981a).

El Domo de Rio Salado fue el primero en hacer erupción en la zona norte de la caldera, se compone principalmente de riolitas porfídicas, y seguido de este surge un flujo afírico denominado Cañón de las Flores. Ambas unidades son claramente sobrepuestas por la Toba Tala y por el Domo Mesa El León (Mahood, 1980). Por último, en la parte norte surge el Domo porfídico de Mesa El León hacia la parte más al oeste de estas unidades pre-caldera.

En la parte sur de la caldera las lavas pre-caldera han sido menos estudiadas debido a que están menos expuestas, porque la Toba Tala y demás depósitos aluviales las cubren, aunque sí se han llegado a confirmar como lavas provenientes de La Primavera, siendo tanto porfídicas como afíricas.

Erupción de La Toba Tala

La Toba Tala (TT) es una de las unidades más distintivas en toda la caldera, ya que representa el evento sin-caldera. Se estima que expulsó la cantidad de 20 km³ de material volcánico que vació la cámara magmática haciéndola colapsar y cubriendo un aproximado de 700 km² en la superficie. Esta unidad lleva su nombre por el poblado de Tala que se encuentra al poniente de la caldera y donde está muy bien expuesta.

Se han determinado que la TT hizo erupción 95 ka atrás, la cual consiste en pequeños flujos agrupados en tres unidades emplazadas fáciles de reconocer (Mahood, 1980). La primera unidad conforma ~90 % de la totalidad de la toba, los espesores son muy variados dependiendo de la región y se puede encontrar tanto dentro como fuera de la caldera. También se ha podido reconocer que en esta primera unidad se presentan la mayoría de las manifestaciones hidrotermales dentro de la caldera, en sus límites, e incluso fuera de la caldera, al este de Tala (Mahood, 1981a).

Las últimas dos unidades emplazadas no superan más de los 10 m de espesor, sus características petrográficas son parecidas, pero éstas se distinguen de la primera unidad emplazada porque solo se encuentran en facies intra-caldera y no fuera de ella, por lo que el colapso se debió a la erupción de la primera unidad de la toba. La Toba Tala en general muestra un zoneamiento químico, pues en la base es medianamente peralcalina y la cima tiene un carácter más metalimunoso.

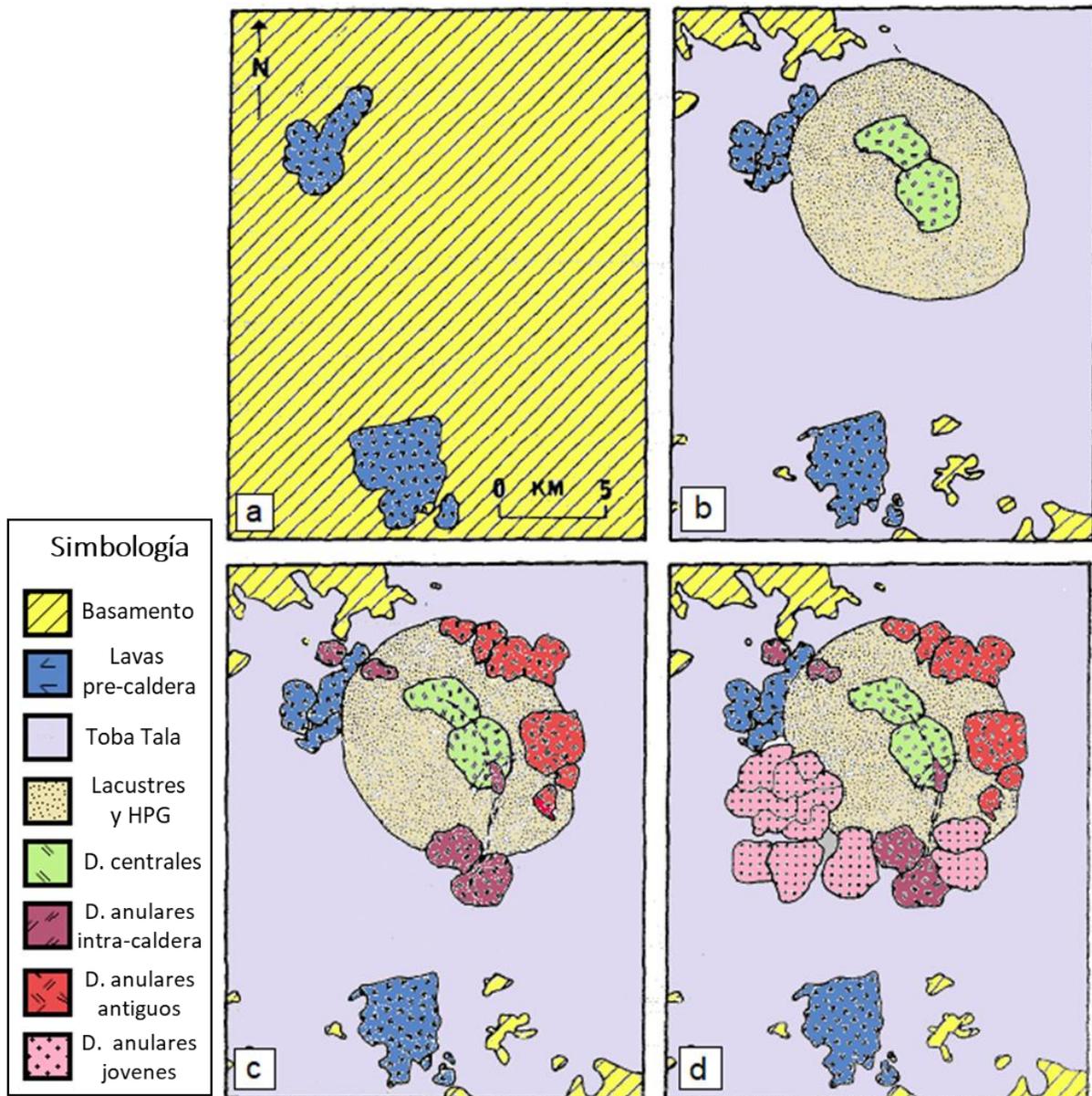


Fig. 4.3. Paleografía de la Caldera de La Primavera. (a) hace 100 ka, después de la erupción de las lavas pre-caldera. (b) hace 95 ka, después de la erupción de la Toba Tala, el colapso de la caldera y la erupción de los domos centrales a través del centro del lago. (c) hace 90 ka, después de la erupción de los antiguos domos anulares. Estos domos anulares hicieron erupción a lo largo de dos arcos paralelos: uno a lo largo de la fractura de anillo en el margen noreste del lago, y el otro a través del medio del lago. La falla intra-caldera y la intrusión del magma parecen haber sido contemporáneas. (d) hace 65 ka, después de la erupción de los domos anulares más jóvenes, a lo largo de la fractura de anillo en el margen sur del lago. Rocas volcánicas pre-Primavera: en amarillo; Lavas pre-caldera: en azul; Toba Tala: en morado claro (sin marcas); Sedimentos del lago: en café con punteado; Domos centrales y domos anulares más antiguas: en verde, violeta y rojo; Domos anulares más jóvenes: en rosa; Fallas: líneas discontinuas. (Mahood, 1980).

Colapso de la caldera

La formación de la caldera se produjo por la erupción explosiva de la Toba Tala, pues se piensa que el colapso del techo de la cámara magmática empieza mientras se emplaza la primera unidad de la toba (Mahood, 1980). Ya formada la caldera, se rellenó de agua y empezó a depositarse sedimentos en el fondo de la caldera.

Las fallas relacionadas al colapso de la caldera son en su mayoría de tipo normal anular y son casi verticales, el perímetro de la caldera esta generalmente sepultado por aluvión o depósitos de caída, la única parte donde se ve expuesta es al oeste de la caldera paralela a la falla Rio Caliente.

Domos centrales y depósito del horizonte de pómez gigante

Poco después de haberse formado la caldera (95 ± 10 ka) emergieron del fondo del lago dos domos centrales, uno al sur que se relaciona con el origen del horizonte de pómez gigante (en adelante referido en esta tesis como HPG), y el otro está en la parte norte (Fig. 4.3b) (Mahood, 1981a).

El Domo Nejahuete es el primero en hacer erupción bajo una columna de agua y está directamente relacionado al HPG, porque tanto las riolitas y las pómez de estas unidades cuentan con el mismo contenido (1 %) de fenocristales y se encuentran en el mismo nivel estratigráfico dentro de la caldera. Además, cerca de Nejahuete la superficie de la Toba Tala contiene “bombas redondeadas” de toba parcialmente soldada con fracturas de corteza de pan, pareciendo que fueron desprendidos de las paredes de los conductos y después arrastrados con el flujo a la superficie. Esto y la similitud química entre la última unidad de Tala y el domo central sur (Nejahuete), sugiere que el domo central sur (y posiblemente el HPG) pudo haber surgido de la misma fractura que la de Toba Tala (Mahood, 1980).

El HPG es un horizonte muy marcado dentro de la estratigrafía de la caldera, ya que prácticamente se encuentra en toda el área del lago. Este fue depositado sobre una pequeña capa de pómez de menor tamaño. Más abajo hay una capa aproximadamente de 30 m de espesor de sedimentos lacustres y demás materiales. Tiene un espesor variado que depende de la localización dentro de la caldera, pero se puede decir que va de 1.5 a 15 m. Los bloques de estas pómez porfídicas tienen un promedio de 1.3 m de tamaño, pero su rango va desde 0.2 m a poco menos de 6 m, y sus formas son de superficies ovoides que están pobremente redondeadas (Clough et al., 1981), también se pueden observar bloques con textura de pan (Fig. 4.4). La matriz está compuesta por ceniza muy fina de color blanco que está laminada y toma la forma del contorno de los bloques, haciendo parecer que al depositarse los bloques estaban bajo una columna de agua. Se han encontrado fósiles de diatomeas que sugieren que el lago tenía poca profundidad (Clough et al., 1981).



Fig. 4.4. Esquema de campo que muestra los sedimentos lacustres perturbados y contorsionados a lo largo de los bloques de piedra pómez gigante. Algunos bloques muestran textura de corteza de pan en su superficie debido al enfriamiento (Tomada de Clough et al., 1981).

Allen y Mc Phie (2009) proponen el término “erupciones neptunianas” para erupciones explosivas controladas por volátiles magmáticos que se producen desde ventilas bajo una columna de agua (a profundidades de ~ 1300-200 m). Facies piroclásticas neptunianas de base a cima están compuestas por: una brecha lítica, capas de lapilli pumítico no consolidado (corrientes de densidad) y un horizonte de ceniza laminada o bloques de pómez gigante con ceniza. Al hacer erupción, los materiales de la columna eruptiva rápidamente se mezclan con el agua circundante, enfriándose, incrementando en densidad y colapsando, mientras permanece bajo el agua. Líticos que son muy pesados para ser arrastrados por la columna son depositados cerca de la fuente, formando una “brecha lítica neptuniana”. Fragmentos de pómez de tamaño de lapilli es rápidamente saturado con agua para formar una “corriente de densidad neptuniana”. Y los bloques calientes de pómez gigante ascienden y pueden alcanzar la superficie (interfaz agua-aire) antes de que sus vesículas se saturen de agua y sean depositadas, junto con partículas de ceniza temporalmente suspendidas, formando “depósitos de suspensión neptuniana”.

Hay que resaltar que las erupciones neptunianas no son las únicas de tipo subacuáticas que forman depósitos de suspensión (pómez gigante), pues erupciones de domos subacuáticos también pueden formar bloques de pómez gigante. Dichas pómez se desprenden de la superficie del domo en erupción, su ambiente y su proceso de sedimentación es el mismo que en un depósito de suspensión neptuniana, por lo que pueden ser confundidos. Por otro lado las facies neptunianas

no forman un domo y su componente dominante son los depósitos de corrientes de densidad neptunianas (aproximadamente 80% del volumen) (Allen y McPhie, 2009).

En el caso de La Primavera se cree que los bloques de pómez gigante al ser expulsados flotaron en la superficie de todo el lago y eventualmente con el tiempo sus vesículas se empezaban a llenar de agua hasta llegar a ser más densos, y así los bloques se pudieron depositar lentamente en el fondo del lago (Clough et al., 1981). Mahood (1980) y Clough et. al. (1982) proponen un modelo similar (con sus respectivas diferencias) para la formación del HPG (Fig. 4.5).

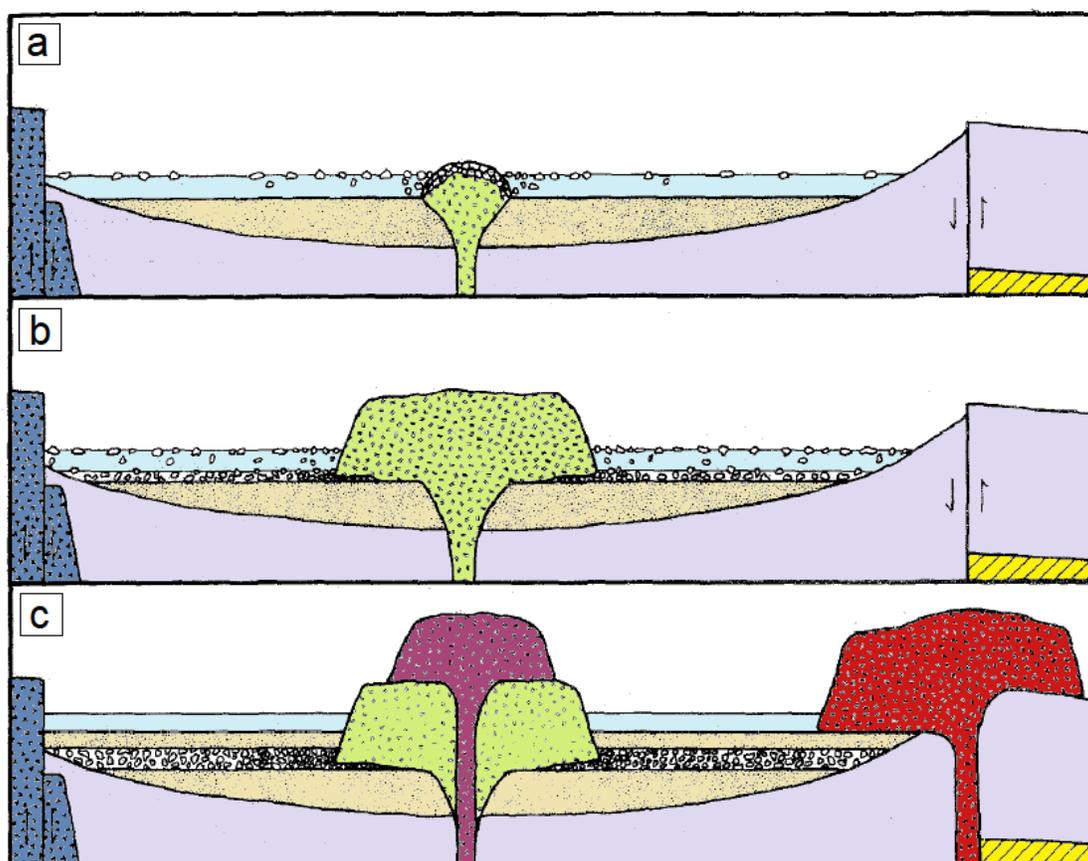


Fig. 4.5. Modelo de Mahood (1980) para la formación del HPG. a) La lava hace erupción a través del centro del lago. La parte superior pumítica de la columna eruptiva es fragmentada y separada, por lo que bloques de pómez gigante flotan en la superficie del lago. b) El depósito del HPG continúa formándose mientras la cúpula central ya está emplazada. c) La sedimentación continúa después de la deposición del HPG y el emplazamiento de los domos centrales. Aproximadamente 10 m de sedimento se depositan antes de la erupción de los antiguos domos anulares.

Los fenocristales presentes en la pómez gigante y domos centrales son sanidino sódico > cuarzo, aunque también puede tener otros minerales como anfíboles u óxidos.

Cerro Alto representa el domo central norte de la caldera, se distingue perfectamente de Nejahuete y el horizonte de pómez gigante porque tiene 10 % de fenocristales y además su posición estratigráfica confirma que es más joven que las otras dos unidades.

Erupción de domos anulares antiguos

La sedimentación en el lago siguió después de la actividad de los domos centrales y el horizonte de pómez gigante. Por encima de la pómez gigante se depositaron capas de cenizas volcánicas y diatomeas. Poco después aparecen lacustres pumíticos relacionados a caídas piroclásticas de pómez por el surgimiento de nuevos domos (Mahood, 1980).

Surgieron dos lineamientos de domos porfídicos (95 ± 10 ka) los cuales tienen 10 % de fenocristales, uno en el centro pues corta la mitad del lago y otro en el límite noreste del lago (Fig. 4.3c), el primero está compuesto por los domos: Mesa el Burro, Cerro Chato, Cerro el Tule, El Madrón e incluso una pequeña cúpula que surgió al sur del domo Nejahuete. El arco en el límite noreste se compone de los domos: La Venta, Arroyo la cuartilla, Mesa la Lobera, Cerro el Chapulín, Dos Coyotes y Arroyo las Pilas.

Desde la erupción de la Toba Tala a la formación de los domos anulares antiguos pasaron de 5 a 10 ka, por lo que todos los eventos eruptivos fueron casi consecutivos.

Erupción de domos anulares más jóvenes

Después de la erupción de los antiguos domos anulares, se formó nuevamente un lago, y el depósito de sedimentos lacustres alcanzó un espesor de casi 30 m de sedimentos finos, con esto Mahood (1981), Demant y Vincent (1978) afirman que hubo un periodo de quietud volcánica.

Posteriormente (~ 75 ka) surge un nuevo grupo de domos que se ubica en el margen sur del lago en forma de arco con dirección preferencial E-O (Fig. 4.3d). Este arco tiene rocas porfídicas y afíricas, y los domos que componen este grupo son: El Pedernal, Arroyo las Animas, La Puerta, El Culebreado, La Cuesta y Arroyo Ixtahuatonte.

Fechamientos K-Ar a este grupo de domos (a excepción de Arroyo las Animas) muestran edades de 83.6-68.9 ka, lo que sugiere que este grupo de domos fue extruido en un gran periodo de tiempo, y representan cerca de 3 km^3 de material volcánico (Mahood, 1980).

Levantamiento

Después de la erupción de los domos anulares jóvenes, existe un levantamiento hacia la parte sur de la caldera. Este levantamiento comienza hace ~60 ka, y es resultado del surgimiento de una cámara magmática que dio origen al arco de lavas sur, lo que provocó el fin de la sedimentación lacustre dentro de la caldera.

Se han medido las altitudes dentro de las partes más elevadas de la caldera, así como la elevación de la llanura de Guadalajara en partes cercanas a esta y se ha estimado una diferencia de 260 m (Mahood, 1980).

Erupción del Arco de Lavas Sur

Hace ~60 Ka surge un nuevo arco fuera de lo que era el lago, se estima que hicieron erupción 7 km³ de lavas que dieron lugar a domos y flujos afíricos (Mahood, 1980). Por observaciones de campo se puede llegar a deducir que estos domos hicieron erupción de oeste a este, por lo que los domos más jóvenes son los que tenemos en la parte oriental. Los domos y flujos que comprenden este arco son: Cerro San Miguel, Llano Grande, Las Planillas, Arroyo Colorado y Cerro El Tajo.

Los últimos eventos en la caldera fueron El Tajo y El Collique se estima tienen una edad de 30 ka - 20 ka, este último se ubica al este de la caldera.

Hidrotermalismo actual en La Primavera

Se piensa que una de las razones por las que La Primavera sigue siendo geológicamente activa es por las fallas profundas que conectan convectivamente el agua que viene de la superficie con una fuente de energía térmica asociada a una cámara magmática o cuerpos intrusivos. El agua a profundidad se calienta, vaporiza y asciende a la superficie a través de las zonas de fracturas y fallas formando las aguas termales que son características del lugar.

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha realizado dos pozos profundos en el centro de la Sierra (PR-1 y PR-2) y otro pozo profundo en la Margen occidental. Se encontraron temperaturas de hasta 285 °C a 1160 m en PR-1. En las cercanías, el PR-2 encontró temperaturas de hasta 307 °C a 2000 m. El pozo en el margen occidental de la Sierra alcanzó un máximo de 100 °C cerca de la superficie y disminuyó a 80 °C a 2000 m (Mahood et al., 1983).

Varias fumarolas al interior de la caldera se pueden observar en las paredes de las fallas que forman las cañadas en Mesa Nejahuete que en promedio emanan vapor a 67 °C. En menor cantidad se localizan también en Cerro Alto y algunas localidades al sur en las Planillas.

Existe una separación física de aguas termales y fumarolas. Las aguas termales se encuentran a bajas elevaciones y en los márgenes del complejo, mientras las fumarolas ocurren a altas elevaciones (Mahood, 1980).

Alatorre-Zamora y Campos-Enríquez (1992) concluyen que en La Primavera hay dos sistemas de fallas NW-SE y NE-SW. Las fallas NW-SE representan a un sistema regional y profundo afectando unidades basales, mientras que el sistema NE-SW, es local afectando solamente las unidades menos profundas. En la actualidad la zona de producción se encuentra en la parte central de la caldera (Cerritos Colorados). En este lugar, la intersección de estos dos sistemas ha dado lugar a zonas localizadas de permeabilidad vertical, que permiten el flujo ascendente de fluidos geotérmicos. A profundidad, el sistema NW-SE controla la migración lateral de los fluidos, y conecta zonas de permeabilidad, es decir, la zona central de producción y las manifestaciones hidrotermales localizadas al noroeste de la caldera.

Depósitos piroclásticos y lacustres de la caldera

Las erupciones explosivas de la Caldera de La Primavera han producido voluminosos depósitos de caída de pómez e ignimbritas. Depósitos piroclásticos ricos en pómez son muy prominentes dentro y alrededor de la caldera. La producción promedio de material volcánico es de 0.06 km por siglo, casi un orden de magnitud menor que los dos volcanes riolíticos activos de Taupo y Okataina en Nueva Zelanda, los cuales se encuentran entre los volcanes riolíticos más productivos (Walker et al., 1981).

Se pueden encontrar hasta 17 depósitos de caída de pómez riolítica de casi 30 m de espesor en secciones únicas y registrar una larga sucesión de actividad explosiva. Su estudio estratigráfico no es fácil, ya que se componen en su mayoría de pómez afírica o casi afírica, de aspecto bastante uniforme, y generalmente carecen de características distintivas. También depósitos de oleadas piroclásticas (surge) son encontrados en varios niveles estratigráficos y pueden estar intercalados con depósitos de caídas y delgadas capas de ignimbritas. En total, 140 km³ de material riolítico hicieron erupción durante los últimos 100 ka, de los cuales 50 km³ se dispersaron fuera de la caldera.

Sedimentos lacustres y partículas de cenizas (incluyendo un notable horizonte de pómez gigante) se depositaron en un área circular de aproximadamente 11 km de diámetro en el centro de La Primavera que antiguamente comprendía el lago, los depósitos de pómez gigante se asocian a los domos porfídicos centrales y anulares (Mahood, 1980; Walker et al., 1981).

Ahora, para tener una visión más general de los eventos volcánicos sucedidos en La Primavera (desde las primeras lavas pre-caldera hasta los últimos domos post-caldera) se muestra un esquema (Fig. 4.6) en donde se resumen dichos eventos. El esquema es solamente ilustrativo por lo que la escala no es real.

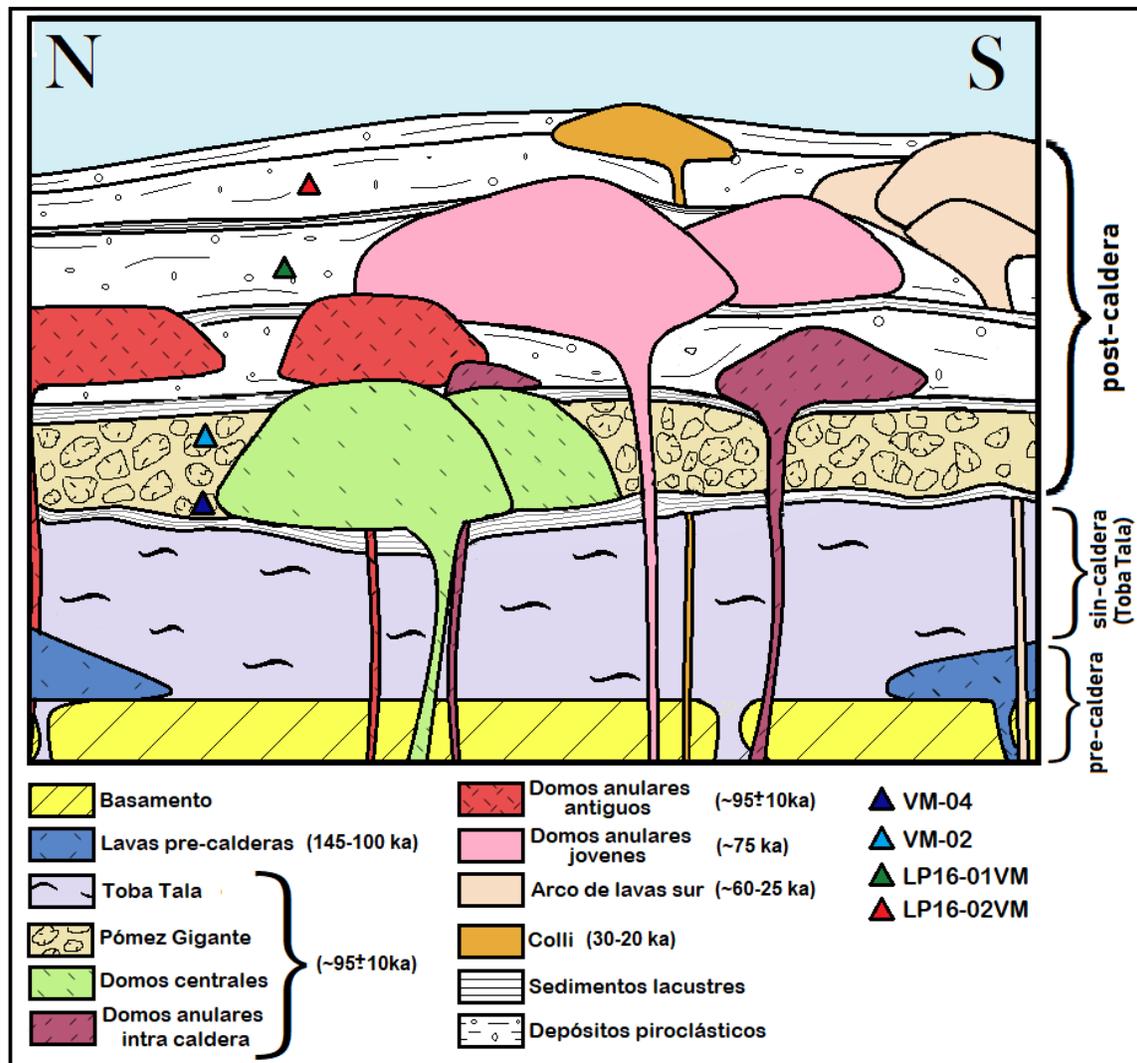


Fig. 4.6. Esquema de las secuencias eruptivas en la caldera de La Primavera. Las edades mostradas desde las lavas pre-caldera hasta el Colli son tomadas de Mahood (1980). También muestra la ubicación de los afloramientos descritos en campo y donde se colectaron muestras.

4.3. Características de inclusiones de fundido en unidades post-caldera de La Primavera

4.3.1 Trabajo de campo y unidades post-caldera muestreadas

El trabajo de campo se realizó con el objetivo de tener una visión general de la zona de estudio, como las relaciones estratigráficas de las distintas unidades, sus características estructurales y manifestaciones hidrotermales, así como también coleccionar muestras representativas de las diferentes unidades post-caldera de La Primavera, teniendo control estratigráfico y espacial de las muestras (Tabla 4.1). Se realizó previamente una revisión breve de algunos trabajos ya hechos sobre la zona de estudio (secciones anteriores del presente Capítulo), y en campo se identificaron horizontes de depósitos piroclásticos que tuvieran fragmentos de pómez fíricos (pómez con fenocristales) para buscar inclusiones de fundido alojadas en fenocristales, y así poder estudiarlas.

Se asignaron dos tipos de nomenclaturas para los afloramientos en donde se tomó muestra (Fig. 4.7), una el horizonte de pómez gigante (HPG) y otra para las secciones de secuencias piroclásticas y lacustres post-caldera (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Clave de las muestras colectadas y unidades a las que pertenecen.

Nomenclatura de la muestra	Unidad	CORDENADA X	CORDENADA Y	COORDENADA Z
VM-04	Base del horizonte de Pómez gigante	655829	2284455	1,856
VM-02	Pómez gigante	653420	2284557	1,818
LP16-01VM-A	Flujo piroclástico de pómez	654341	2283699	1,883
LP16-01VM-B	Caída piroclástica de pómez	654341	2283699	1,883
LP16-01VM- D	Flujo piroclástico de pómez	654341	2283699	1,883
LP16-01VM- D2	Flujo piroclástico de pómez	654341	2283699	1,883
LP16-02VM	Caída piroclástica de pómez (arco de lavas sur)	654461	2283741	1,896

Primero se hizo un caminamiento dentro de la caldera para identificar unidades sin-caldera y post-caldera (Toba Tala, el horizonte de pómez gigante, domos, etc.), y en el recorrido se pudieron ver

manifestaciones hidrotermales (fumarolas) dentro de las paredes de las cañadas. Las anomalías térmicas se pudieron medir con un termómetro convencional (53-80 °C). También se pudo observar un tipo de alteración rojiza en la roca de las que surgen estas manifestaciones (Fig. 4.8a), e incluso en algunas fumarolas hay presencia de cristales de azufre (Fig. 4.8c).

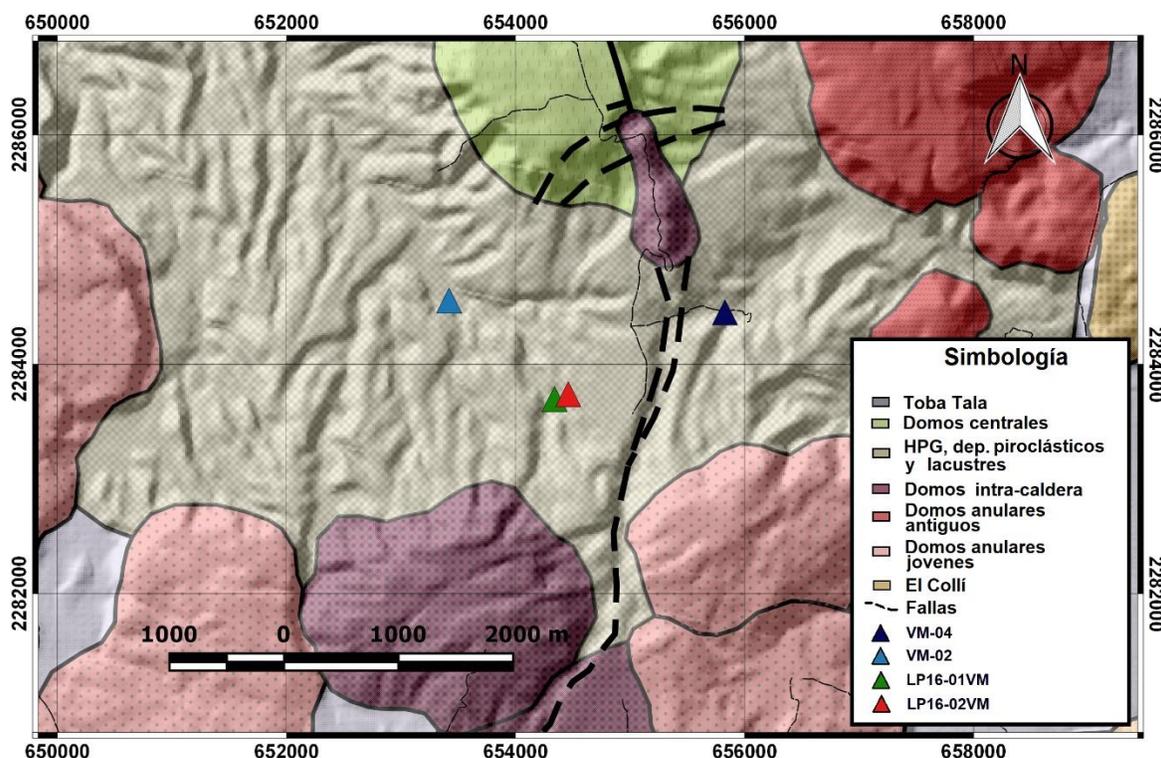


Fig. 4.7. Mapa geológico de la caldera de La Primavera. Se muestra la localización de los afloramientos donde se tomaron las muestras (Triángulos de colores). En las localidades VM-04 y VM-02 se observó el HPG. Por otra parte LP16-01VM y LP16-02VM están estratigráficamente por encima del HPG, siendo LP16-02VM la cima de la columna estratigráfica descrita en este estudio.

El HPG se muestreó en dos localidades distintas dentro de la caldera (Fig. 4.7.) con el fin de comparar los resultados de ambas localidades, se pudieron encontrar fenocristales de sanidino y cuarzo, así como de un mineral oscuro, probablemente ferrohendenbergita.

En algunas cañadas y en el afloramiento VM-04 se pudo observar claramente el contacto inferior del HPG, y así comprobar la secuencia que hay por debajo de esta, la cual está compuesta por la intercalación de paquetes lacustres, flujos y *surges*, y se encuentra por encima de Toba Tala (En el afloramiento VM-04 no se observa el límite superior o la cima de Tala).

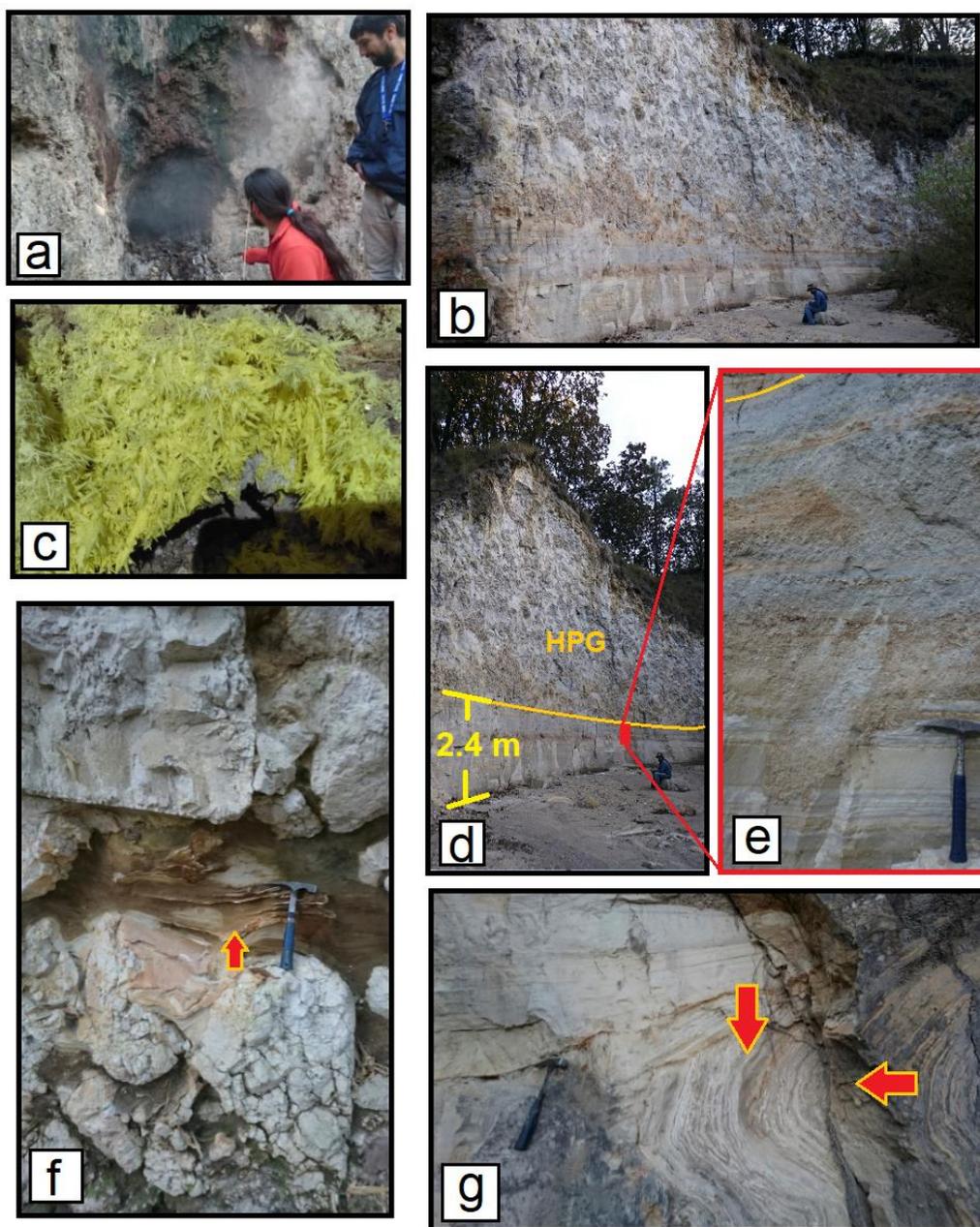


Fig. 4.8. a) Fumarola emergente de la Toba Tala. b) Afloramiento VM-04 donde se observa el límite inferior del HPG, c) Cristales de azufre en fumarolas. d y e) Vista panorámica del corte (VM-04) con el espesor de paquetes que hay por debajo del HPG. f) Depósitos lacustres y cenizas deformadas y siguiendo el contorno de los clastos de pómez gigantes. g) Depósitos lacustres deformados por debajo del HPG. HPG: Horizonte de Pómez Gigante.

Las muestras en el punto VM-04 fueron tomadas de la base del HPG (Fig. 4.8b y 4.12), al sureste del Domo El Nejahuete (Fig. 4.7). En este afloramiento se tienen expuestos aproximadamente 2.4 m de una secuencia intercalada de piroclastos y lacustres por debajo de un potente estrato de la

Pómez Gigante (Fig. 4.8d). En la base ocurren sedimentos lacustres horizontales muy finos y de aproximadamente más de 1 m de espesor, aquí se pueden ver cambios de coloración entre los horizontes de lacustres, ya que van de blancos (posiblemente con menor materia orgánica) y otro café claro (mayor cantidad de materia orgánica), y enseguida se tiene una intercalación de flujos piroclásticos u oleadas y lacustres de menor espesor, esta sección del paquete también tiene esa alternancia en colores (Fig. 4.8e).

Muy cerca de donde se muestreó la base de HPG (VM-04) se observaron depósitos lacustres totalmente deformados y fracturados (Fig. 4.8g) por debajo del HPG. La deformación ocurrió, probablemente, por sismos locales en el lugar asociados al levantamiento de la caldera en sus últimas etapas de evolución.

Al suroeste del Domo El Nejahuete, se pudo describir en una cañada otra columna estratigráfica de casi 15 m de altura, en donde también se observó el contacto inferior del HPG (Fig. 4.9). En la cañada se aprecia claramente la última etapa de la erupción de la toba Tala (oleada Toba Tala), ya que hay casi dos metros expuestos en este lugar (Fig. 4.9c). Cubriendo al evento sin-caldera se tiene un paquete de depósitos lacustres con un espesor de 60 cm aproximadamente, un paquete de flujos piroclásticos de más de un metro de espesor, así como una intercalación entre oleadas piroclásticas y depósitos lacustres con un espesor de más 2 m. En los depósitos lacustres también se puede apreciar la alternancia de color como en los descritos del afloramiento VM-04. En la parte superior de la cañada ocurre un gran espesor del HPG expuesto, donde los bloques de pómez son más pequeños (~10-60 cm en su eje más largo) en la base y más gruesos (~1-3 m en su eje más largo) en la parte superior del depósito. Las pómez son de un color gris claro, sub-angulosas y con un alto grado de vesicularidad (~35%). En campo se observaron cristales de cuarzo y feldespato. Comparando con el punto VM-04, hay muchas similitudes en lo que hay por debajo del contacto inferior del HPG, pero en este último afloramiento descrito teníamos mayor espesor del paquete expuesto, y pudimos observar la última etapa de la Toba Tala y lo que hay entre esta y el HPG.

La muestra VM-02 de Pómez Gigante se tomó más hacia el centro de la caldera volcánica (Fig. 4.7), al costado de la carretera a unos cuantos metros del afloramiento más representativo del HPG (Fig. 4.10). En este lugar las pómez son de color gris clara, donde los clastos más grandes pueden llegar a medir 1.3 m en su eje más largo, son sub-angulosos y se puede ver como la ceniza es laminada y esta deformada de tal modo que sigue el contorno de los clastos de pómez, al igual que los vistos en el afloramiento VM-04 (Fig. 4.8f). Se pudo definir el contacto superior de este gran estrato con sedimentos lacustres que se depositaron después de la erupción del HPG. En la Fig. 4.9 se muestra como los paquetes de sedimentos lacustres miden hasta 1.5 m de espesor.

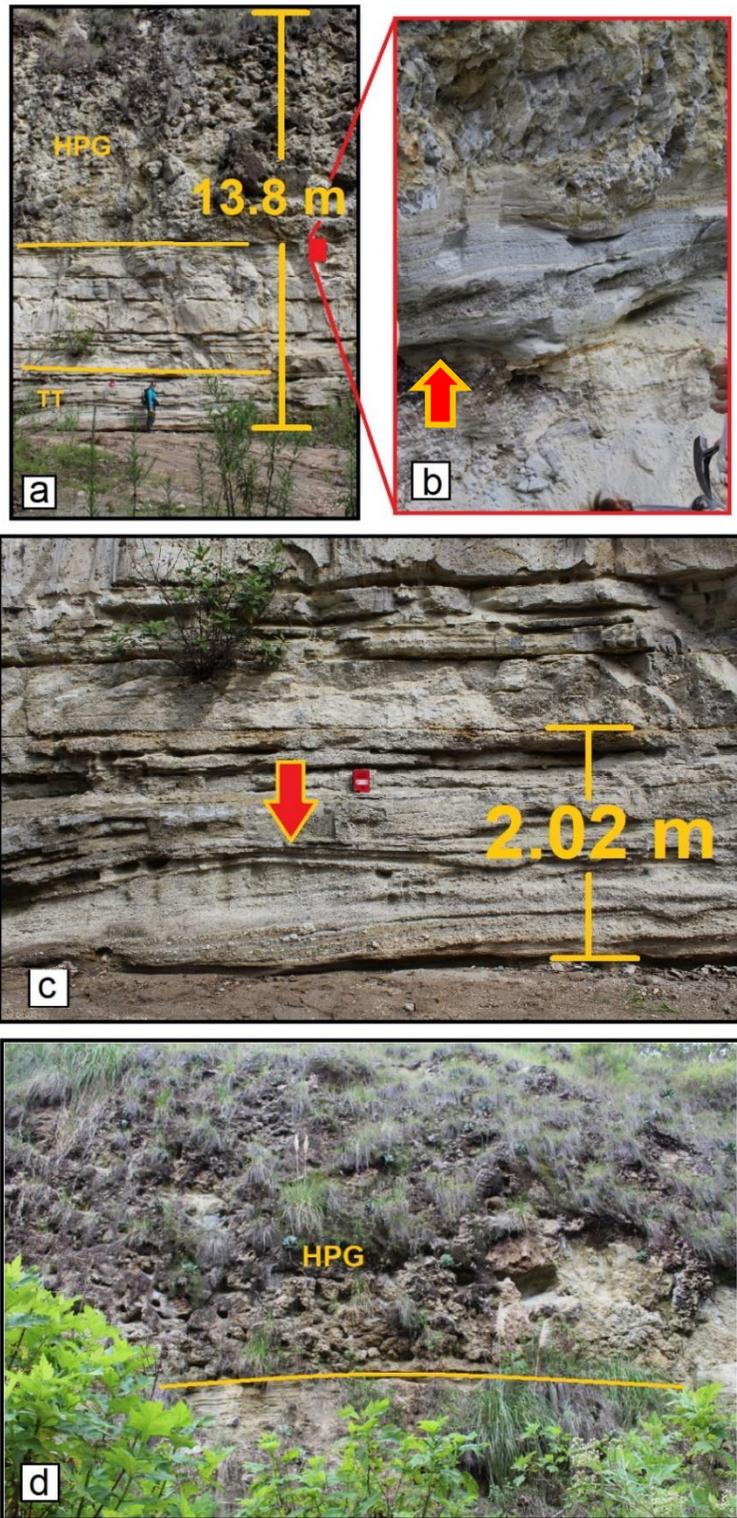


Fig. 4.9 a) Afloramiento donde se aprecia la última etapa de Toba Tala y la Base del HPG. b) Detalle de depósitos lacustres por debajo del HPG. c) Base del afloramiento, señalando el espesor de Toba Tala expuesto, la flecha roja señala la base de la última oleada de Toba Tala. d) Limite inferior del HPG en otro afloramiento muy cercano.

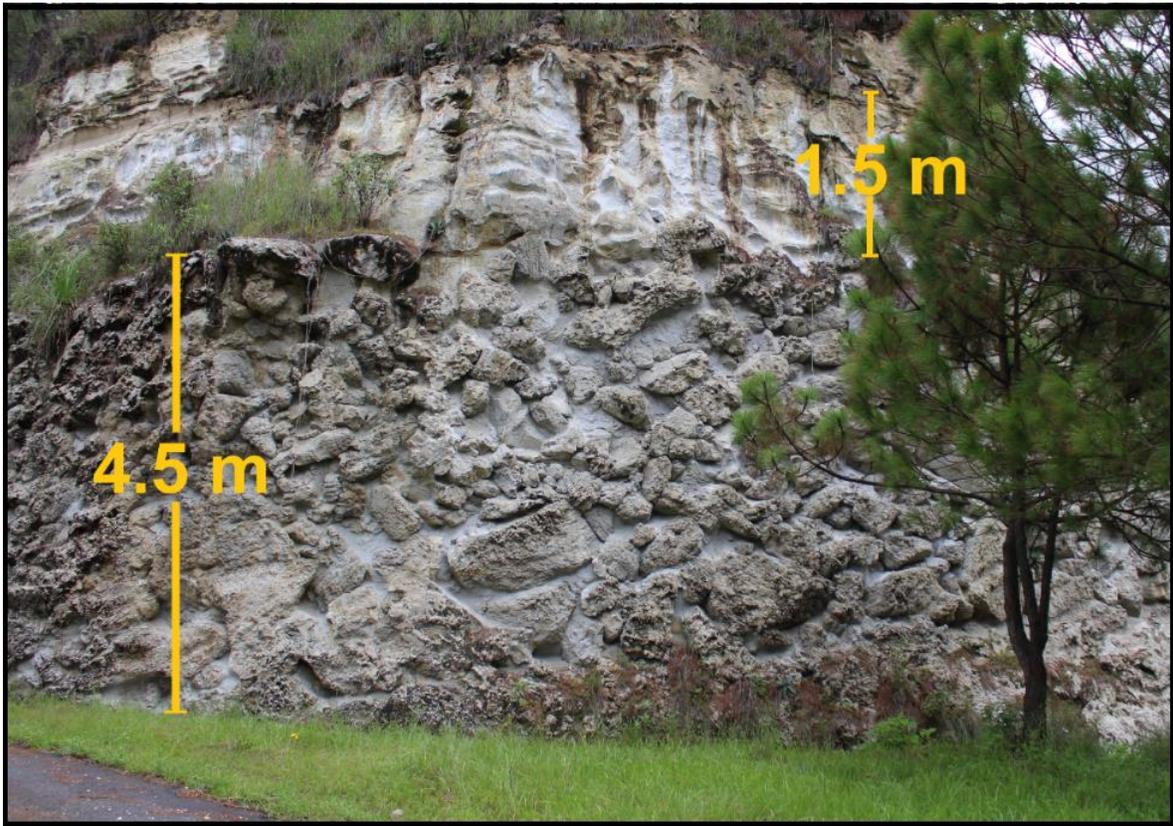


Fig. 4.10. Fotografía del clásico afloramiento de la Pómez Gigante donde se muestra el espesor aproximado de 4.5 m aflorando y el contacto con los lacustres de arriba. Cerca de este sitio se encuentra el afloramiento donde se colectó VM-02.

Por encima del HPG fueron descritas dos secciones estratigráficas (LP16-01VM y LP16-02VM) (Fig. 4.7 y 4.12), de las cuales se tomaron diferente número de muestras, dependiendo de los estratos con pómez que contenían fenocristales. Cabe mencionar que no se pudo observar en campo lo que hay entre los depósitos lacustres por encima del HPG y la sección LP16-01VM, ya que estaba cubierto por vegetación y no se encontró un afloramiento de fácil acceso.

La sección LP16-01VM se describió muy cerca de donde se colectó VM-02, y estratigráficamente arriba del HPG. Para su descripción, esta columna de casi 15 m se dividió en 5 paquetes de menor espesor (Fig. 4.11a-c; línea verde en Fig. 12).

El primer paquete "A" mide aproximadamente 1.1 m y está compuesta principalmente de flujos piroclásticos, con algunos lentes de caída piroclástica intercalados, se colectó pómez de un horizonte de flujos piroclásticos cuyas pómez presentan un tamaño promedio de 3 cm en su eje mayor.

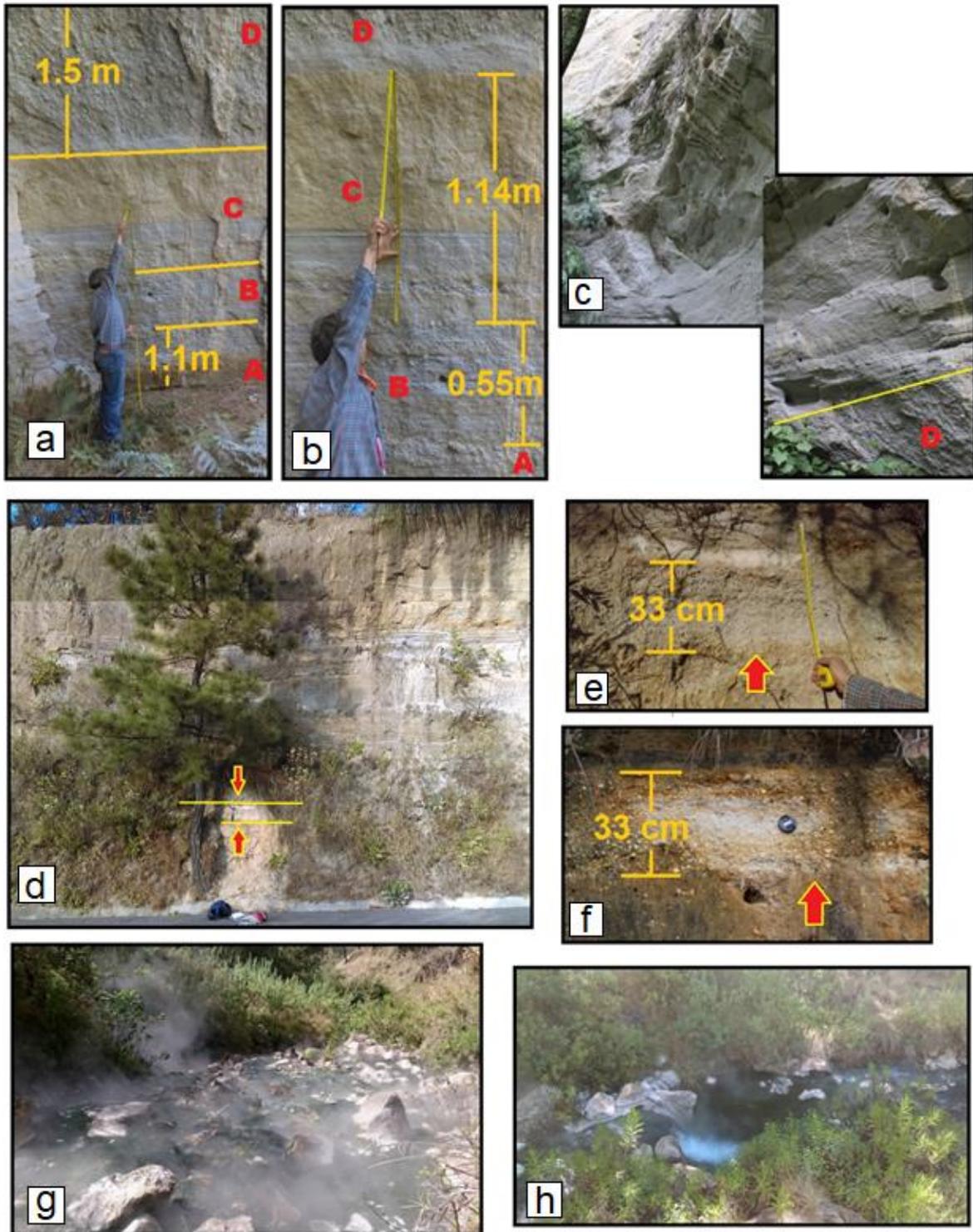


Fig. 4.11. a-c) Fotografías de la sección LP16-01VM, se muestra el espesor de las partes en las que se dividió la sección. d) Sección LP16-02VM. e) y f) Detalle mostrando y señalando el espesor donde se tomó LP16-02VM, fotografías tomadas en distintas salidas de campo. g) y h) Rio Caliente al noroeste de la caldera, la temperatura del agua se encuentra aproximadamente a 70°C.

El paquete "B" mide 55 cm de espesor, representado por caídas piroclásticas principalmente; aquí se muestreo el horizonte con pómez de 1.7 cm de tamaño en su eje mayor. En este horizonte también se puede observar el cambio de coloración entre las laminaciones (estratos menores a 1 cm) y estratos (Fig. 4.11b).

La parte que corresponde a "C", se trata de un paquete donde hay intercalación de flujos piroclásticos de distintos espesores y con pómez de distinto tamaño y afíricas, por lo que no se colectó ninguna muestra en esta parte. Al igual que el paquete anterior, en "C" también se pudo ver el cambio de color en los estratos, con un estrato característico de gran espesor de color amarillo en la cima de este paquete (Fig. 4.11b).

El siguiente paquete "D" son dos flujos piroclásticos, el de la base tiene un espesor de 15 cm, compuesto de pómez de granulometría media y con bastante matriz de ceniza blanca. El siguiente horizonte es de un espesor de 1.5 m aproximadamente, y tiene pómez con mala selección de tamaño, ya que van de granulometría gruesa a fina, y tiene menor porcentaje de matriz que el estrato anterior. En este horizonte se tomaron dos bolsas de muestras, una de la base y otra de la parte intermedia del estrato.

Por último, sobreyaciendo a las secuencias anteriores, ocurre un paquete de más de 10 m de espesor, aunque el afloramiento es inaccesible. A grandes rasgos se pudo ver intercalación de flujos piroclásticos de distintas granulometrías y distinta coloración, y por encima de estos hay depósitos lacustres de un espesor aproximado de 4 m de color blanco. En esta parte de la columna no se tomó muestra.

El hecho de que la sección LP16-01VM se ubique estratigráficamente por encima del HPG y entre dos depósitos lacustres, indica que en el momento del depósito aun no existía el levantamiento de la caldera y la consecuente desaparición del lago, por lo que estos depósitos piroclásticos pueden estar relacionados a los domos anulares antiguos o los domos anulares jóvenes.

La sección LP16-02VM (línea roja en Fig. 12) está expuesta en un corte carretero, a unos cuantos metros por encima de LP16-01VM (Fig. 4.7). En la base se encuentran depósitos lacustres (vistos en la cima de LP16-01VM), con un espesor aproximado de 4 m, seguidos de una intercalación de flujos y caídas piroclásticas de casi 2 m de espesor. En la parte superior de la sección, hay un estrato de caídas piroclásticas de 30 cm aproximadamente que se muestreó como LP16-02VM (Fig. 4.11e-d). La cima de la columna estratigráfica estudiada en esta tesis está representada por una intercalación de caídas piroclásticas con algunos flujos de menor espesor (Fig. 4.12).

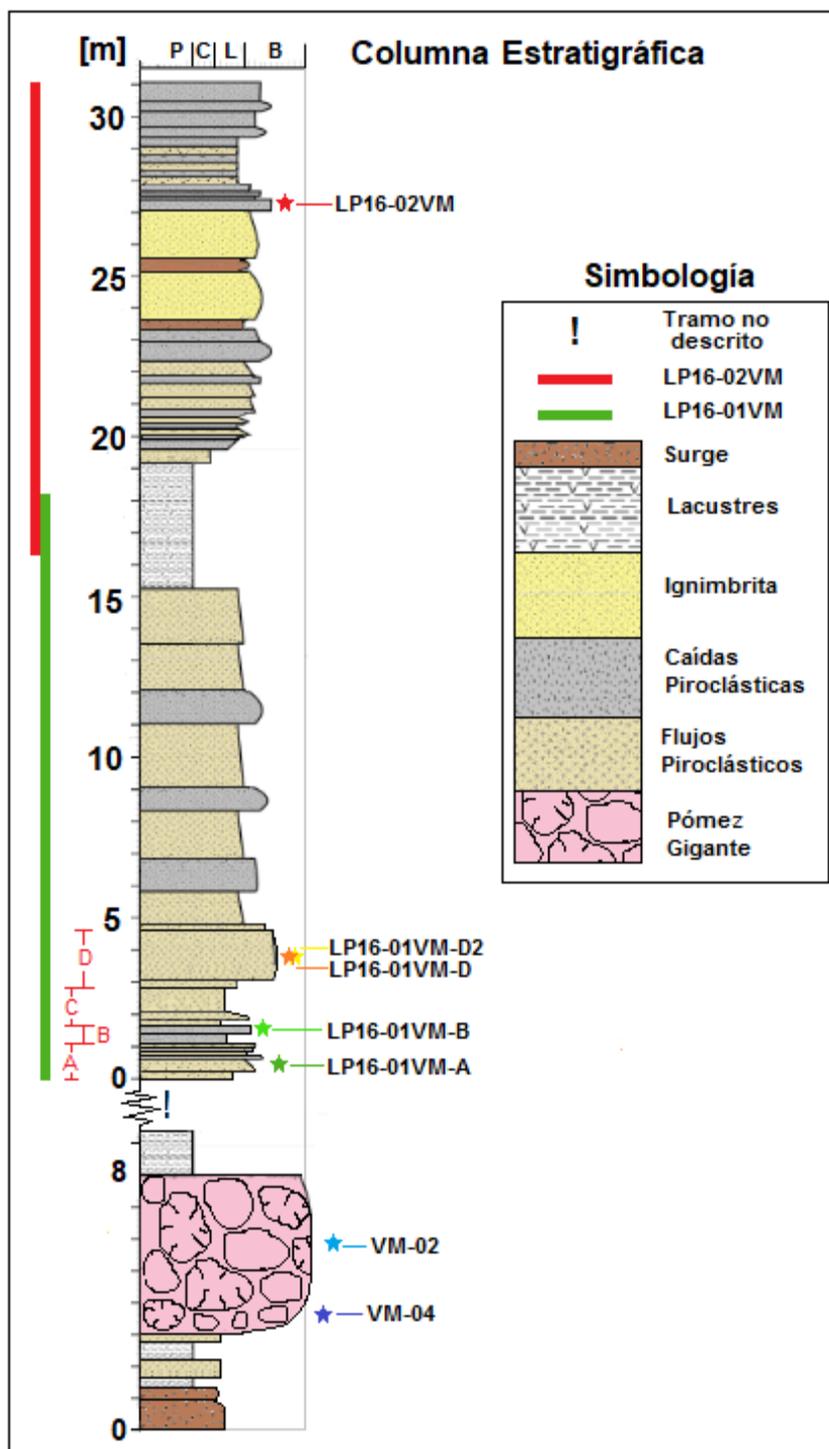


Fig. 4.12. Columna estratigráfica simplificada, y ubicación de las muestras colectadas en La Primavera. Las estrellas muestran la posición estratigráfica de las muestras colectadas en campo. Las líneas verde y roja del lado izquierdo limitan las dos secciones descritas. Las letras: A, B, C y D representan los límites de los paquetes en los que se dividió la primera sección (LP16-01VM). En la base se muestra la última etapa de Toba Tala (sin-caldera).

Las muestras colectadas en la sección LP16-02VM pueden estar relacionadas al arco de lavas sur, ya que por encima de este paquete no se encontraron más depósitos lacustres, indicando que hicieron erupción después del levantamiento de la caldera.

Al igual que en el interior de la caldera existen manifestaciones hidrotermales, también las hay al límite noroeste, pues existen manantiales y ríos con temperaturas de hasta 70°C, en donde se pudo ver que el agua emergía de Toba Tala (Fig. 4.11g-h).

4.3.2. Preparación de muestras

Las muestras que se utilizaron para este estudio fueron únicamente las que pertenecen a las unidades post-caldera, por lo que no se procesaron las muestras VM-01 (mineral blanco en fumarolas de Toba Tala) y VM-03 (riolita pre-caldera) al pertenecer a unidades distintas a las post-caldera.

La preparación de las muestras se llevó a cabo en los laboratorios de “Separación de Minerales II” y de “Petrología” en el Instituto de Geología de la UNAM y en el laboratorio de “Separación de Minerales” en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Trituración y lavado de muestras

Se trituraron los fragmentos de pómez de cada muestra con un mortero con pistilo (de porcelana). Cada muestra molida se separó por tamaño usando tamices de cuatro diferentes medidas, la muestra que quedaba en el tamiz más grande (1,400 μm) volvía a triturarse hasta terminar en los tres tamices inferiores o fondo (Fig. 4.13a). El material colectado en los tamices de 1,000, 710 y 500 μm , así como el material del fondo fueron empaquetados con doble bolsa de cierre. Entre cada trituración de muestra se limpió todo el material y el lugar de trabajo usando agua destilada y posteriormente etanol; para limpiar las mallas de los tamices se usó aire a presión.

Después de triturar y tamizar, el lavado consistió en colocar las muestras de diferente granulometría en distintos vasos de precipitados y añadir agua. Por decantación los cristales se iban al fondo y parte de la pómez como ceniza flotaba por ser menos densa que el agua, el agua se derramaba para eliminar el material fino y quedando el material más denso. Este proceso se repitió 5 veces para cada muestra, los vasos junto con el material se metieron en un horno para secar las muestras a 45 °C y por último se volvieron a empaquetar (Fig. 4.13b).

Selección de cristales

Se utilizó un microscopio estereoscópico para el separado manual de los cristales de cuarzo y feldespato de todas las muestras, a partir de las fracciones de diferentes granulometrías (1000, 710 y 500 μm). El separado de los cristales se hizo poniendo poca cantidad de muestra molida en un plato de Petri y con mucho cuidado se buscaron los minerales que fueron separados con pinzas colocándolos en pequeños contenedores etiquetados por la clave de muestra y tamaño.

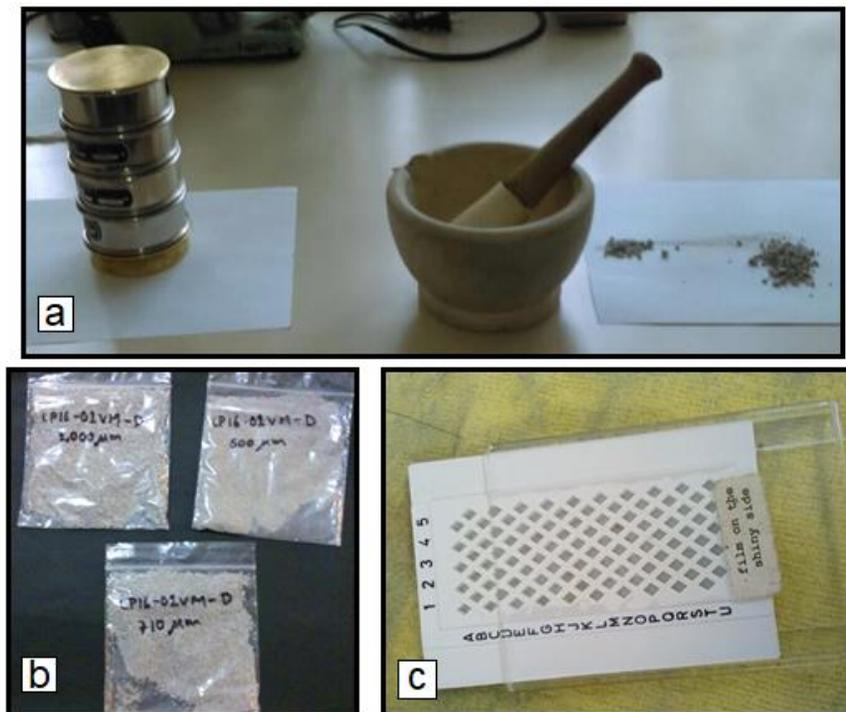


Fig. 4.13. Fotografías del material de trituración y muestras. a) tamices y mortero con pistilo. b) muestras trituradas, lavadas y separadas por tamaños. c) Separador de cristales con clave.

Por último, los cristales que fueron separados en los contenedores se volvieron a colocar en el plato de Petri y se les vertió agua para poder distinguir los cristales con inclusiones de buen tamaño, ya que el vidrio dentro de las inclusiones tiene casi el mismo índice de refracción que el cuarzo y feldespato que las contienen. Todo esto con el fin de separar los cristales con las mejores inclusiones para analizar y hacer su descripción petrográfica. Se seleccionaron de entre 8 a 10 cristales por muestra, escogiendo preferentemente a los cristales más gruesos (Fig. 4.13c y Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Cristales seleccionados de todas las muestras con sus respectivas claves, grupos minerales y tamaño en micrómetros.
(cl.) = clave; min= mineral; (tm)= tamaño; (Qz)= cuarzo y (Feld K)= Feldespato potásico.

LP16-01VM-A			LP16-01VM-B			LP16-01VM-D			LP16-01VM-D2			LP16-02VM			VM-02			VM-04		
cl.	min.	tm. (μm)	cl.	min.	tm. (μm)	cl.	min.	tm. (μm)	cl.	min.	tm. (μm)	cl.	min.	tm. (μm)	cl.	min.	tm. (μm)	cl.	min.	tm. (μm)
A1	Feld K	1,000	C1	Qz	500	E1	Feld K	1,000	G1	Qz	1,000	J1	Qz	1,000	L1	Qz	1,000	N1	Qz	1,000
A2	Feld K	1,000	C2	Feld K	710	E2	Qz	1,000	G2	Feld K	1,000	J2	Qz	1,000	L2	Feld K	1,000	N2	Feld K	1,000
A3	Feld K	1,000	C3	Feld K	710	E3	Qz	1,000	G3	Qz	1,000	J3	Qz	1,000	L3	Feld K	1,000	N3	Feld K	710
A4	Feld K	1,000	C4	Feld K	710	E4	Qz	1,000	G4	Qz	1,000	J4	Qz	1,000	L4	Feld K	1,000	N4	Feld K	710
A5	Feld K	1,000	C5	Feld K	710	E5	Feld K	1,000	G5	Feld K	1,000	J5	Qz	1,000	L5	Feld K	1,000	N5	Qz	710
B1	Feld K	1,000	D1	Feld K	710	F1	Feld K	1,000	H1	Feld K	1,000	K1	Qz	1,000	M1	Qz	710	O1	Qz	710
B2	Qz	710	D2	Qz	500	F2	Feld K	1,000	H2	Feld K	1,000	K2	Qz	1,000	M2	Qz	710	O2	Qz	710
B3	Qz	500	D3	Feld K	710	F3	Qz	710	H3	Qz	710	K3	Qz	1,000	M3	Feld K	710	O3	Qz	710
B4	Qz	500	D4	Qz	1000	F4	Feld K	710				K4	Qz	1,000	M4	Qz	710	O4	Qz	710
			D5	Qz	500	F5	Qz	710				K5	Qz	1,000				O5	Qz	710

Montado de cristales

Primero se cortó un tubo hueco de vidrio en varios aros pequeños (uno para cada cristal) que sirvieron para tener más confinada la muestra en la resina, y que al momento de desbastar no se despegara el cristal de la resina por el abrasivo que se metía entre estos; el aro también permite una mejor manipulación de la muestra a la hora de pulir, ya que es más uniforme. Posteriormente se pegaron los aros de vidrio a papel aluminio marcando la muestra y clave del cristal. El papel con aros de vidrio se colocó sobre una plancha térmica y se preparó una mezcla de resina epóxica calentada aproximadamente a 80 °C, se puso un poco de resina al centro del aro con la ayuda de un palillo de madera, después se colocó el cristal dejándolo caer dentro del aro sobre la resina, y se rellenaba lo restante del aro con resina. Se dejan reposar las muestras en la plancha unos minutos hasta que se endurece la resina (Fig. 4.14a) y, por último, se despegan las muestras del papel aluminio para poder desbastar con abrasivos (Fig. 4.14b).

Cabe mencionar que una quinta parte de las muestras fue montada únicamente con la resina (sin colocar el aro de vidrio) con el fin de comparar ambos montajes y ver con cuál se trabajaba más fácilmente.

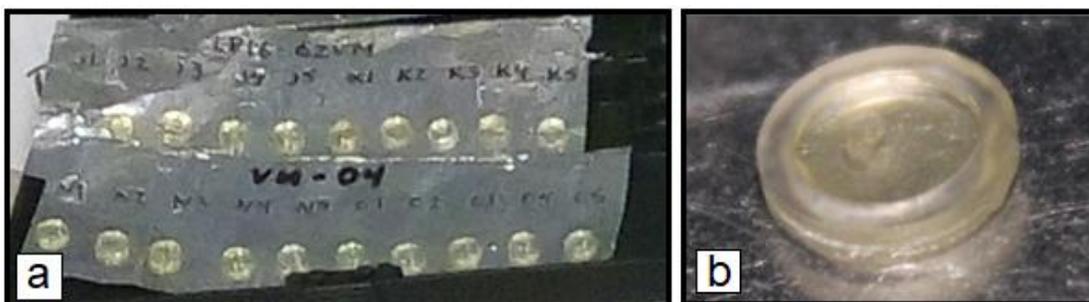


Fig. 4.14. a) Fotografía del montado de los cristales, cada rectángulo de papel aluminio era para una muestra distinta y también se le colocó la clave del cristal. b) cristal montado en resina y confinado en un aro de vidrio.

Pulido de muestras

Antes de empezar a desbastar y pulir todos los cristales de las muestras, se seleccionaron inclusiones representativas (inclusiones primarias), de buen tamaño y que no se vieran afectadas por condiciones de post-atrapamiento. Una vez identificadas y seleccionadas estas inclusiones, y también tomando en cuenta los análisis que se harían (FTIR y EPMA), se desbastó la muestra hasta llegar a exponer la inclusión por un lado y por el otro lado solamente se expuso el cristal.

Los abrasivos que se usaron para desbastar fueron de carburo de silicio, primero se usó el abrasivo más grueso (400 μm) por los dos lados de la muestra hasta llegar al cristal, luego se utilizó el abrasivo de 600 μm . El ultimo abrasivo que se usó antes de pulir fue el de 1,000 μm , con el cual se llegó a exponer la inclusión (Fig. 4.15). La técnica empleada para desbastar consistía en: mezclar abrasivo con agua sobre un vidrio, desbastar la muestra contra el vidrio por un par de minutos, posteriormente lavar la muestra muy bien para ver en el microscopio qué tanto se acercaba el avance de la abrasión, al cristal o a la inclusión (manteniendo húmeda la superficie de la muestra bajo el microscopio para distinguir las inclusiones). Así, este procedimiento se repitió las veces que fueron necesarias hasta que la muestra estaba lista para pulirse.

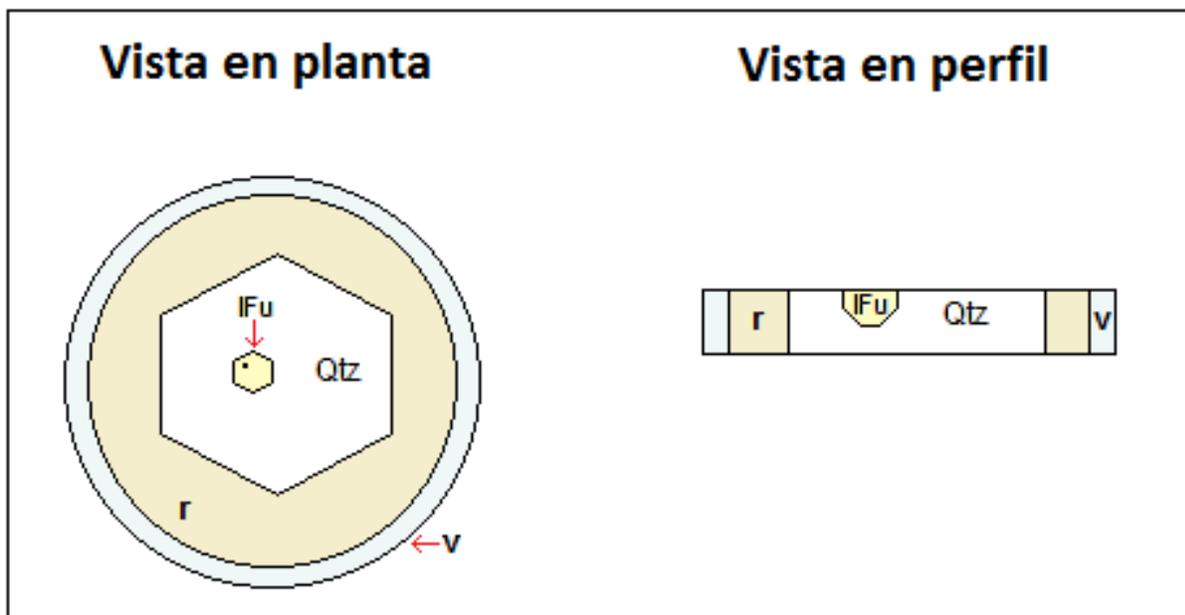


Fig.

4.15. Esquema del montaje de cristales viéndolas en planta y en perfil. Qtz= cuarzo;
IFu= inclusión de fundido; r= resina y v= aro de vidrio.

El objetivo de pulir las muestras es identificar las inclusiones en el microscopio petrográfico sin tener que mojar la muestra y para el posterior análisis de las inclusiones. Para pulir las muestras que ya estaban desbastadas, se utilizó una pulidora en el laboratorio de preparación de muestras en el Instituto de Geofísica Unidad Michoacán de la UNAM. Se pulió con abrasivo de diamante (MetaDi) de 3 μm y 1 μm , así como alúmina de 1 μm (para comparar con el diamante), empleando paños para pulir.

Se comenzó con la solución de diamante de 3 μm , empleando un paño sobre la pulidora, puliendo la muestra manualmente por los dos lados. El mismo proceso se repitió con 1 μm (ya sea diamante

o alúmina y utilizando un paño nuevo) hasta tener los dos lados perfectamente pulidos. Se pudo observar que con alúmina era más rápido el pulido que con el diamante, ambos de 1 μm .

4.3.3 Pómez, fenocristales e inclusiones de fundido

La descripción de las pómez y la petrografía de inclusiones de fundido se realizó en el laboratorio de petrología en el Instituto de Geofísica Unidad Michoacán de la UNAM. Para la descripción de las pómez se utilizó un microscopio estereoscópico LEICA M205 A, y para la descripción petrográfica de las inclusiones de fundido y cristales huéspedes se utilizó un microscopio petrográfico LEICA DFC 450 C (Fig. 4.16).

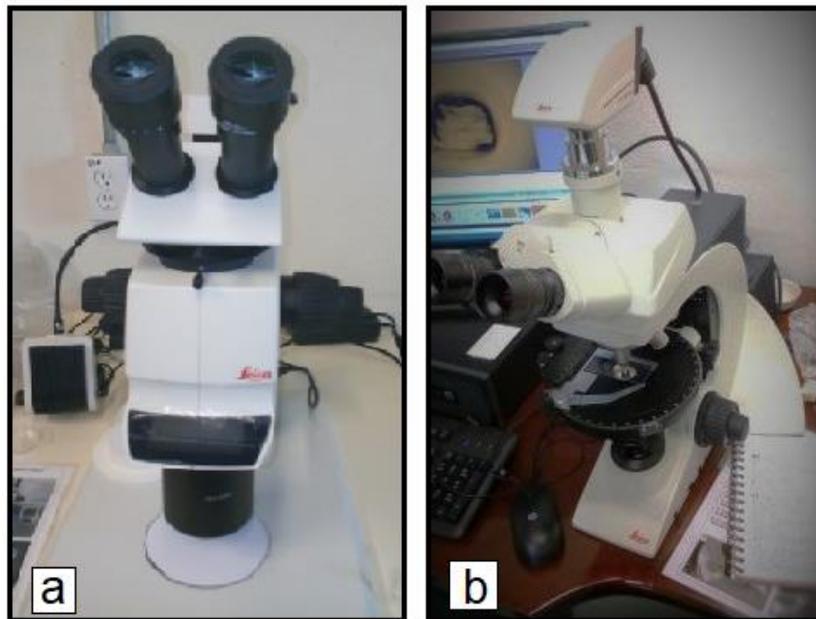


Fig. 4.16. a) Microscopio estereoscópico Leica M205 A, utilizado para la descripción de pómez. b) Microscopio petrográfico Leica DM2700 P con cámara fotográfica Leica DFC 450 C.

Se tomaron fotos de los cristales que se analizaron, así como de las inclusiones de vidrio con una cámara LEICA DFC 450 C acoplada al microscopio petrográfico. En el momento que se hizo la descripción petrográfica de las inclusiones todavía no se montaban los cristales en resina por lo que se necesitó sumergir el cristal en agua o aceite mineral para distinguir las inclusiones de vidrio.

Fragmentos de pómez

Los fragmentos de pómez colectados de las diferentes unidades post-caldera, en general presentan pocas diferencias entre ellos, los cambios más evidentes son en el color, el tamaño y el porcentaje de minerales que contienen. En la tabla 4.3 se muestran las características de las pómez de todas las unidades muestreadas.

En una localidad del Horizonte de Pómez Gigante (HPG), ocurren pómez de color café grisáceo con un tamaño de lapilli, estas pómez se colectaron de la base del HPG. Mientras tanto, en el otro afloramiento del HPG el tamaño ya es de una bomba, pues los clastos median de 0.5-1 m en su eje más largo, y su color es un blanco grisáceo (Fig. 4.17). Ambas pómez presentan una alta vesicularidad (~20%) y contienen menos de 1 % de fenocristales en donde predominan los de feldespato. En la sección LP16-01VM, las pómez son grises y tienen un lustre más nacarado, el tamaño también es variado ya que ocurren horizontes con pómez del tamaño de lapilli (LP16-01VM-A y LP16-01VM-B) y algunos horizontes contienen pómez que llegan al tamaño de bombas (mayor que 3 cm), al igual que las muestras del HPG su contenido mineralógico es menor al 1%. Por último, en las pómez encontradas en depósitos de caídas (LP16-02VM) el contenido de cristales es mayor, ya que alcanza hasta un 10 %. Estas pómez parecen estar más alteradas que las anteriores, pues presentaban una pátina amarilla que las anteriores no mostraban.

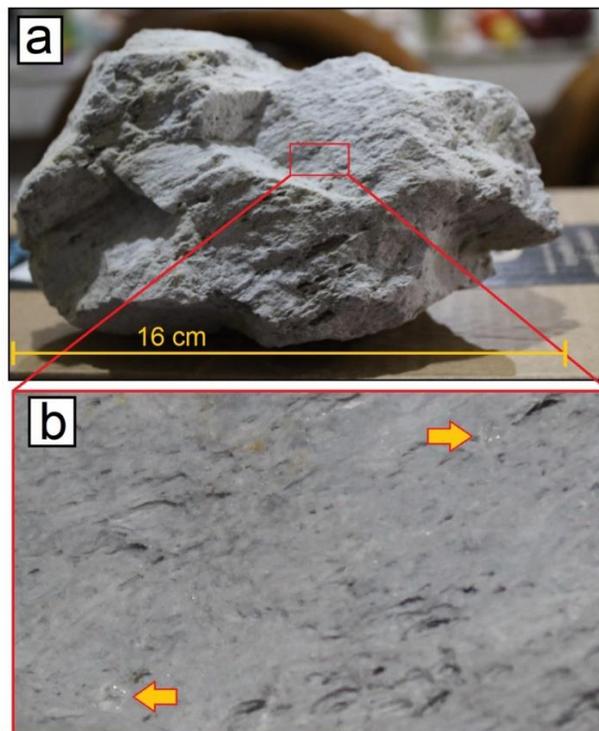


Fig. 4.17. a) Bloque de pómez del HPG en el afloramiento VM-02, se puede apreciar vesicularidad alineada y un color gris claro. b) Detalle de la fotografía donde las flechas señalan dos finos cristales.

Tabla 4.3. Características descriptivas de las pómez colectadas para el estudio de Inclusiones de fundido.

Muestra	Color	Textura	Vesicularidad/ forma de las vesículas	Forma	Tamaño	Mineralogía
VM-04	Café grisáceo con algunas manchas amarillentas	Fírica, vesicular, hipohialina	~ 20%, alargadas y redondeadas	irregulares con los bordes sub-redondeados a sub-angulosos	Lapilli	1 %; sanidino > cuarzo >> clinopiroxeno
VM-02	Blanco grisáceo con algunas manchas amarillentas, brillo nacarado	Fírica, vesicular, hipohialina	~ 20%, alargadas y redondeadas	irregulares con los sub-angulosos	Bombas y lapilli	1 %; sanidino > cuarzo >> clinopiroxeno
LP16-01VM- A	Gris claro, brillo nacarado	Fírica, vesicular, hipohialina	~ 20%, alargadas y redondeadas	irregulares con los bordes sub-redondeados	Lapilli y bomba	1 %; sanidino > cuarzo
LP16-01VM- B	Gris claro a amarillento, brillo nacarado	Fírica, vesicular, hipohialina	~ 20%, alargadas, finas, redondeadas y algunas irregulares	irregulares con los bordes sub-redondeados a sub-angulosos	Lapilli	1%; sanidino > cuarzo
LP16-01VM- D	Gris claro, brillo nacarado	Fírica, vesicular, hipohialina	~ 15%, , pequeñas, alargadas y circulares	irregulares con los bordes sub-redondeados a sub-angulosos	Lapilli	1%; sanidino > cuarzo
LP16-01VM- D2	Blanco grisáceo, brillo nacarado	Fírica, vesicular, hipohialina	~ 15-17%, alargadas y circulare	irregulares con los bordes sub-angulosos	Lapilli y bomba	1%; sanidino > cuarzo
LP16-02VM	Blanca con manchas amarillas, brillo nacarado	Fírica, vesicular, hipohialina	~ 20-25%, , alargadas y pequeñas	irregulares con los bordes sub-redondeados a sub-angulosos	Lapilli y bombas	10 %; sanidino > cuarzo

Petrografía de Inclusiones de fundido

Los cristales de cuarzo y feldespatos que se emplearon para este estudio se eligieron conforme a las inclusiones que estos contenían. Por las razones discutidas en el capítulo 3, se intentó escoger los cristales que tuvieran inclusiones primarias y de un tamaño adecuado para su estudio (>30 μm).

Para las dos muestras del horizonte de pómez gigante (HPG) (VM-02 y VM-04) se separaron 12 cristales de cuarzo y 7 cristales de feldespato en total, con tamaños de entre 710 y 1,000 μm .

Los cristales de cuarzo presentan una superficie irregular, ondulada, con golfos o entradas, tienden a ser euédricos con forma de prismas hexagonales bipiramidales semi-redondeados (Fig. 4.18a). La abundancia de inclusiones de vidrio en estos cristales es moderada a alta (8- 20 inclusiones por cristal), aunque algunos cuarzos tenían menos de 5 inclusiones, y por lo general están más concentradas al centro del cristal que en los bordes.

En las inclusiones de los cuarzos, las formas son poco variadas, tienen bordes redondeados o con forma de cristal negativo (Fig. 4.18b) (Frezzotti, 2001), y algunas son semi-rectangulares a ovaladas. Sus tamaños van de 100 a 10 μm aproximadamente. En cuanto a las fases presentes, hay más inclusiones bifásicas ($G\pm V$), donde predomina la fase sólida (G , vidrio) sobre la fase gaseosa (V , vapor de agua o CO_2), por lo que son bifásicas (Fig. 4.18d). También se encontraron algunas inclusiones de vidrio de mayor tamaño sin burbuja de vapor (Fig. 4.18f, h), aunque por lo general las de menor tamaño son monofásicas (G) (Roedder, 1984). La mayoría de las inclusiones parecen estar aisladas, y las que están juntas no parecen seguir algún patrón, por lo que se consideran como primarias (Fig. 4.18f, h).

Por su parte los feldespatos son euédricos, tabulares, incoloros y traslúcidos. En algunos es posible apreciar el crucero, y hay unos con bordes en los que se distingue fractura irregular (Fig. 4.18). El contenido de las inclusiones es mayor que en los cuarzos y contienen inclusiones grandes y aisladas (primarias) e inclusiones alineadas y de menor tamaño (secundarias). Las inclusiones que contienen los feldespatos son cuadrangulares (forma de cristal negativo Fig. 4.18g), y hay otras más alargadas (Fig. 4.18e). La mayoría son inclusiones bifásicas ($G\pm V$), pero también hay inclusiones que contienen más de una burbuja (Fig. 4.18c, e). Los tamaños de las inclusiones más grandes están en un rango de entre 150-25 μm y las más pequeñas pueden ser menores a 10 μm

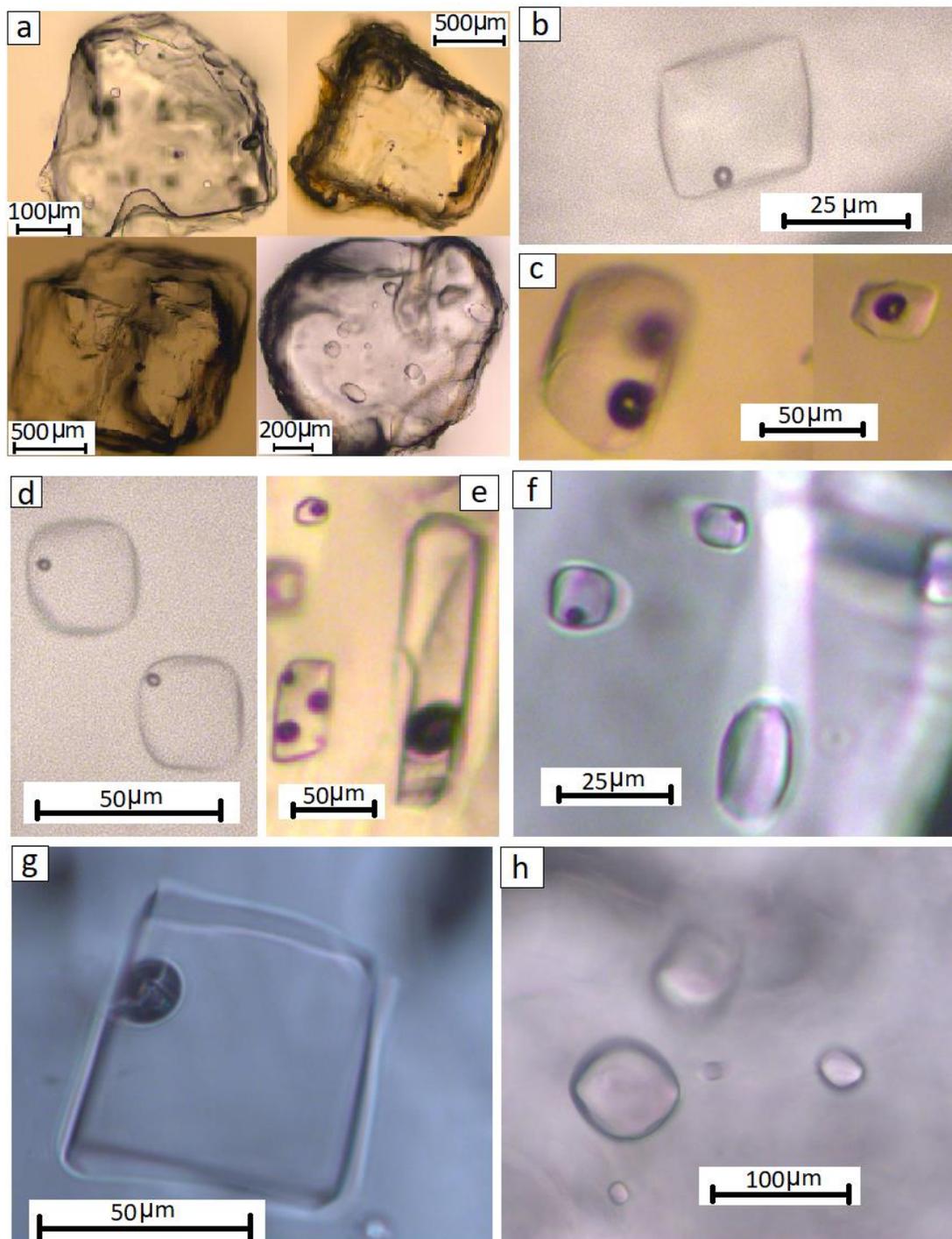


Fig. 4.18. Fotomicrografías de cristales huésped e inclusiones de fundido (IFu) del Horizonte de Pómez Gigante (VM-2 y VM-4). a) Cristales de cuarzo y sanidino. b) Inclusión de fundido con forma de cristal negativo en cuarzo "O1". c) IFu en sanidino "N4" con distintos tamaños, y diferente número de burbujas. d) IFu bifásicas en cuarzo "O2", donde $G > V$. e) IFu de diferentes formas y tamaños, y número de fases presentes en sanidino "N2". f) Grupo de IFu bifásicas y monofásicas en cuarzo "O2". g) IFu con forma de cristal negativo en sanidino "L3". h) Grupo de IFu monofásicas en cuarzo "M2". Todas las muestras fueron tomadas con luz transmitida y condensador.

En las muestras de la sección LP16-01VM, se separaron cristales de feldespato potásico y cuarzo con tamaños de entre 1,000 a 500 μm .

Se encontraron cristales de cuarzo bipiramidales con bordes redondeados. Hay cristales que presentan fractura concoide y también con superficie ondulada (como bola de golf) (Fig. 4.19a). Todos son incoloros y van de transparentes a traslúcidos, su brillo es vítreo. Tienen una abundancia moderada de inclusiones (5 a 15 inclusiones por cristal). La mayoría aisladas y tienden a ser concentradas al centro del cristal, pero algunas hacia los bordes.

En general las inclusiones de fundido en cuarzos son monofásicas (G) y bifásicas ($G\pm V$) (Fig. 4.19d, f). Las inclusiones más grandes en ocasiones pueden tener más de una burbuja, en su eje mayor las IFu miden de 250 a 20 μm , pero incluso hay menores a 10 μm . Hay IFu con formas de cristal negativo, con bordes redondeados, semicirculares, ovaladas y algunas irregulares. La disposición de las IFu en los cuarzos es aleatoria (Fig. 4.19g) y tienden a acumularse al centro del cristal, aunque algunas ocurren en los bordes, por lo que se consideran inclusiones primarias. Las IFu en estos cuarzos son incoloras, y en un cristal se pudo observar una IFu que tenía un halo rojizo.

Por su parte, los cristales de feldespato en general son euédricos, pero en algunos casos las caras son irregulares (Fig. 4.19a) y con fracturas, donde se puede observar el crucero bien definido con un microscopio estereoscópico. Son incoloros y transparentes a traslúcidos, aunque algunos pocos presentaron una probable alteración amarillenta. En algunos minerales se observaron maclas. La abundancia de IFu en estos cristales es de moderada a abundantes (10-20 inclusiones por cristal). Las IFu pueden estar dispuestas tanto en el centro como en los bordes del cristal, y hay inclusiones que tienden a disponerse de una forma lineal, paralelas a bordes de crecimiento (generalmente las inclusiones más pequeñas).

En estos feldespatos hay inclusiones con distintos números de fases presentes, así como distintos grados de relleno. La gran mayoría de las inclusiones de fundido son bifásicas ($G\pm V$) y monofásicas (G) (Fig. 4.19). También hay inclusiones con más de una burbuja ($G\pm V_1\pm V_2$) (Fig. 4.19h). Sus formas son cuadrangulares (forma de cristal negativo, Fig. 4.19e), rectangulares, redondeadas u ovaladas (Fig. 4.19b), también hay algunas de forma irregular y alargadas. El rango de tamaño es muy amplio ya que hay mayores a 200 μm y menores a 10 μm , pero las más abundantes van de 30 a 70 μm .

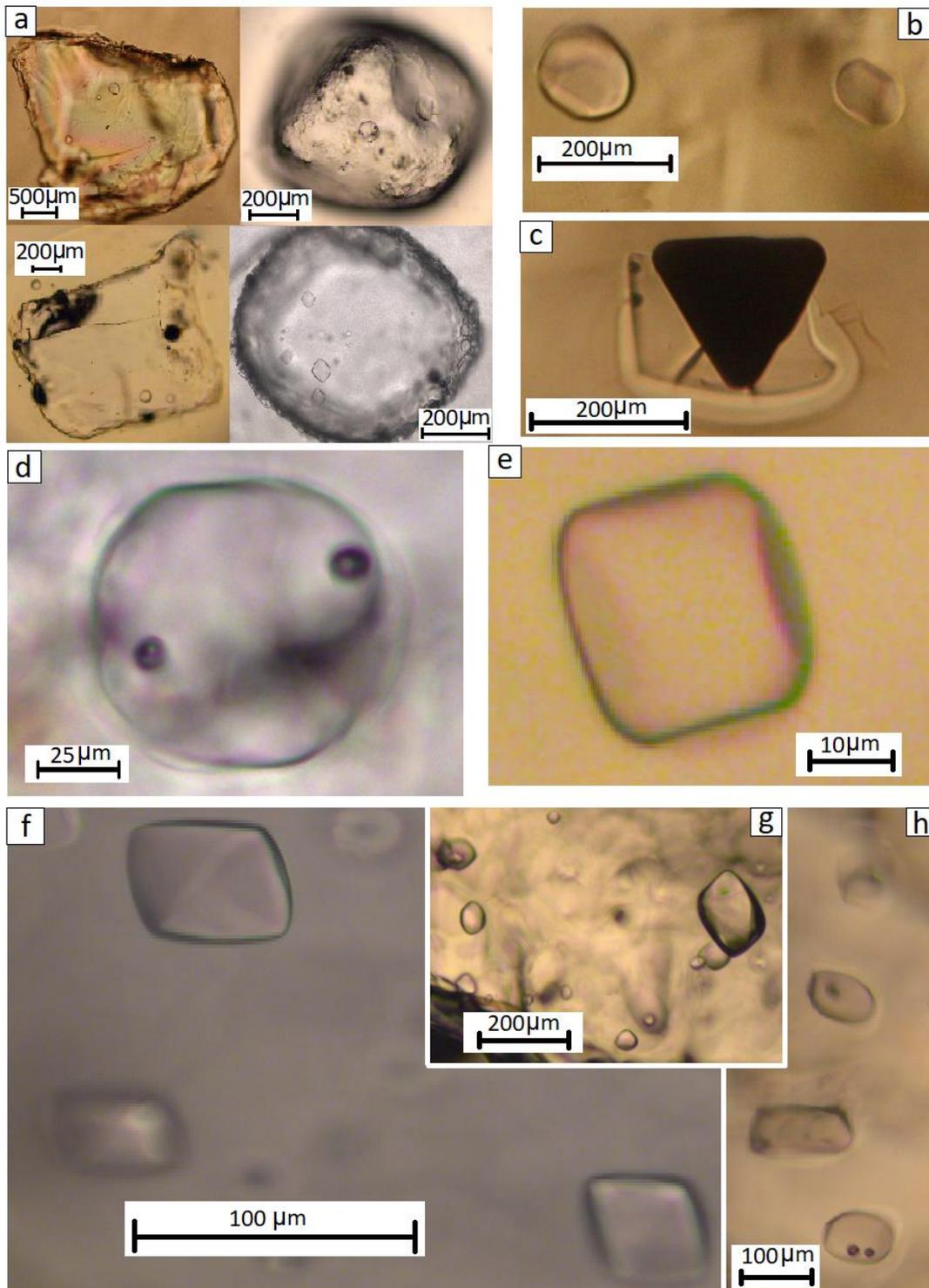


Fig. 4.19. Fotomicrografías con microscopio petrográfico de los cristales e inclusiones de fundido (IFu) de los flujos de pómez (LP16-01VM). a) Cristales huéspedes de cuarzo y sanidino. b) IFu monofásicas y redondeadas en "A1". c) IFu en feldespato "A2", bifásica y fracturada, que parece haber nucleado en una inclusión sólida de ilmenita(?). d) IFu bifásica con dos burbujas en cuarzo "B3". e) Pequeña IFu con forma de cristal negativo en feldespato "F2". f) IFu en cuarzo "H3" con forma de cristal negativo. g) Conjunto de IFu monofásicas dispuestas aleatoriamente en el cuarzo "G3". h) IFu alineadas con distintas formas y tamaños en "H2".

Los cristales contenidos en pómez de depósitos de caída de la sección LP16 -02VM son de cuarzo. Todos con un tamaño que supera 1,000 μm , y la mayoría presenta la superficie similar a una bola de golf, con múltiples bahías. Los cuarzos son transparentes a translucidos, con un brillo vítreo e incoloros. La mayoría son euédricos a subédricos, bipiramidales, con bordes redondeados (Fig. 4.20a), aunque algunos son de forma irregular. La abundancia de inclusiones en los cristales va de pobre a moderada (5-15 inclusiones por cristal), y tienden a concentrarse más hacia el núcleo del cristal.

Las inclusiones son tan grandes como 200 a 150 μm y tan pequeñas como menores de 10 μm , los tamaños más comunes son de 50 a 25 μm (Fig. 4.20c). La mayoría de las inclusiones solo contienen vidrio (G), aunque también hay algunas bifásicas (G \pm V) (Fig. 4.20d). Las formas son bastantes variadas podemos encontrar: ovaladas y/o alargadas (Fig. 4.20b, e), con forma de cristal negativo y con bordes redondeados (Fig. 4.20b-c), irregulares (Fig. 4.20c, f). La mayoría de las inclusiones son primarias debido a su disposición aleatoria, también parece haber unas muy pequeñas (menores a 10 μm) que siguen un patrón lineal representando bordes de crecimiento (Fig. 4.20b). Todas las inclusiones encontradas son incoloras.

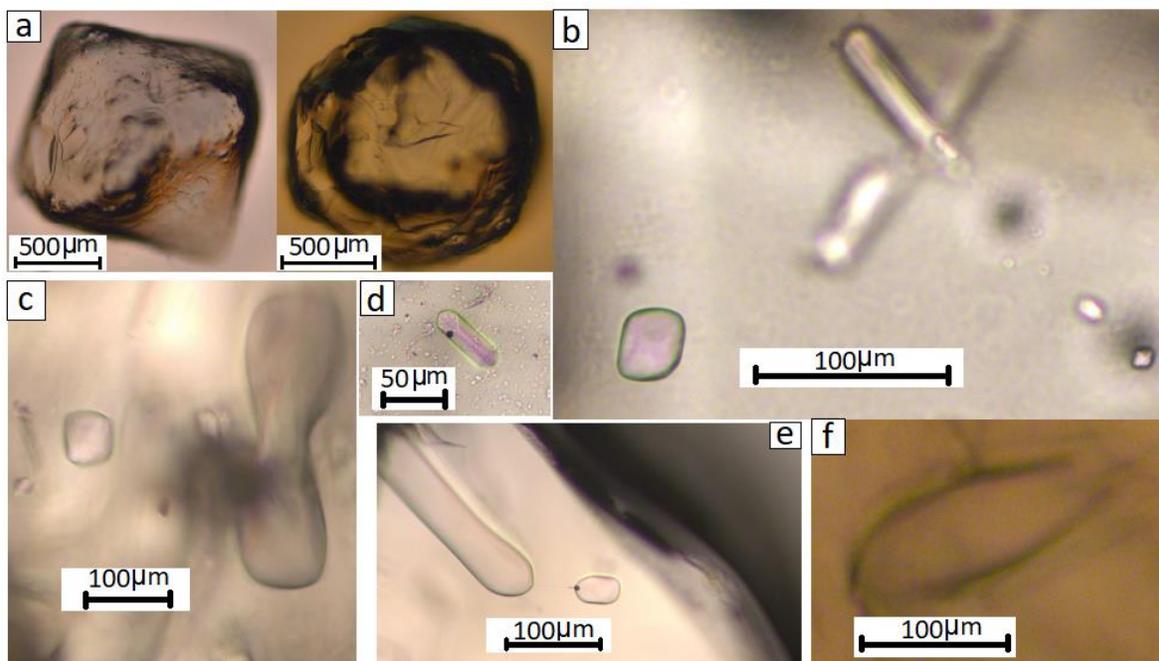


Fig. 4.20. Fotomicrografías tomadas con microscopio petrográfico de los cristales e inclusiones de fundido (IFu) del horizonte de caídas de pómez (LP16-02VM). a) Cristales huésped de cuarzo. b) Grupo de IFu en cuarzo "J1", se pueden ver distintas formas de inclusiones en un mismo cristal. c) IFu monofásica de diferentes formas y tamaños, alojadas en "J2". d) IFu bifásica en "J2". e) Una gran IFu alargada y monofásica con una más pequeña y bifásica, alojadas en "K5". f) IFu ovalada a irregular en "J3".

4.3.4 Geoquímica de pómez e inclusiones de fundido

Geoquímica de roca total

Se prepararon polvos para analizar la geoquímica de roca total de todos los fragmentos de pómez, con el objetivo de comparar con la geoquímica de las inclusiones de vidrio, así como con la geoquímica de rocas estudiadas por varios autores que han trabajado en la sierra de La Primavera. La elaboración de los polvos se realizó en el laboratorio de preparación de muestras del IGUM, y se enviaron a Activation Labs (Canadá) para ser analizadas.

Se usó el método analítico INNA (Análisis de Activación de Neutrones Instrumental) para los elementos Au, As, Br, Cr, Ir, Sc, Se y Sb. El método FUS-ICP (fusión de peróxido con plasma acoplado inductivamente) se utilizó para los óxidos mayores. Para los demás elementos traza y tierras raras se usaron TD-ICP (digestión total con plasma acoplado inductivamente) y FUS-MS (fusión de peróxido combinado con espectrómetro de masa) respectivamente.

Elementos mayores

Los elementos mayores son aquellos elementos que se encuentran presentes en un sistema en concentraciones mayores a 0.1% en peso, son de suma importancia debido a que con ellos se puede clasificar químicamente a las rocas ígneas y nos permiten estudiar la evolución química durante algunos procesos magmáticos. Los resultados obtenidos de la composición química de las pómez se pueden observar en la Tabla 4.4, en donde se muestra el porcentaje en peso (wt. %) de óxidos mayores.

Tabla 4.4. Composición en óxidos mayores de las unidades post-caldera colectadas. Los resultados están dados en porcentaje en peso (wt.%).

Muestra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	sum
VM-04	74.61	0.144	11.37	1.82	0.049	0.02	0.22	4.04	4.54	0.01	3.22	100.24
VM-02	73.04	0.144	11.09	1.75	0.042	0.01	0.19	3.21	4.39	0.02	4.57	98.65
LP16-01VM-A	72.32	0.146	10.82	1.88	0.049	0.03	0.26	2.44	4.33	0.01	6.16	98.66
LP16-01VM-B	73.1	0.16	11.22	1.94	0.048	0.03	0.29	2.41	4.48	0.01	6.2	100.11
LP16-01VM-D	73.21	0.142	11.02	1.93	0.051	0.03	0.24	2.37	4.48	0.02	6.13	99.83
LP16-01VM-D2	73.56	0.146	11.05	1.94	0.054	0.03	0.26	2.47	4.41	0.01	6.01	100.16
LP16-02VM	72.86	0.074	11.88	1.44	0.037	0.02	0.21	3.49	4.24	0.02	5.07	99.50

En un diagrama TAS ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ vs SiO_2) se graficaron los datos obtenidos de este trabajo junto con áreas de colores que representan los eventos pre-caldera, sin-caldera y post-caldera (Fig. 4.21), los datos que se utilizaron para construir las áreas están basadas en los resultados aportados por otros autores que han trabajado en La Primavera. Se utilizaron los resultados de Miguel-Cruz (2016), quien trabajó en el análisis de IFu de unidades sin-caldera. Así mismo los datos publicados por Mahood (1977, 1981a y 1981b), los cuales representan todas las etapas de la evolución de la caldera (pre, sin y post-caldera). También se utilizaron los resultados de Cruz-Lara (2015), Gómez-Álvarez (2015), y del proyecto en curso (CEMIEGEO P-15) (Ávila-Ortiz, 2018)(Tinoco-Murillo, 2017)(Sourisseau, *en proceso*), que corresponden a los últimos domos que se formaron en la caldera.

Dichos datos también son utilizados con fines de comparación en todos los diagramas posteriores.

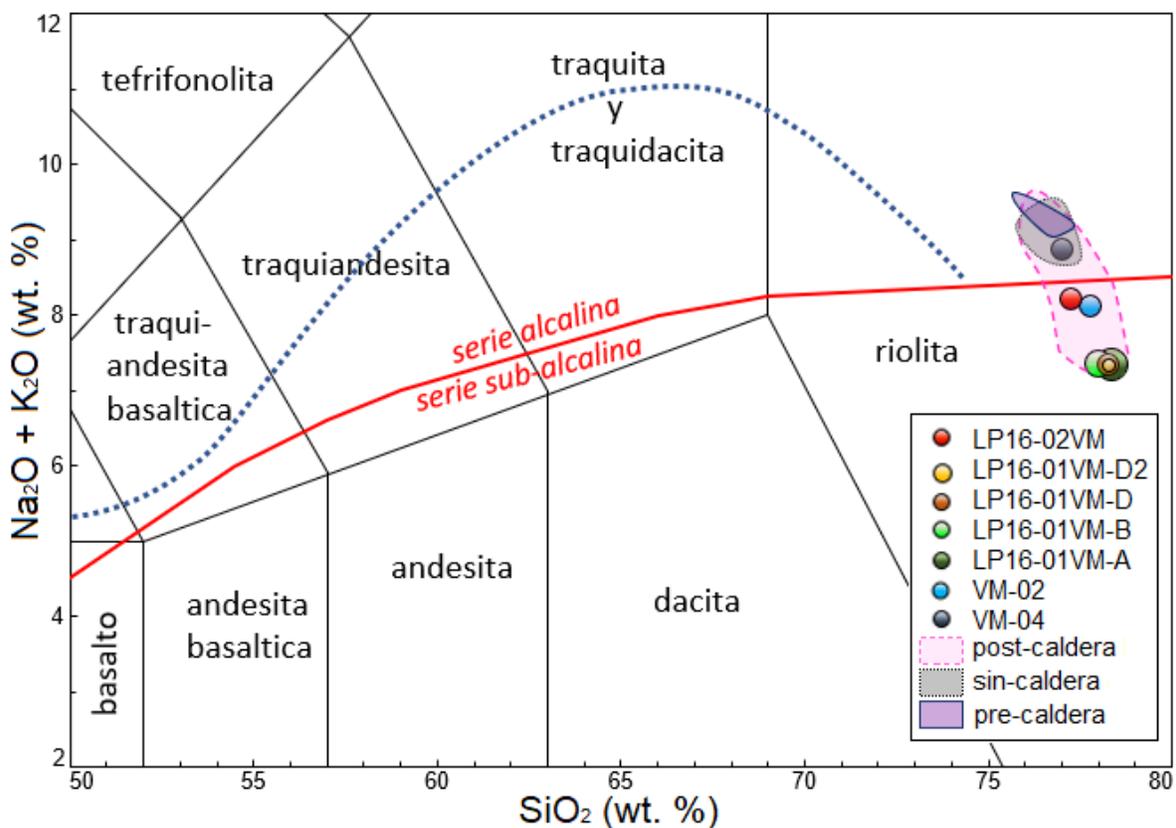


Fig. 4.21. Diagrama TAS (total álcalis vs sílice) mostrando la composición de las pómez estudiadas en esta tesis. Los círculos de colores corresponden a las muestras colectadas para este trabajo. Los datos con los que se construyeron las áreas (pre-caldera, sin-caldera y post-caldera) corresponden a Mahood (1977, 1981a y 1981b), Cruz-Lara (2015), Gómez-Álvarez (2015), Miguel-Cruz (2016), Tinoco-Murrillo (2017), Ávila-Ortiz (2018) y Sourisseau (*en proceso*). La línea roja representa la separación entre la serie alcalina y subalcalina (Miyashiro, 1978). Línea punteada marca la trayectoria para la cristalización fraccionada de rocas peralcalinas (Chen, 2013).

Se observa que todos los datos de La Primavera caen en el grupo de las riolitas, además, su composición está cerca de la transición de alcalinas y subalcalinas. Las muestras de este trabajo tienen contenidos de SiO₂ mayores a 75 wt.%, lo que las define como riolitas de alto sílice. Se puede ver que siguiendo el orden estratigráfico (de VM-04 a LP16-02VM, ver simbología en Fig. 4.21) va aumentando el sílice, para después disminuir en la muestra más joven (LP16-02VM). En el caso del álcalis (Na₂O+K₂O) es todo lo contrario, ya que el contenido va disminuyendo de VM-04 a LP16-01VM-D2, pero en la muestra LP16-02VM vuelve a aumentar. También se puede apreciar que las muestras colectadas de la sección LP16-01VM (A, B, D y D2) tienen prácticamente la misma composición (Fig. 4.21).

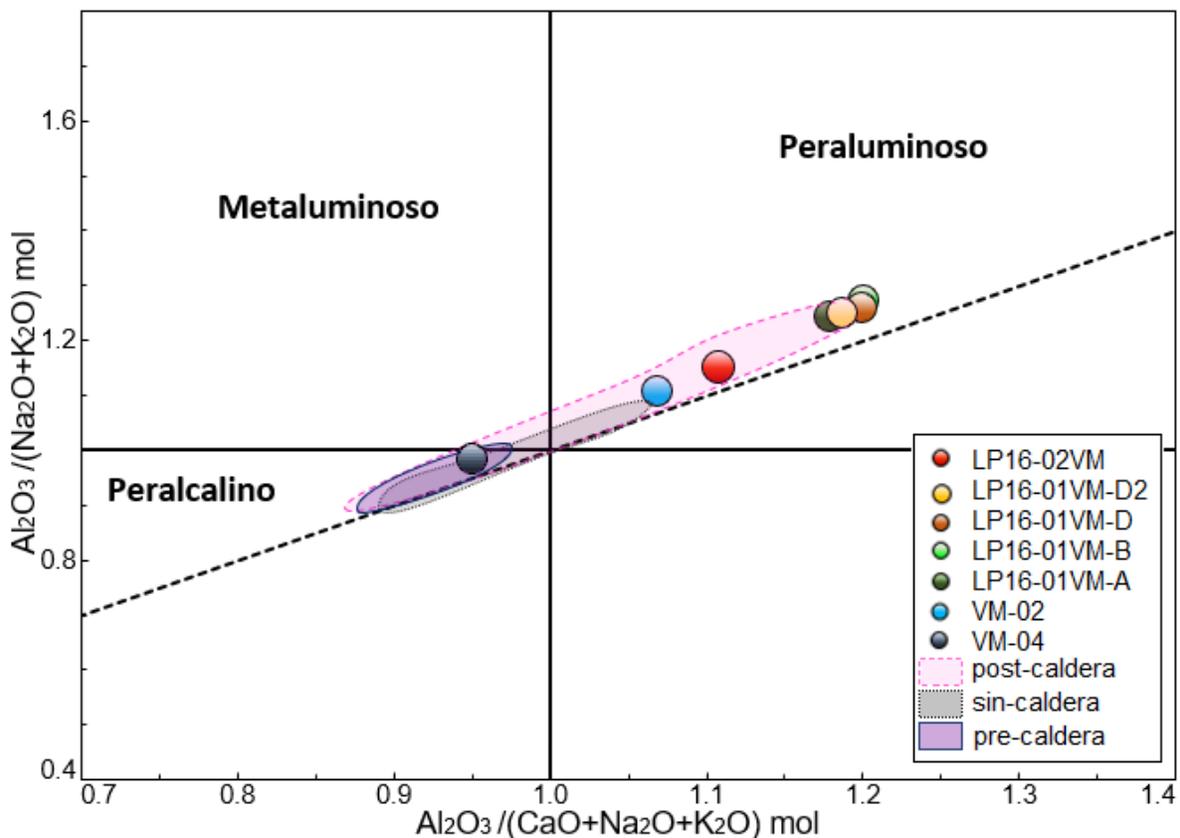


Fig. 4.22. Diagrama $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O+CaO)$ vs. $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$ (Shand, 1943). Los círculos de colores corresponden a las muestras de pómez colectadas para este trabajo.

De acuerdo con el grado de saturación en alúmina, las riolitas de La Primavera se clasifican como peralcalinas y peraluminosas. Se puede notar que las rocas pre-caldera tienen composición

peralcalina, mientras que las rocas de los eventos sin-caldera y post-caldera son rocas peralcalinas y peraluminicas (Fig.4.22).

En las muestras de este trabajo se nota que VM-04 (base del HPG) se clasifica como peralcalina, mientras que VM-02, la otra muestra correspondiente al HPG en un nivel estratigráfico superior, es de composición peraluminica. Las muestras correspondientes a erupciones posteriores (muestras de las sección LP16-01VM y LP16-02VM) son peraluminosas (Fig.4.22).

En un diagrama de rocas hiperalcalinas (MacDonald, 1974), todas las muestras son clasificadas como riolitas comendíticas (Fig. 4.23). Únicamente VM-04 debería graficarse en el diagrama (que es empleado para rocas alcalinas), pero se hizo una excepción para ver su tendencia en la gráfica FeO* vs Al₂O₃. La suite de muestras del HPG (VM-04 y VM-02) tienen una cantidad de FeO* alrededor de 1.9 wt.%, mientras que las rocas de la suite LP16-01VM tienen una cantidad de FeO* poco mayor a 2 wt.%. Por último la muestra LP16-02VM disminuye su contenido en hierro con respecto a las anteriores, pues es de 1.53 wt.%.

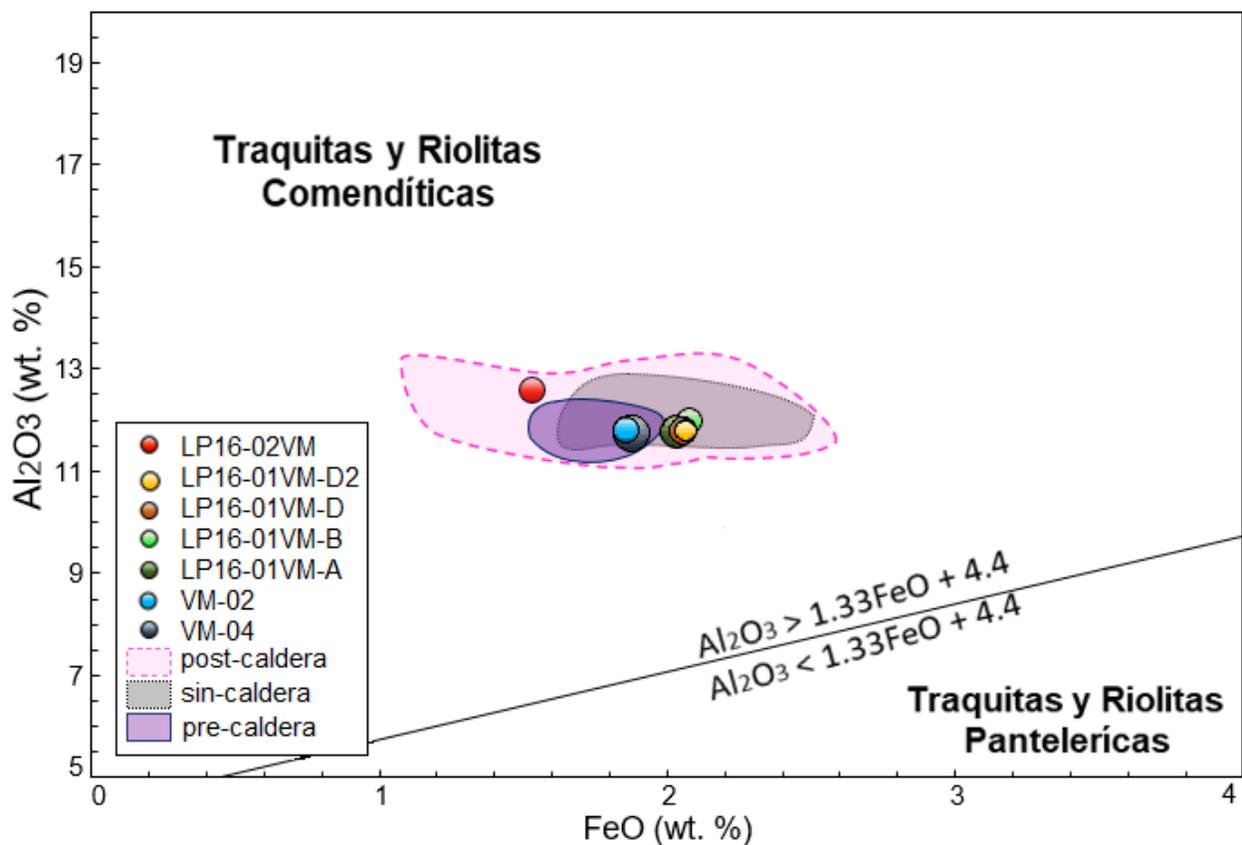


Fig. 4.23. Diagrama para clasificación de traquitas y riolitas en rocas comendíticas y pantelericas (Macdonald, 1974). Los símbolos circulares indican la composición de pómez estudiadas en esta tesis. El óxido de hierro total se calculó con la expresión: $FeO^* = FeO + Fe_2O_3(0.8998)$.

Al graficar los datos en un diagrama de K₂O vs SiO₂ (Le Maitre, 2002) (Fig. 4.24) se puede notar que todas las rocas de La Primavera (pre-caldera, sin-caldera y post-caldera) son de alto-K. Las muestras de este trabajo (unidades post-caldera) tienen una composición similar de K₂O (~ 4.75 wt.%), a excepción de LP16-02VM, ya que presenta una cantidad menor en este óxido (~ 4.5 wt.%) (Fig. 4.24).

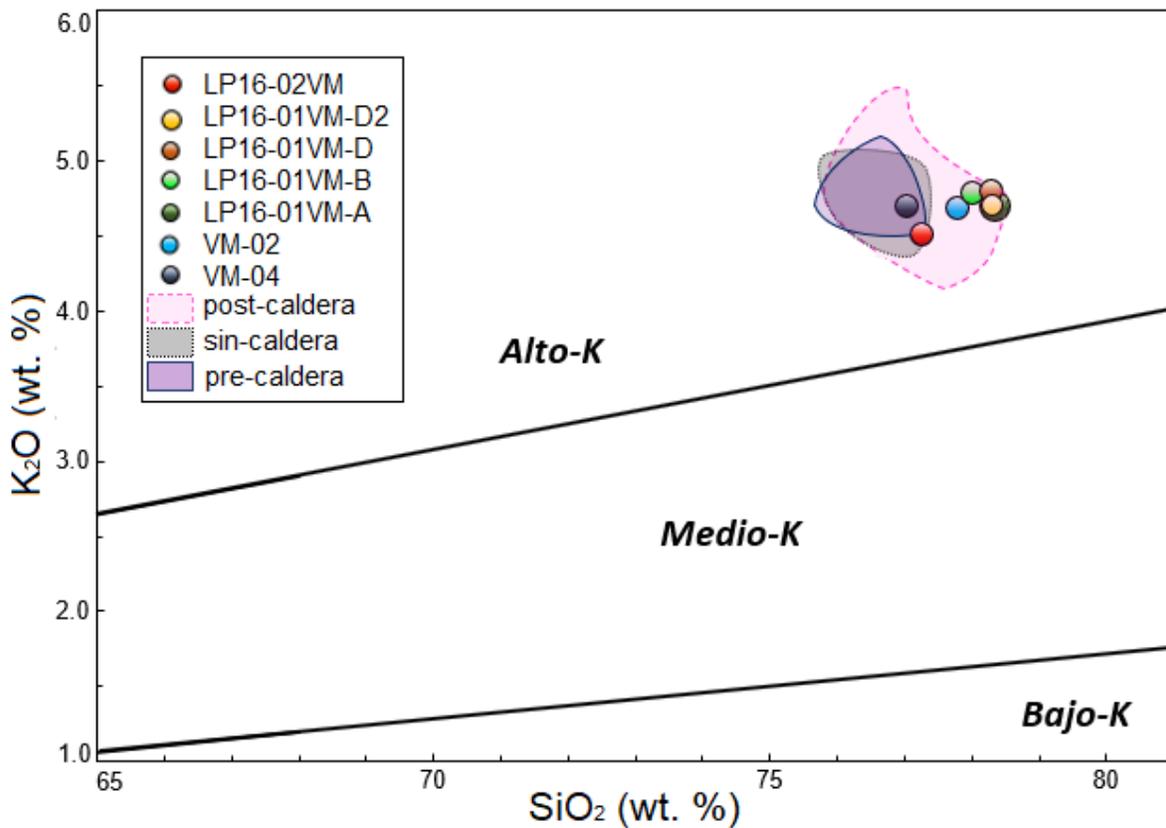


Fig. 4.24. Diagrama K₂O vs. SiO₂ (Le Maitre et al., 1989) con división entre los campos de bajo-K, medio-K y alto-K. Los círculos de colores corresponden a las muestras de pómez colectadas para este trabajo.

Elementos traza

Un elemento traza es aquel que está presente en partes por millón (ppm) o billón (ppb) en un sistema, y no es constituyente estequiométrico de las fases presentes del sistema. Los elementos traza son uno de los discriminadores geoquímicos de mayor uso debido a que sus concentraciones son más susceptibles a procesos magmáticos que los elementos mayores no son capaces de registrar. En muchos trabajos sobre petrogénesis, los elementos traza proporcionan información geoquímica única, útil para poder vislumbrar diferentes procesos de evolución magmática (cristalización fraccionada, fusión parcial, mezcla de magmas) que pudieron dar origen a los distintos tipos de magmas. En este caso nos pueden ayudar a entender la evolución del magma que generó las unidades post-caldera de la Sierra de La Primavera. Los resultados correspondientes a los elementos traza de las pómez estudiadas en este trabajo, se pueden ver en la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Composición de elementos traza de las unidades post-caldera. Los valores están dados en partes por millón (ppm).

Muestra	Cs	Rb	Ba	Th	U	Nb	Ta	La	Ce	Pb	Pr	Sr	Nd
VM-04	2.5	127	16	16.4	5.4	36.3	3.07	78.4	160	9	16.9	2	59.6
VM-02	2.8	126	12	16.7	5.39	36.3	3.2	79.4	158	9	17.2	2	60.3
LP16-01VM-A	2.5	129	30	15.6	5.22	37.7	3.07	77	157	9	16.6	7	59.7
LP16-01VM-B	2.6	127	40	15.7	5.29	36	3.14	80.4	162	10	17.2	10	61.3
LP16-01VM-D	2.7	133	25	16.6	5.56	37.8	3.18	81.7	167	10	18.1	4	62.2
LP16-01VM-D2	2.5	126	28	15.9	5.2	37.7	3	77.1	158	10	16.9	6	59.8
LP16-02VM	3.1	149	7	16.2	6.45	37.9	3.53	34.8	78.2	14	8.92	2	33.8
Muestra	Zr	Hf	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Y	Lu	
VM-04	536	11.3	11.2	0.13	9.68	1.57	9.23	1.8	5.28	5.49	51.9	0.871	
VM-02	533	11.6	11.2	0.13	9.31	1.56	9.03	1.79	5.17	5.31	50.8	0.829	
LP16-01VM-A	513	10.9	11.2	0.15	9.37	1.52	9.01	1.77	5.17	5.38	53.4	0.858	
LP16-01VM-B	534	11.2	11.7	0.18	9.68	1.53	9.39	1.82	5.36	5.69	52.1	0.866	
LP16-01VM-D	519	11.3	11.9	0.14	10.2	1.62	9.63	1.89	5.7	5.79	54.5	0.935	
LP16-01VM-D2	529	11.1	11.1	0.13	9.37	1.5	9.22	1.75	5.23	5.35	52	0.862	
LP16-02VM	297	8.8	8.5	0.07	8.33	1.48	9.49	1.87	5.51	5.74	56.6	0.887	

Al igual que para los elementos mayores, los resultados de elementos traza de este trabajo son comparados con los de Mahood (1977, 1981a y 1981b), Cruz-Lara (2015), Gómez-Álvarez (2015), Miguel-Cruz (2016) Tinoco-Murrillo (2017), Ávila-Ortiz (2018) y Sourisseau (*en proceso*).

Concentraciones de algunos elementos traza de interés, son graficados en diagramas de variación de elementos traza contra sílice; para elementos traza que pertenecen a los grupos HSFE (*high field strenght elements*) y LILE (*Large ion lithophile elements*) se muestran en la Fig. 4.25 y para elementos que pertenecen al grupo de elementos de tierras raras (*Rare Earth elements*, REE) se muestran en la Fig. 4.26.

Los valores de Zr para las muestras de este trabajo se encuentra entre 513 y 536 ppm, a excepción de la muestra LP16-02VM, ya que tiene una concentración de 297 ppm. También se puede ver que las rocas correspondientes al suite post-caldera tiene una variación más amplia que las rocas de los eventos pre y sin-caldera. Para Nb y Rb se puede apreciar que las unidades post-caldera tiene las concentraciones más bajas, mientras que las concentraciones de la Toba Tala (sin-caldera) son las más altas. En el caso de las rocas de este trabajo, las concentraciones en Nb van de 36 a 37.9 ppm, y en concentraciones de Rb hay una variación que va de 126 a 149 ppm, teniendo LP16-02VM la concentración más alta (Fig. 4.25).

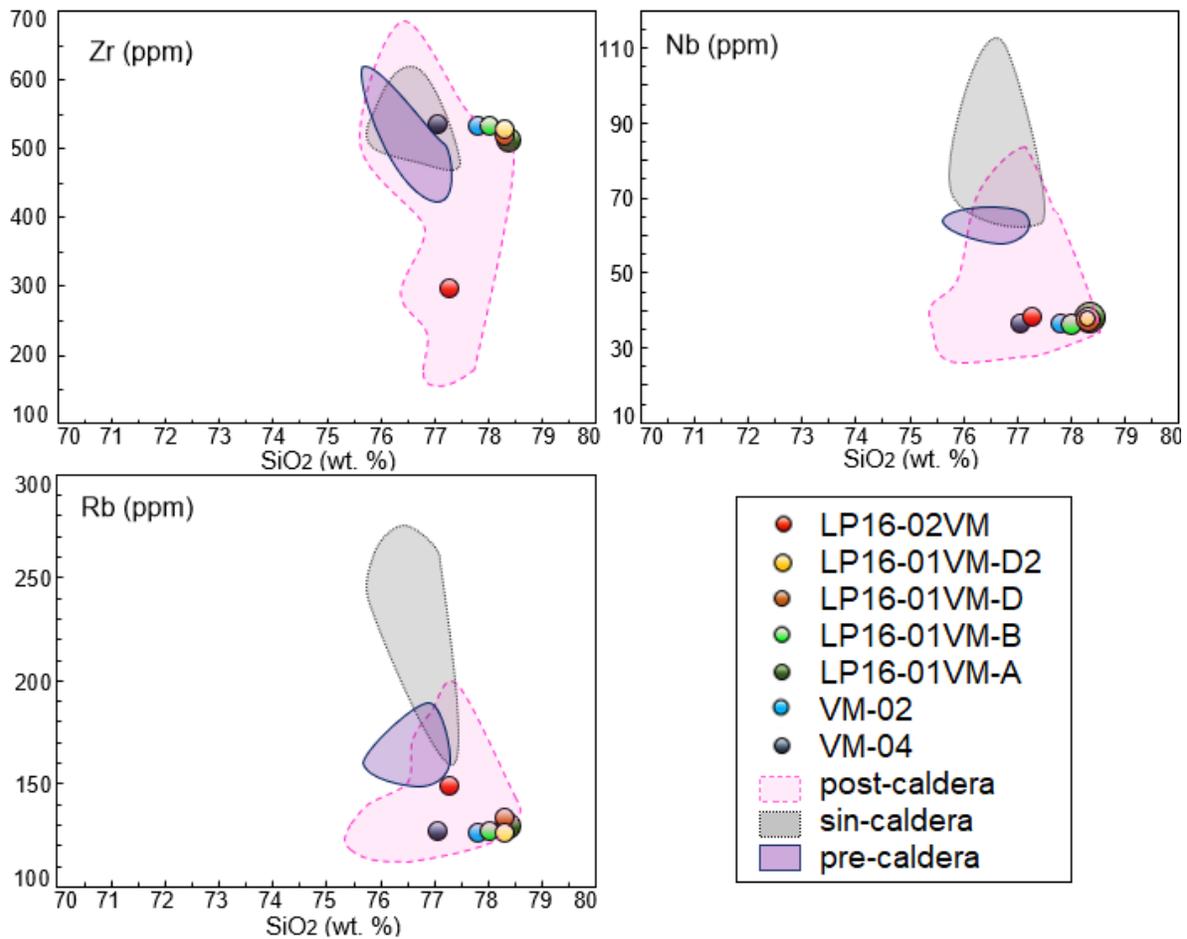


Fig. 4.25. Diagramas de variación de elementos traza vs sílice para HSFE (Zr y Nb) y LILE (Rb). Los círculos de colores corresponden a las muestras de pómez colectadas para este trabajo, y los datos con los que se construyeron las áreas (pre-caldera, sin-caldera y post-caldera) son de Mahood (1977, 1981a y 1981b), Cruz-Lara (2015), Gómez-Álvarez (2015), Miguel-Cruz (2016), Tinoco-Murrillo (2017), Ávila-Ortiz (2018) y Sourisseau (en proceso).

En el caso de La, Ce, Nd, Sm y Eu (LREE), los datos de las muestras de este trabajo varían poco entre ellas a excepción de la muestra LP16-02VM, ya que presenta concentraciones menores a las demás. Las concentraciones de La están entre 34.8 a 81.7 ppm, Ce entre 78.2 a 167 ppm, Nd entre 33.8 a 62.2 ppm, Sm entre 8.5 a 11.9 ppm y Eu entre 0.069 a 0.177 ppm, para este último elemento la muestra LP16-01VM-B tiene las concentraciones más altas (Fig. 4.26). En general se puede observar en estos elementos traza (LREE) que todas las muestras post-caldera de La Primavera tienen una variación más amplia que las rocas pre-caldera y sin-caldera. Para elementos como La , Ce, Nd y Eu las rocas pre-caldera y sin-caldera tienen concentraciones similares, para Sm los valores de las rocas sin-caldera son mayores a los valores de las rocas pre-caldera (Fig. 4.26).

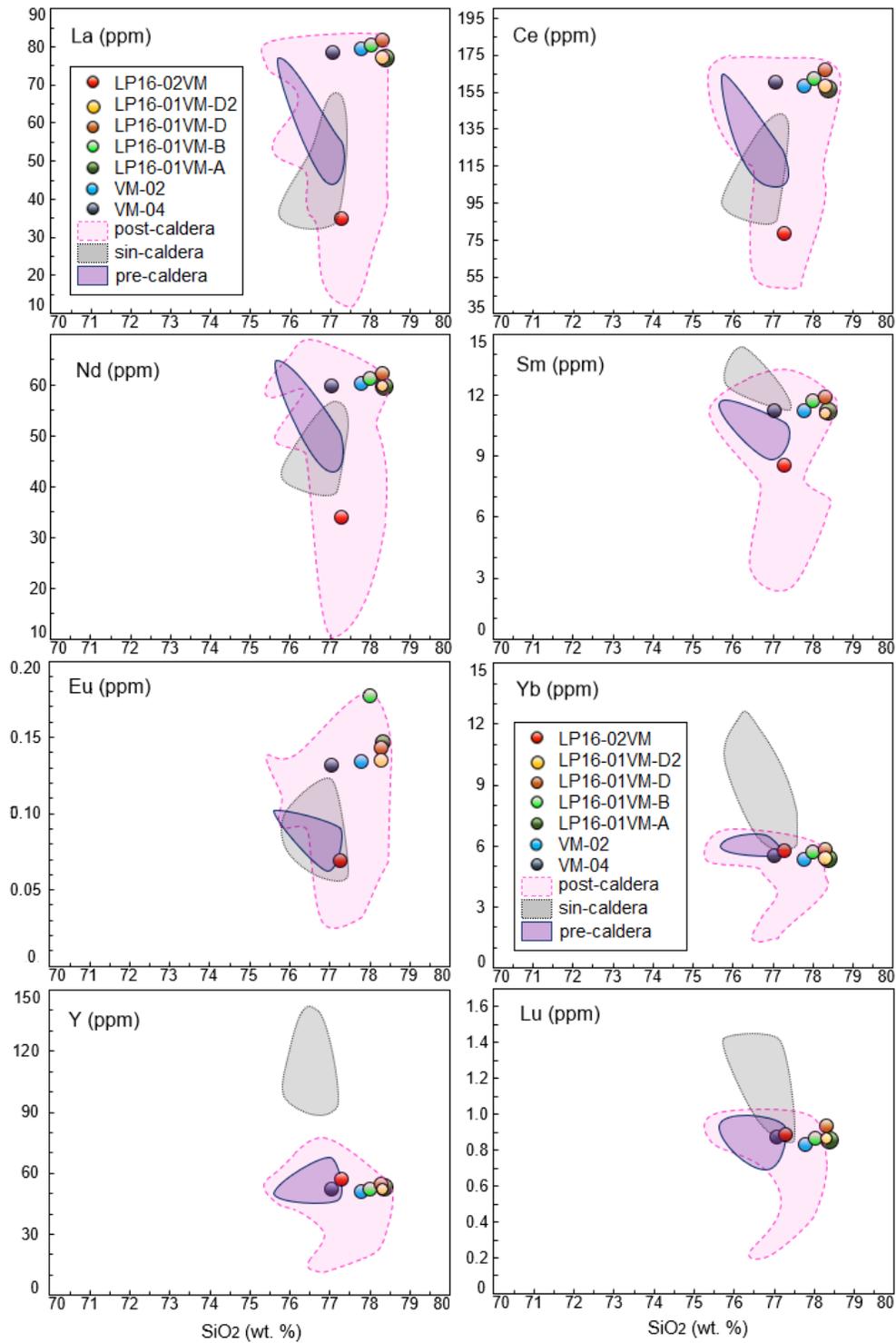


Fig. 4.26. Diagramas de variación de elementos traza vs sílice para LREE (La, Ce, Nd, Sm y Eu) y HREE (Yb, Y y Lu). Los círculos de colores corresponden a las muestras de pómez colectadas para este trabajo, y los datos con los que se construyeron las áreas (pre-caldera, sin-caldera y post-caldera) son de Mahood (1977, 1981a y 1981b), Cruz-Lara (2015), Gómez-Álvarez (2015), Miguel-Cruz (2016), Tinoco-Murrillo (2017), Ávila-Ortiz (2018) y Sourisseau (en proceso).

Para el caso de elementos como Yb, Y y Lu (HREE), las concentraciones en las muestras analizadas presentan una variación mínima entre ellas (Fig. 4.26), pues los valores en Yb varían entre 5.31 a 5.79 ppm, en Y de 50.8 a 56.6 ppm, y en Lu de 0.829 a 0.935 ppm. También se puede ver que para las HREE las concentraciones en las rocas sin-caldera son las más altas, las concentraciones más bajas se presentan en las rocas de eventos post-caldera (y con mayor variación). En general podemos ver que en los elementos de las tierras raras (REE) existe una tendencia negativa al aumentar el SiO₂ en las rocas de La Primavera (Fig. 4.26).

La Fig. 4.27 muestra un diagrama multielementos para las rocas de La Primavera, normalizadas con respecto a N-MORB (Sun y McDonough, 1989). Las tendencias de los datos “pre-caldera” y “sin-caldera” son muy similares, sin embargo, para los elementos más incompatibles (Cs-Ta) y menos incompatibles (Gd-Lu)(Tabla 4.5), los eventos “sin-caldera” están más enriquecidos con respecto a los datos de las lavas “pre-caldera”. Por otro lado, las rocas de los eventos “post-caldera” son las que tienen mayor variación composicional, particularmente en elementos como Ba, Pb, Sr, Eu y Ti.

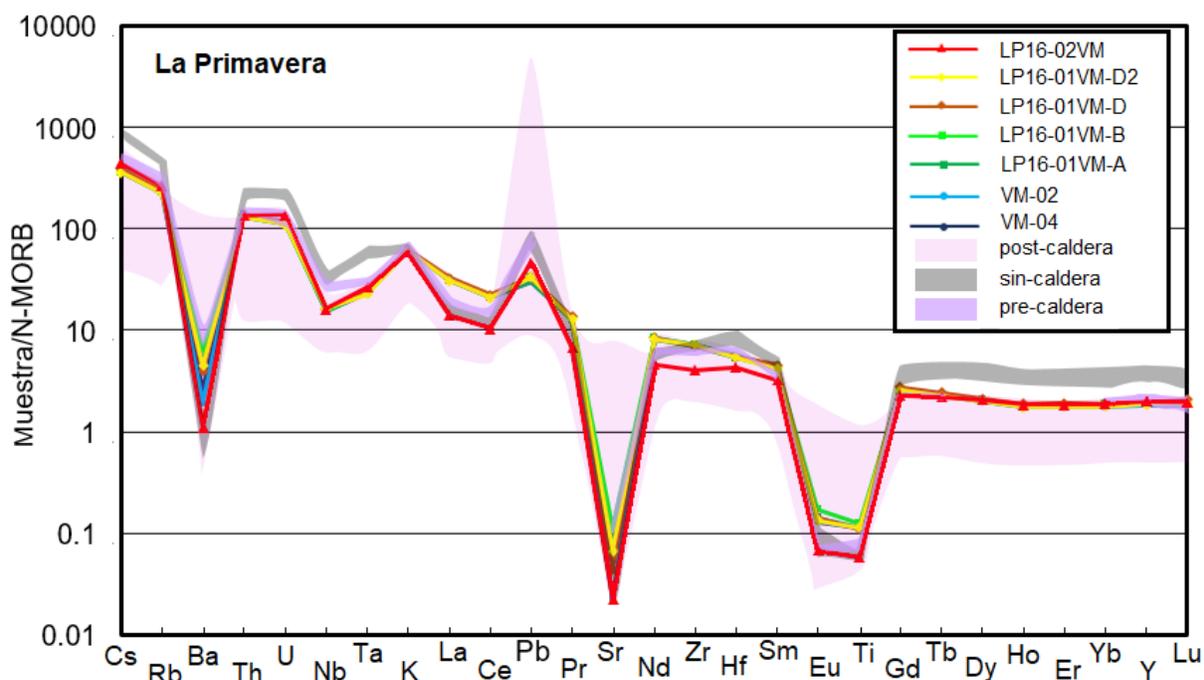


Fig. 4.27. Diagrama spider, normalizado con respecto a NMORB (Sun & McDonough, 1989). Las líneas de colores representan la composición de las muestras de pómez analizadas en esta tesis. Áreas de colores: datos de Mahood (1977, 1981a y 1981b); Cruz-Lara (2015); Gómez-Álvarez (2015); Miguel-Cruz (2016); Tinoco-Murrillo (2017); Ávila-Ortiz (2018); Sourisseau (en proceso). Se pueden observar anomalías negativas en Ba, Sr, Eu y Ti.

La suite de muestras de este estudio tiene muy buena correlación con la composición de rocas asociadas a eventos post-caldera (Fig. 4.27), aunque al comparar dichos datos con los de Toba Tala (sin-caldera), se puede ver un enriquecimiento menor en la mayoría de los elementos traza.

Siguiendo un análisis conforme a la estratigrafía (de lo más viejo a lo más reciente), las muestras correspondientes al horizonte de pómez gigante (VM-04 y VM-02) presentan una tendencia muy similar en el diagrama de la Fig. 4.27, y tienen buena correlación en general con las muestras de la sección LP16-01VM por encima de dicho horizonte. Con respecto al Ba, las muestras de Pómez Gigante (VM-04 y VM-02) varían de 16-12 ppm; mientras que las muestras de la sección LP16-01VM presentan un enriquecimiento con concentraciones de Ba de 25-40 ppm. Por otra parte, análisis de muestras colectadas en la sección LP16-02VM, revelan una variación con respecto a las anteriores, con concentraciones de Ba más bajas de hasta 7 ppm. Los análisis de las últimas caídas piroclásticas de la sección LP16-02VM, presentan un empobrecimiento en La, Ce, Pr, Sr, Nd, Zr, Hf, Sm, Eu y Ti, pero un ligero enriquecimiento de Pb (Tabla 4.5 y Fig. 4.27). Como casi todos los datos de La Primavera hay anomalías negativas de Sr, Eu, Ti y Ba.

En general se puede observar que para todas las rocas de La Primavera, incluyendo las muestras de este trabajo, presentan anomalías negativas en Ba, Sr, Eu y Ti. También, algunas anomalías positivas que se pueden distinguir en todas las rocas de La Primavera son en K y Pb pero no están muy bien desarrolladas (Fig. 4.27)

En los patrones de tierras raras (REE) (Fig. 4.28), observa que todas las muestras de La Primavera tienen un comportamiento similar. Y al igual que en el diagrama multielementos de la Fig. 4.27, las unidades post-caldera tienen los datos que varían más, y los que menos varían son los valores de la suite pre-caldera. En los elementos más incompatibles (La-Sm) se puede ver el empobrecimiento de muestras de la sección LP16-VM02 con respecto a las demás. En cuanto a los elementos menos incompatibles todas las muestras presentan una composición muy similar.

En forma general los patrones de REE (Fig. 4.28) muestran una anomalía negativa muy marcada de Eu. Estratigráficamente el HPG empieza con un contenido de 13ppm (VM-04 y VM-02), similar a su antecesor (Toba Tala), seguido de un leve enriquecimiento en el paquete de flujos piroclásticos de la sección LP16-01VM, que alcanza el contenido de 18 ppm en LP16-01VM-B y al final decrece a 7 ppm en LP16-02VM (Fig. 4.28).

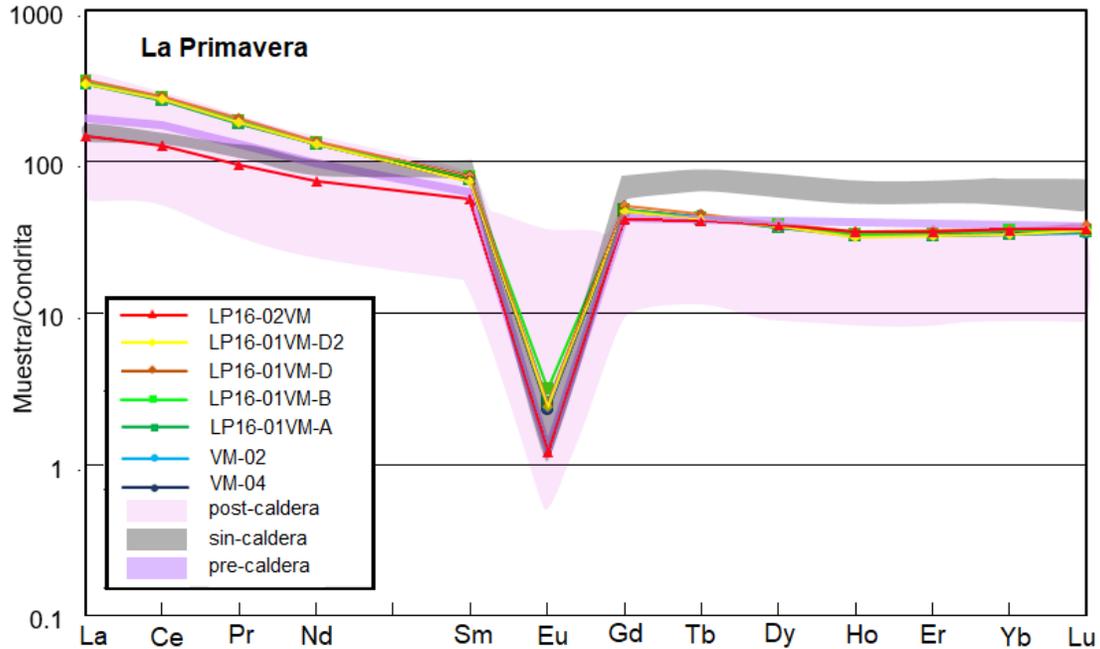


Fig. 4.28. Patrones de REE (Rare Earth Elements) normalizados con respecto a condrita (McDonough & Sun, 1995). Se nota el enriquecimiento de Toba Tala (sin caldera) en los menos incompatibles, y la notable anomalía de Eu en casi todas las muestras de La Primavera. Las líneas de colores representan muestras analizadas en esta tesis. Áreas de colores: datos de Mahood (1977, 1981a y 1981b); Cruz-Lara (2015); Gómez-Álvarez (2015); Miguel-Cruz (2016); Tinoco-Murrillo (2017); Ávila-Ortiz (2018); Sourisseau (en proceso)

Geoquímica de inclusiones de fundido

Condiciones analíticas

El análisis de óxidos mayores de las inclusiones de fundido se realizó con una microsonda electrónica marca JOEL JXA-8230 en el Instituto de Geofísica Unidad Michoacán de la UNAM (Fig. 4.29).

Se recubrieron las muestras con una capa de grafito de aproximadamente 250 Å de espesor que sirve como material conductor.

Para todos los análisis se utilizó un voltaje de aceleración de 15 kV, 10 nA para la corriente del rayo, y un diámetro de haz de 10 µm. La calibración de sensibilidad analítica se realizó usando los siguientes estándares: Ti (rutilo), Ca (obsidiana), Fe (KE-12), Mn (granate-espesartina), K (obsidiana), Na (albita), Si (KE-12), Al (obsidiana) y Mg (A-99).

Para evitar la pérdida de sodio y el aumento de sílice, se medía primero el sodio por 2 segundos, y después los demás elementos con 10 segundos de análisis para cada uno.

Se analizaron inclusiones de fundido, así como su respectivo cristal huésped. Si el tamaño de la inclusión lo permitía se hacía más de una medición en la inclusión, y en algunos cristales había más de una inclusión expuesta, y también se analizaron éstas.



Fig. 4.29. Microsonda electrónica (EPMA) utilizada para el análisis de óxidos mayores en inclusiones de fundido.

Cristaloquímica de Feldespatos

Se analizaron los feldespatos huéspedes junto con las inclusiones de fundido en la microsonda electrónica. Las composiciones químicas de los cristales de feldespato en forma de porcentaje en peso de óxidos mayores se presentan en la Tabla 4.6.

Los resultados presentan un aproximado del 66 wt.% de SiO₂, y 18.5 wt.% de Al₂O₃, también muestran que hay mayor cantidad de potasio (K₂O con promedio de 7.06 wt.%) que de sodio (Na₂O con promedio de 5.90 wt.%), por lo que son cristales de feldespato potásico, en general se nota muy poca variación en los componentes mayores de estos cristales. Se ha reportado sanidino como el feldespato que se puede encontrar en las unidades porfíricas de La Primavera, y como el mineral más abundante en dicha caldera, siendo el cuarzo el segundo más abundante.

Tabla 4.6. Composición de cristales de sanidino realizados con la Microsonda electrónica.

Muestra	Cristal	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	sum
VM-04	N2-X	66.63	0.06	18.50	0.23	0.03	0.08	0.22	5.97	7.27	98.99
	N3-X	67.06	0.06	18.66	0.24	0.01	0.08	0.21	6.29	6.80	99.40
	N4-X	66.21	0.06	18.19	0.15	0.01	0.08	0.21	5.56	7.34	97.80
	N4-X2	66.06	0.07	18.60	0.26	0.03	0.08	0.24	5.94	7.34	98.63
VM-02	M3-X	66.61	0.06	18.78	0.41	0.02	0.06	0.20	5.91	6.75	98.79
	L2-X	66.69	0.05	18.76	0.37	0.06	0.06	0.20	6.10	6.70	98.98
	L4-X	65.87	0.04	18.50	0.40	0.01	0.08	0.20	6.00	6.99	98.08
LP16-01VM-A	A4-X	66.36	0.04	18.97	0.37	0.01	0.06	0.21	5.48	7.31	98.81
	A3-X	67.25	0.06	18.79	0.41	0.01	0.06	0.20	5.76	6.94	99.47
	A2-X	66.61	0.06	18.60	0.30	0.01	0.06	0.19	5.01	7.01	97.85
	A1-X	66.11	0.04	18.79	0.42	0.08	0.06	0.19	5.21	7.23	98.12
LP16-01VM-B	D1-X	65.79	0.04	18.13	0.33	0.01	0.08	0.18	5.67	6.92	97.14
	C4-X	67.18	0.04	18.87	0.42	0.01	0.06	0.22	6.08	6.87	99.73
	C5-X	67.78	0.04	17.73	0.31	0.03	0.07	0.15	5.81	6.32	98.23
	C2-X	67.07	0.05	18.95	0.38	0.01	0.06	0.23	5.97	6.97	99.68
LP16-01VM-D	E5-X	67.17	0.06	18.70	0.18	0.02	0.08	0.17	5.82	7.42	99.61
	F1-X	65.70	0.09	18.31	0.23	0.01	0.08	0.20	6.03	7.22	97.87
	F2-X	67.65	0.09	18.95	0.27	0.02	0.09	0.20	6.43	6.78	100.47
	F4-X	67.18	0.06	18.95	0.23	0.01	0.08	0.20	6.16	7.22	100.09
LP16-01VM-D2	G2-X	68.08	0.08	19.50	0.25	0.09	0.06	0.19	6.26	7.13	101.63
	G5-X	66.17	0.06	18.42	0.21	0.11	0.06	0.18	6.11	7.25	98.56
	H1-X	66.13	0.06	18.39	0.27	0.03	0.06	0.17	5.94	7.43	98.48
	H2-X	65.97	0.09	19.16	0.19	0.03	0.06	0.18	6.10	7.18	98.96

Composición de Inclusiones de fundido

Los resultados de los análisis con microsonda en las IFu se graficaron en diagramas TAS, y para tener una mejor visión se presentan por separado (Fig. 4.30), y se comparan con los análisis de IFu en Toba Tala (Miguel-Cruz, 2016).

Las inclusiones de fundido de la base del HPG (VM-04), muestran un rango amplio en su contenido de SiO₂, de 75 a 81 wt.%. La cantidad de álcalis varía de 8 a 10 wt.% aproximadamente (Fig. 4.30a). Cabe mencionar que las IFu alojadas en los feldespatos contienen mayor cantidad de SiO₂, y las inclusiones contenidas en cuarzo mayor cantidad de álcalis. Las inclusiones en VM-02 (más cerca de la cima del HPG) varían de 76 a 78 wt.% en SiO₂, y en álcalis de 8 a 9 wt.% (Fig. 4.30a).

Los resultados de las IFu en las muestras del horizonte de flujos piroclásticos LP16-01VM-A (Fig. 4.11 y 4.12) y del horizonte de caídas LP16-01VM-B son muy similares (SiO₂: 76 a 78 %wt; álcalis: 8 a 9 wt.%) (Fig. 4.30b).

Los datos de IFu correspondientes a los flujos piroclásticos LP16-01VM-D y LP16-01VM-D2 (Fig. 4.11 y 4.12) indican un contenido de SiO₂ que va de 75.92 a 80.53 wt.%, y casi 6.5 a 9.5 wt.% en álcalis (Fig. 4.30c). Para los datos del horizonte de caída piroclástica LP16-02VM, la variación en SiO₂ es de 77 a 78.5 wt.%, y en álcalis de 8 a casi 9 wt.% (Fig. 4.30d). En general las inclusiones de fundido muestran una composición química muy similar a la de la pómez huésped.

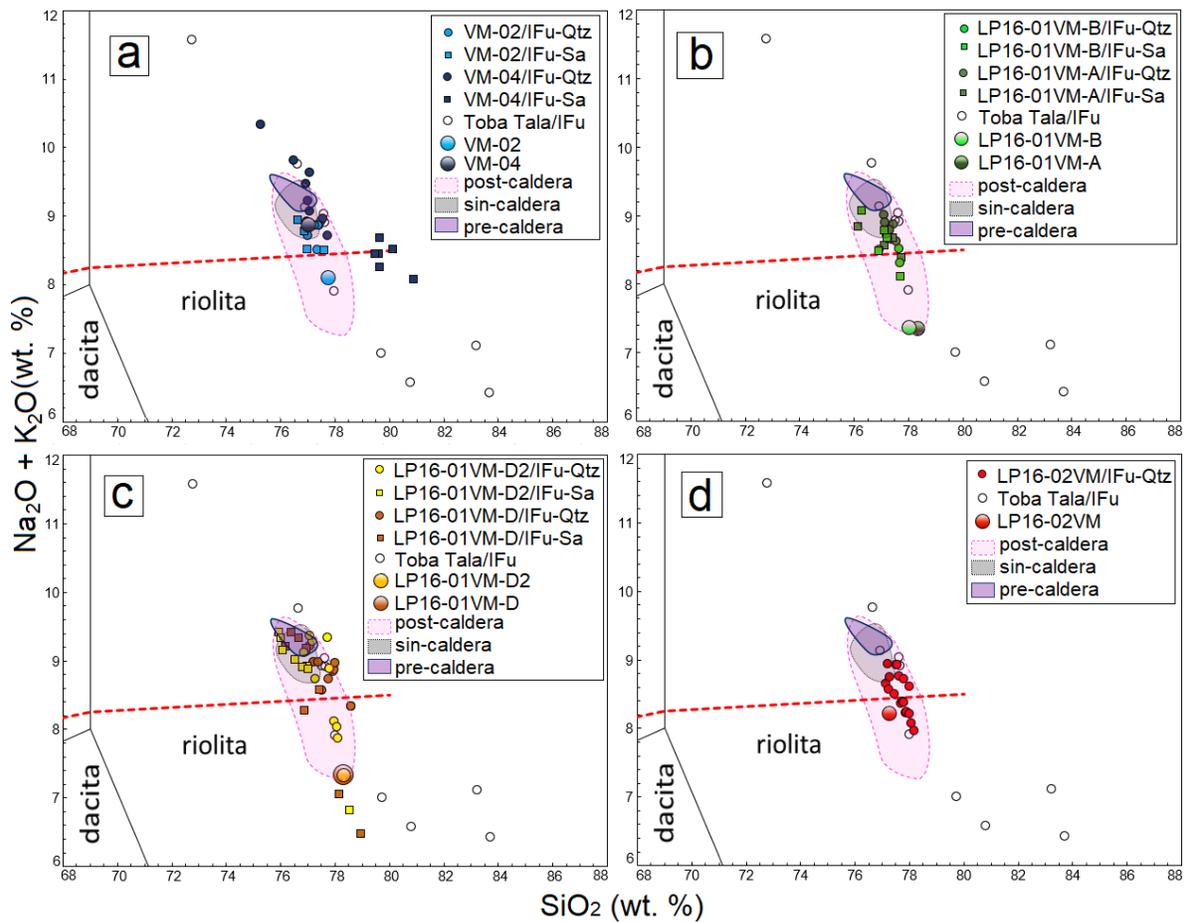


Fig. 4.30. Diagramas TAS de la geoquímica de inclusiones de fundido (círculos y cuadrados pequeños con relleno) y pómez (círculos grandes con relleno) analizadas en esta tesis. a) Pómez Gigante. b) Sección LP16-01VM (horizontes A y B). c) Sección LP16-01VM (horizontes D y D2). d) Sección LP16-02VM. Para efectos de comparación, se incluyen las áreas de colores que representan la geoquímica de roca total de La Primavera (Mahood 1977, 1981a y 1981b; Cruz-Lara, 2015; Gómez-Álvarez, 2015; Miguel-Cruz, 2016; Tinoco-Murrillo, 2017; Ávila-Ortiz, 2018; Sourisseau, en proceso). Se incluyen también datos de IFu de Toba Tala (círculos pequeños sin relleno)(Miguel-Cruz, 2016).

Los análisis de IFu también se graficaron en diagramas A/NK vs A/CNK de Shand (1943) (Fig. 4.31), junto con la geoquímica de sus respectivas rocas huésped y con las áreas pre, sin y post-caldera (construidas a partir de los autores anteriormente mencionados).

La composición de las IFu que pertenecen a rocas del HPG (VM-04 y VM-02) se grafican en el campo peralcalino, y se puede notar que existe una mayor variación para las IFu de VM-04 (base del HPG). También se puede ver la que la composición de la roca huésped (pómez) de las IFu en VM-02 cae en el campo de las rocas peraluminosas (Fig. 4.31a).

En las IFu de LP16-01VM-A y LP16-01VM-B se podría decir que se encuentran en la transición entre los campos peralcalinos y peraluminosos, la mayoría quedan del lado del campo peralcalino y algunas pocas ya se encuentran en el campo peraluminoso, pero las dos rocas huésped (LP16-01VM-A y LP16-01VM-B) caen del lado de rocas peraluminosas (Fig. 4.31b).

Para las IFu en LP16-01VM-D y LP16-01VM-D2 también se podría decir que está en la parte transicional de los campos peralcalino y peraluminoso, pero a diferencia de las dos muestras anteriores (LP16-01VM-A y LP16-01VM-B) estas muestran una variación más amplia en el campo peraluminoso, las rocas LP16-01VM-D y LP16-01VM-D2 también se grafican del lado de rocas peraluminosas (Fig. 4.31c). Para la muestra LP16-02VM (estratigráficamente superior), se observa que la mitad de sus IFu caen en el campo de rocas peralcalinas y la otra mitad cae en rocas peraluminosas, su roca encajonante también cae en el campo peraluminoso (Fig. 4.31d).

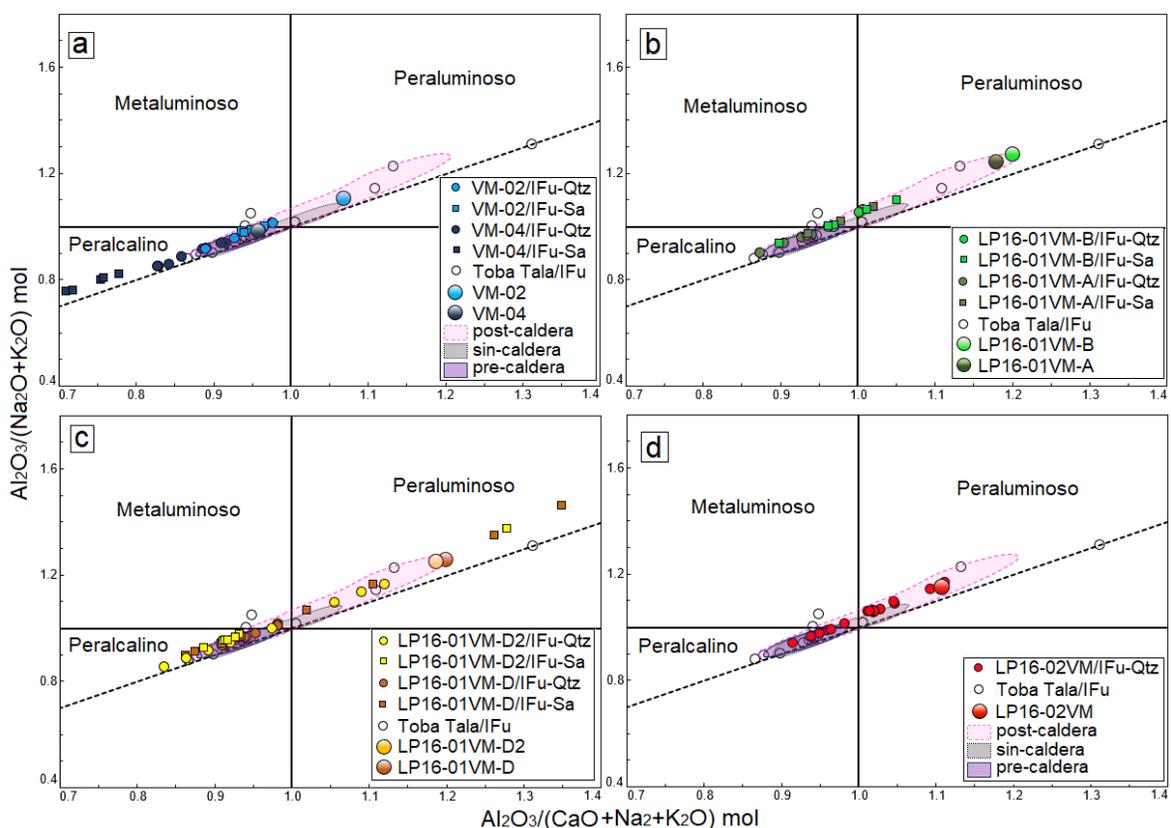


Fig. 4.31. Diagramas $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O+CaO)$ vs. $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$ (Shand, 1943). a) Pómez Gigante. b) Sección LP16-01VM (horizontes A y B). c) Sección LP16-01VM (horizontes D y D2). d) Sección LP16-02VM. Se comparan las inclusiones de fundido (círculos y cuadrados pequeños con relleno) y pómez (círculos grandes con relleno) analizadas en esta tesis, con la geoquímica publicada de La Primavera (áreas de color)(Mahood 1977, 1981a y 1981b; Cruz-Lara, 2015; Gómez-Álvarez, 2015; Miguel-Cruz, 2016; Tinoco-Murrillo, 2017; Ávila-Ortiz, 2018; Sourisseau, en proceso), y con la geoquímica de las IFu de Toba Tala (círculos pequeños sin relleno) (Miguel-Cruz, 2016).

También, las IFu se graficaron en diagramas de rocas hipercalinas con su respectiva roca huésped (Fig. 4.32). Al igual que para todas las rocas huésped, las IFu también se clasifican como riolitas comendíticas (solamente la roca huésped de VM-04 es peralcalina). Se observa que para las IFu de VM-04 se separan (agrupan) las inclusiones en feldespato de las IFu alojadas en cuarzo, lo cual no sucede con las IFu de VM-02 (ambas muestras pertenecen al HPG) (Fig. 4.32a).

Las IFu de LP16-01VM-A y LP16-01VM-B se concentran en un rango de FeO* que varía de 1.74 a 2.4 wt.% (Fig. 4.32b). Para las IFu de LP16-01VM-D y LP16-01VM-D2 se agrupan dentro de una variación de FeO* (1.39-2.38wt. %) con menores cantidades a las anteriores (LP16-01VM-A y LP16-01VM-B) (Fig. 4.32c). En las IFu de LP16-02VM se nota un menor contenido de FeO* (1.28-1.58 wt.%) que las IFu de las muestras anteriores (Fig. 4.32d).

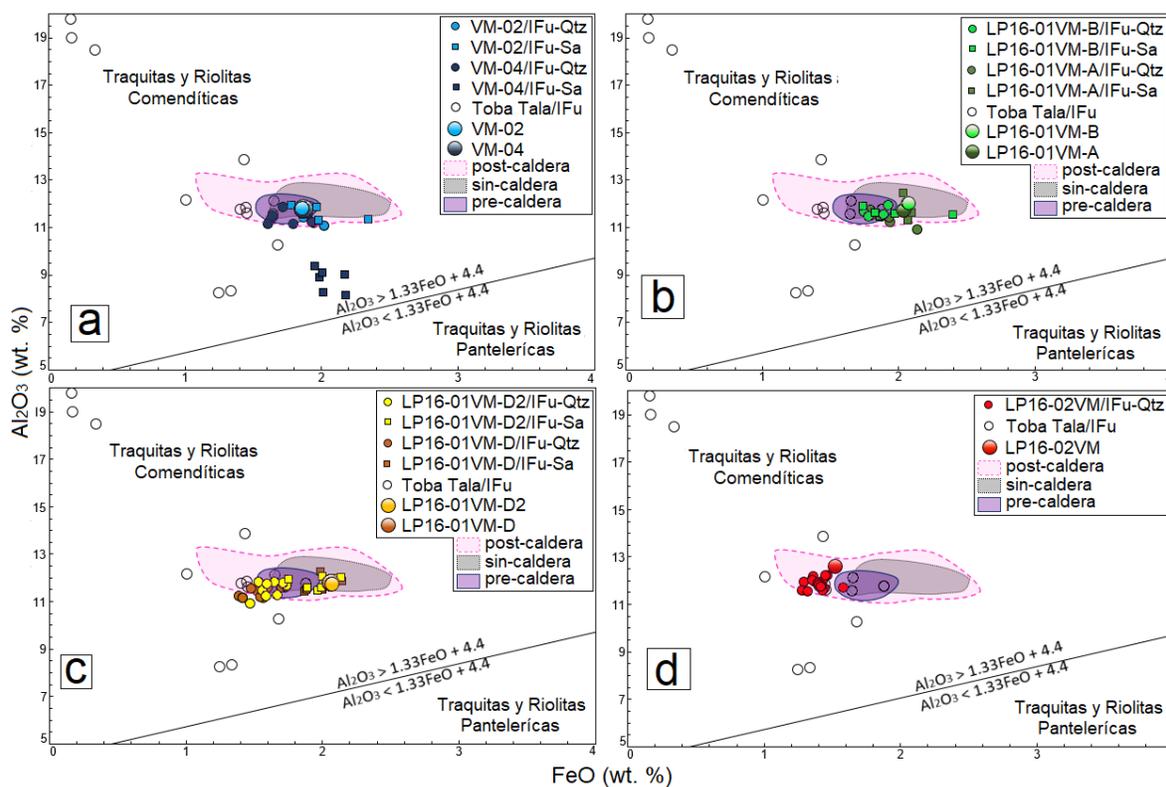


Fig. 4.32. Diagramas para clasificación de traquitas y riolitas en rocas comendíticas y pantelleríticas (Macdonald, 1974). a) Pómez Gigante. b) Sección LP16-01VM (horizontes A y B). c) Sección LP16-01VM (horizontes D y D2). d) Sección LP16-02VM. El hierro total se calculó con la expresión: $FeO^* = FeO + Fe_2O_3(0.8998)$. Se comparan las inclusiones de fundido (círculos y cuadrados pequeños con relleno) y pómez (círculos grandes con relleno) analizadas en esta tesis, con la geoquímica publicada de La Primavera (áreas de color)(Mahood 1977, 1981a y 1981b; Cruz-Lara, 2015; Gómez-Álvarez, 2015; Miguel-Cruz, 2016; Tinoco-Murrillo, 2017; Ávila-Ortiz, 2018; Sourisseau, en proceso), y con la geoquímica de las IFu de Toba Tala (círculos pequeños sin relleno) (Miguel-Cruz, 2016).

Se graficaron los resultados de los análisis de IFu en diagramas binarios (Fig. 4.33), en donde se muestra su contenido en forma de porcentaje en peso de óxidos mayores vs. sílice. En estas graficas también se compararon los resultados con los datos de los autores ya mencionados.

Para VM-04 (base de HPG), se puede ver claramente y reafirmar, que las IFu alojadas en cuarzo y feldespato son diferentes en sus contenidos, pues se agrupan y se distinguen, lo cual no sucede en los datos de las otras muestras de este estudio. Su contenido de sílice va de 75.32 a 80.93 wt.%. El contenido de Al_2O_3 va de 8.12 a 11.91 wt.%, los valores más altos corresponden a inclusiones en cuarzos. En FeO^* su contenido varía de 1.61 a 2.18 wt.%, con un promedio aproximado de 1.86 wt.%, aquí las IFu en feldespato son las de mayor contenido. Para CaO varían de 0.21 a 0.54 wt.% y en TiO_2 de 0.11 a 0.28 wt.%, para ambos casos las IFu en feldespatos muestran mayor contenido. El contenido en K_2O y Na_2O va de 4.24 a 5.32 wt.% y de 3.74 a 5.01 wt.% respectivamente, para los dos casos las IFu en cuarzo son las más enriquecidas. En MnO y MgO las inclusiones de cuarzos y feldespatos no parecen tener una distinción en sus contenidos, en MnO tenemos un promedio aproximado de 0.06 wt.%, y para MgO varía el rango de 0.06 a 0.12 wt.%. También se puede ver de forma general, que las inclusiones en cuarzos de VM-04, se asemejan más a la composición de su roca total, que las IFu en feldespato.

Al graficar las IFu de las muestras del HPG de VM-02 (parte superior de HPG), se puede observar que tienen un rango de variación menor en el contenido de sus óxidos mayores, con respecto a las IFu de VM-04 (Fig. 4.33). El contenido en sílice va de 76.66-77.64 wt.%, y un promedio de 77.17 wt.%. Se llega a notar que las IFu en cuarzo tienen ligeramente mayor cantidad de SiO_2 . Para su contenido de Al_2O_3 en estas inclusiones de fundido el promedio es muy cercano a 11.54 wt.%, muy parecido al contenido de las IFu en cuarzo de VM-04. El FeO^* en VM-02 tiene un promedio aproximado de 1.97 wt.%, que es ligeramente mayor al contenido promedio de las IFu en cuarzo de VM-04, pero menor al contenido de las IFu en feldespato. Para el CaO es de aproximadamente 0.31 wt.%, y 0.16 wt.% en TiO_2 . Para el contenido de K_2O se observa un promedio de alrededor de 4.56 wt.%, y para el contenido de Na_2O_3 su rango varía de 3.99 a 4.40 wt.%, en este caso las IFu tanto en cuarzo y feldespato, están más enriquecidas en sodio que la pómez a las que pertenecen. En MnO se ve una variación en su contenido que va de 0.01 a 0.15wt.%, muy similares a las IFu en cuarzo de VM-04. El MgO en VM-02 tiene un contenido promedio de aproximadamente 0.07 wt.%, menor contenido con respecto a VM-04.

Al ver los datos graficados de la geoquímica de roca total para el HPG (VM-04 y VM-02), se observa que son muy parecidos en sus contenidos con sus inclusiones, en los casos para el aluminio, calcio y sodio se ven mejor las diferencias, pero en el óxido de magnesio se ven más enriquecidas las inclusiones que la roca total, para ambas muestras (Fig. 4.33).

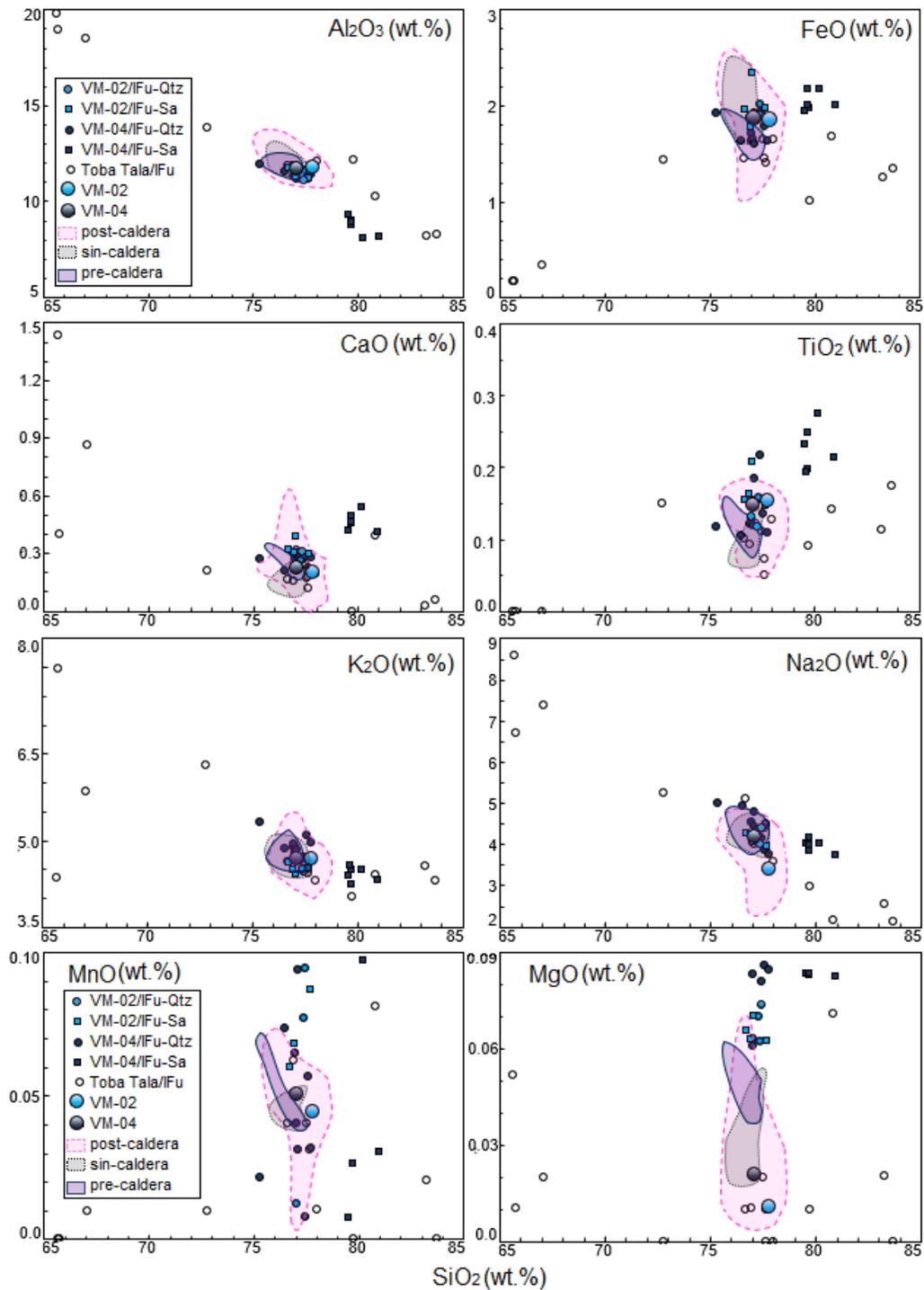


Fig. 4.33. Diagramas Harker para VM-04 y VM-02 (Pómez gigante). Se comparan las inclusiones de fundido (círculos y cuadrados pequeños con relleno) y pómez (círculos grandes con relleno) analizadas en esta tesis, con la geoquímica publicada de La Primavera (áreas de color) (Mahood 1977, 1981a y 1981b; Cruz-Lara, 2015; Gómez-Álvarez, 2015; Miguel-Cruz, 2016; Tinoco-Murrillo, 2017; Ávila-Ortiz, 2018; Sourisseau, en proceso), y con la geoquímica de las IFu de Toba Tala (círculos pequeños sin relleno) (Miguel-Cruz, 2016).

Para analizar los datos de las IFu de las muestras de la sección LP16-01VM (sobreyaciendo al HPG), los resultados se graficaron de dos en dos por separado en diagramas binarios (Fig. 4.34 y 4.35).

En las inclusiones de fundido del pequeño horizonte de flujos piroclásticas de pómez (LP16-01VM-A), se muestra un contenido muy similar de SiO₂ en sus IFu en cuarzo y feldespato (promedio de 77.17 wt.%). El contenido de Al₂O₃ en las IFu tiene un promedio aproximado de 11.51 wt%, al igual que varias IFu en Toba Tala. En FeO* hay una variación de 1.79 a 2.13 wt.%. Para el CaO hay un contenido promedio de 0.30 wt.%, similar a las IFu en VM-02 y a las IFu en cuarzo de VM-04, y mayor a la mayoría de las IFu en Toba Tala. En el contenido de TiO₂ para las IFu en LP16-01VM-A, los valores más bajos llegan a 0.14 wt.%, y los más altos a 0.19 wt.%, aunque la gran mayoría se puede encontrar entre 0.12 a 0.19 wt.%. El contenido de K₂O es variable, pues el valor mínimo es de 4.41 wt.%, y el valor más alto es de 5.33 wt.% aproximadamente. Para Na₂O se observa que las IFu tienen un promedio aproximado de 4.03 wt.%, hay un dato que supera el 6 wt.% en este componente. En MnO y MgO las IFu presentan concentraciones bajas, sus contenidos en promedio aproximadamente son de 0.05 y 0.07 wt.% respectivamente (Fig. 4.34).

El pequeño horizonte de caídas piroclásticas (LP16-01VM-B), muestra que las IFu tienen menor rango de variación en sus contenidos de óxidos mayores y sobre todo de sílice, que las IFu que las presiden (LP16-01VM-A) (Fig. 4.34). Además, las IFu en cuarzo y feldespato varían muy poco entre ellas, prácticamente tienen la misma cantidad de sílice (promedio de 77.19 wt.%). En las IFu de LP16-01VM-B, el Al₂O₃ tiene un promedio aproximado de 11.69 wt%. Los contenidos de FeO en estas inclusiones van alrededor de 1.93 wt.%. Para el CaO el promedio aproximado es de 0.31 wt.%, igual al de las IFu de LP16.01VM-A y en las IFu del HPG (VM-04 y VM-02). En el caso del TiO₂ las cantidades en las inclusiones van de 0.12 a 0.24 wt.%. El K₂O tiene una variación de 4.49 a 5.19 wt.%. Para el contenido de Na₂O en las IFu, se observa una variación que va de 3.5 a 4.44 wt.% aproximadamente. En el contenido de MnO y MgO para las inclusiones de LP16-01VM-B, es prácticamente el mismo contenido promedio que en las IFu de las muestras anteriores (0.08 y 0.07 wt.% respectivamente) (Fig. 4.34).

De manera general se nota que hay una leve variación entre los contenidos de óxidos mayores de las IFu de LP16-01VM-A y LP16-01VM-B, y como ya se mencionó, las IFu que menos se parecen, son las contenidas en feldespatos de LP16-01VM-A. La geoquímica de roca total para estas muestras presenta ligeramente una mayor cantidad de sílice, pero menor cantidad en Na₂O y MgO, para ambos casos.

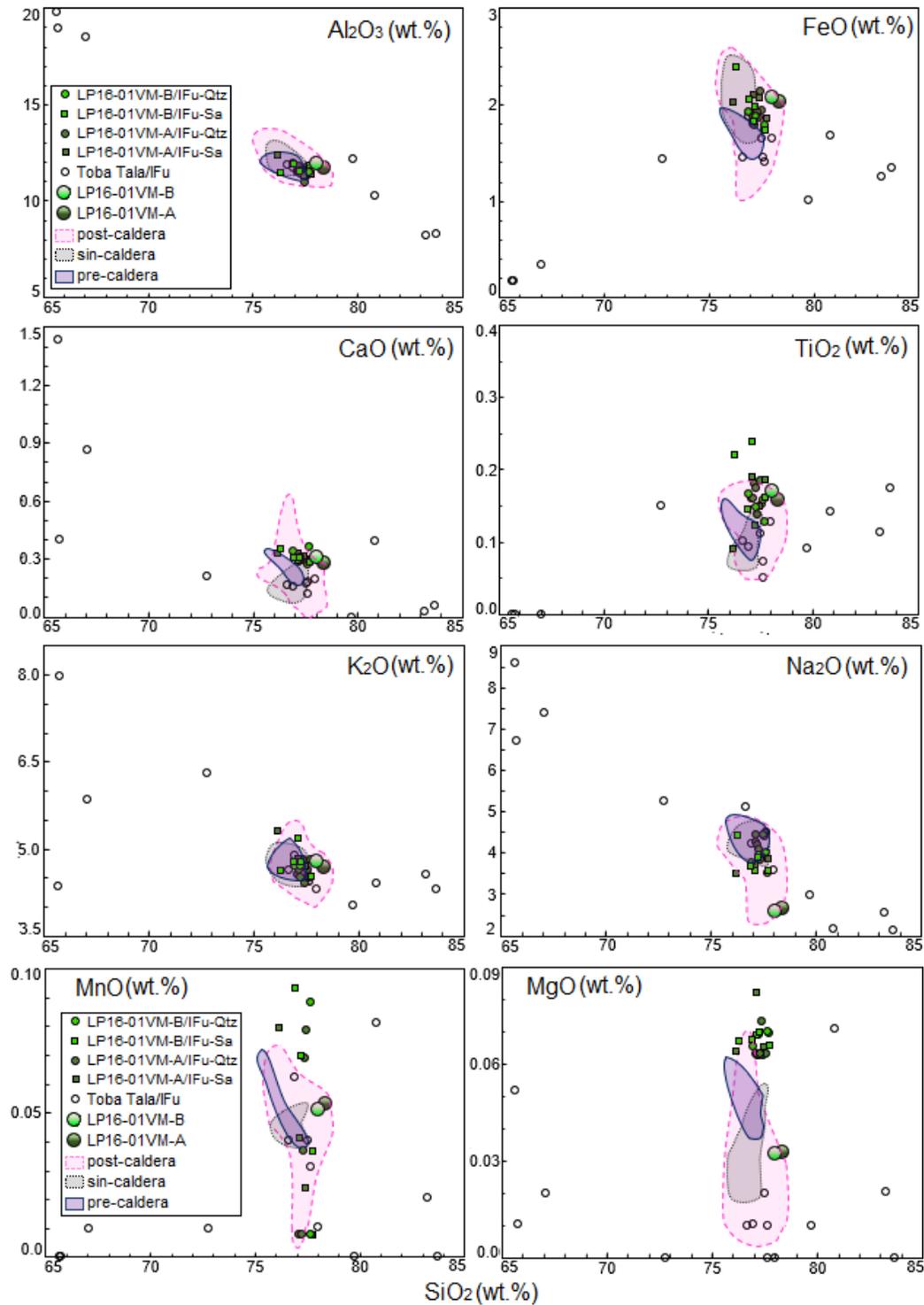


Fig. 4.34. Diagramas Harker para la sección LP16-01VM, horizontes A y B. Se comparan las inclusiones de fundido (círculos y cuadrados pequeños con relleno) y pómez (círculos grandes con relleno) analizadas en esta tesis, con la geoquímica publicada de La Primavera (áreas de color)(Mahood 1977, 1981a y 1981b; Cruz-Lara, 2015; Gómez-Álvarez, 2015; Miguel-Cruz, 2016; Tinoco-Murrillo, 2017; Ávila-Ortiz, 2018; Sourisseau, en proceso), y con la geoquímica de las IFu de Toba Tala (círculos pequeños sin relleno) (Miguel-Cruz, 2016).

Para las muestras “LP16-01VM-D” y “LP16-01VM-D2”, correspondientes a un horizonte de flujos de considerable espesor (1.5 m), se grafican con diferente color en la Fig. 4.35.

Los datos obtenidos para LP16-01VM-D, generalmente muestran en diagramas tipo Harker (con base anhidra) que las IFu en cuarzos tienen un promedio ligeramente más alto de sílice que las alojadas en feldespato, pero esto no siempre aplica. El contenido en SiO_2 va de 76.17 a 78.95 wt.%. En contenido de Al_2O_3 varía de 11.16 a 12.21 wt.%, aquí generalmente las inclusiones en feldespato tienen mayor cantidad de aluminio, el valor promedio es de 11.54 wt.%. El FeO^* va de 1.42 a 2.15 wt.%, las IFu en feldespato muestran contenidos mayores, al igual que los valores para el CaO (0.22 - 0.36 wt.%), y el TiO_2 (de 0.11 - 0.25 wt.%), que también muestran valores de IFu en feldespato más altos. En el contenido de K_2O hay un promedio de 4.98 wt.%, y una variación que va de 4.57 a 5.78 wt.%, generalmente los valores más bajos los presentan las IFu en cuarzos. El contenido de Na_2O va de 1.91 a 4.7 wt.%, en este caso las IFu en feldespato tienen un mayor rango de variación y las IFu en cuarzo están más cercanas al valor promedio (3.65 wt.%). En el MnO y MgO las cantidades promedio son de 0.05 y 0.09 wt.% respectivamente, y en los dos casos no se muestra una variación de contenido entre las IFu en cuarzo y feldespato (Tabla 4.6).

En las IFu de las muestras LP16-01VM-D2, hay un menor rango variación en sílice (75.92 -78.52 wt.%), y de igual manera que en LP16-01VM-D, generalmente los cuarzos tienen mayor contenido en sílice, el promedio es de 77.17 wt.%. En el caso del Al_2O_3 su contenido es de 11.65 wt.% en promedio, y un rango que va de 10.92 a 12.02 wt.%, las IFu en feldespatos tienen ligeramente un mayor contenido. Para el FeO, CaO y TiO_2 sus valores promedios son de 1.79 wt%, 0.30 wt.% y 0.17 wt.% respectivamente, al igual que para el contenido del aluminio, el contenido de FeO, CaO y TiO_2 es mayor en las IFu alojadas en feldespatos. En contenidos de K_2O varían de 4.47 a 5.09 wt. %, y un promedio de 4.70 wt. %, en general las IFu en cuarzo y feldespato tienen los mismos contenidos de potasio. El valor más bajo para Na_2O es de 2.45 wt.%, el más alto de 4.69 wt.%, y el promedio es de 4.07 wt.%, las IFu en cuarzo muestran los contenidos más bajos, pero también el valor más alto. En el MnO tenemos un promedio de 0.09 ± 0.01 wt. %. Para el MgO los contenidos en las inclusiones van de 0.06 a 0.07 wt.%, aquí las IFu en cuarzo y feldespato tienen las mismas cantidades (Tabla 4.6).

Los resultados de geoquímica de roca total muestran mayor contenido de sílice, que el promedio de sus respectivas inclusiones.

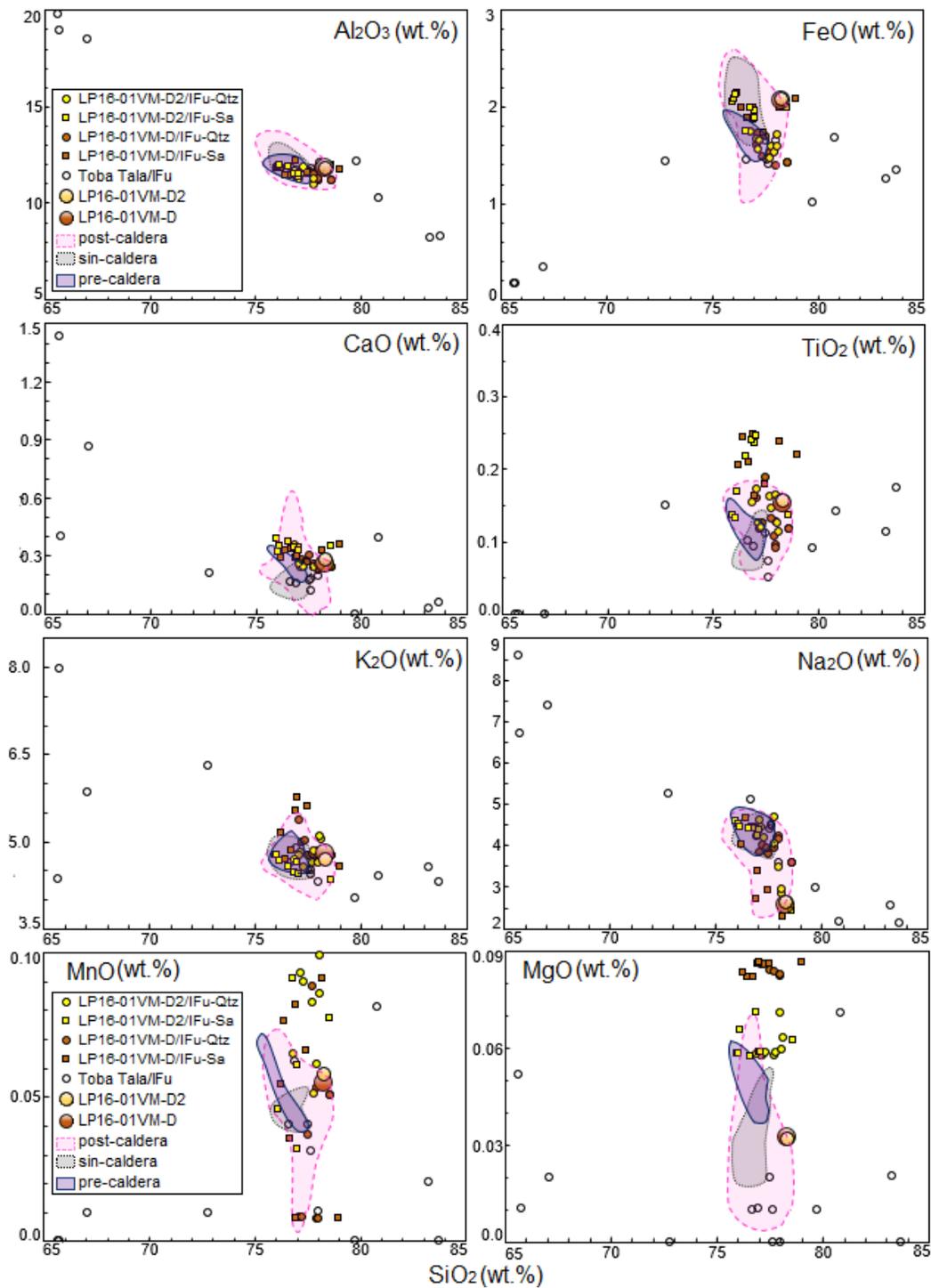


Fig. 4.35. Diagramas Harker para muestras de la sección LP16-01VM, horizontes D y D2. Se comparan las inclusiones de fundido (círculos y cuadrados pequeños con relleno) y pómez (círculos grandes con relleno) analizadas en esta tesis, con la geoquímica publicada de La Primavera (áreas de color)(Mahood 1977, 1981a y 1981b; Cruz-Lara, 2015; Gómez-Álvarez, 2015; Miguel-Cruz, 2016; Tinoco-Murrillo, 2017; Ávila-Ortiz, 2018; Sourisseau, en proceso), y con la geoquímica de las IFu de Toba Tala (círculos pequeños sin relleno) (Miguel-Cruz, 2016).

Para la muestra "LP16-02VM", correspondiente a un pequeño horizonte de caídas piroclásticas en la segunda sección, se grafican los resultados de las inclusiones de fundido alojadas en cuarzos en diagramas tipo Harker (Fig. 4.36).

Se puede observar que el SiO_2 tiene promedio de 77.68 ± 0.03 wt.%. El Al_2O_3 tiene un promedio de 11.89 wt.%, y una variación que va de 11.54 a 12.23 wt.%. En el contenido de FeO^* los valores van de 1.28 a 1.58 wt.%, teniendo un promedio de 1.40 wt.%. Para el CaO el contenido mínimo es de 0.26 wt. %, el máximo de 0.31 wt.%, y el promedio de 0.28 wt.%. En el TiO_2 los valores varían 0.04 wt.%, teniendo un promedio de 0.14 wt.%. Para el caso del K_2O los valores mínimos y máximos en contenidos, son de 4.24 y 5.41 wt.% respectivamente, en promedio el contenido es de 4.62 wt.%. El Na_2O va de 2.80 a 4.68 wt.%, con promedio de 3.86 wt.%. En MnO hay contenidos que van de 0.01 a 0.13 wt.%, teniendo un promedio de 0.05. Para el MgO el rango varía de 0.08 a 0.11 wt.% (Tabla 4.6).

Los resultados de los análisis en las IFu de LP16-02VM muestran algunas diferencias con respecto al dato de su geoquímica de roca total. En Al_2O_3 las IFu muestran cantidades menores a la de su geoquímica de roca total. En casos como el CaO , TiO_2 , y MgO los datos que presentan las MI son mayores a las de su roca total (Fig. 4.36).

Todos los datos presentados en las figuras anteriores también se podrían presentar en diagramas con divisiones en campos de bajo, medio y alto K, en donde casi todos los análisis realizados en La Primavera se grafican casi en el límite de medio y alto K.

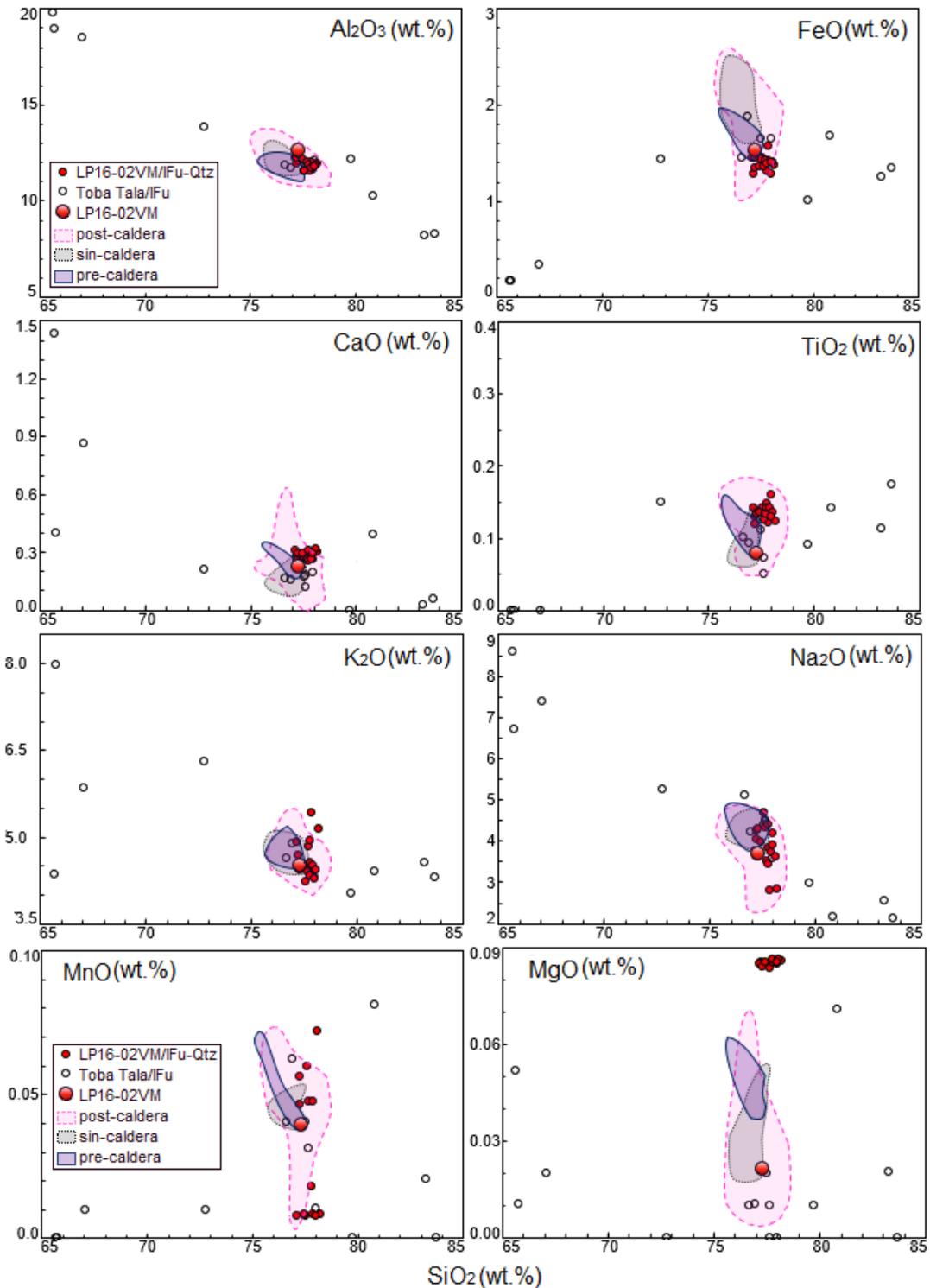


Fig. 4.36. Diagramas Harker para LP16-02VM (horizonte de caídas piroclásticas). Se comparan las inclusiones de fundido (círculos y cuadrados pequeños con relleno) y pómez (círculos grandes con relleno) analizadas en esta tesis, con la geoquímica publicada de La Primavera (áreas de color)(Mahood 1977, 1981a y 1981b; Cruz-Lara, 2015; Gómez-Álvarez, 2015; Miguel-Cruz, 2016; Tinoco-Murrillo, 2017; Ávila-Ortiz, 2018; Sourisseau, en proceso), y con la geoquímica de las IFu de Toba Tala (círculos pequeños sin relleno) (Miguel-Cruz, 2016).

4.3.5 Contenido de H₂O en inclusiones de fundido

Microespectroscopía infrarroja: Condiciones analíticas

Normalmente para hacer mediciones en inclusiones de fundido con microespectroscopía infrarroja (FTIR: *Fourier Transform Infrared Microspectrometry*) las inclusiones deben estar expuestas por los dos lados, pero considerando que los cuarzos y feldespatos son minerales anhidros, solo se expuso por un lado la inclusión y, del otro lado solamente se expuso la cara (un plano) del cristal.

El contenido de volátiles en inclusiones de fundido se analizó mediante FTIR en el Instituto de Geofísica Unidad Michoacán de la UNAM.

Los espectros fueron obtenidos usando el método de transmisión con un microscopio *FTIR NICOLET CONTINUUM*, acoplado a un espectrómetro *NICOLET iS50 FT-IR* (Fig. 4.37). El equipo fue purgado con Nitrógeno líquido para minimizar la interferencia de CO₂ atmosférico. La fuente es un haz de luz infrarroja (IR), con un divisor de haz XT/KBr. Cada espectro fue obtenido aproximadamente con 4 cm⁻¹ de resolución, en la región 4000 a 650 cm⁻¹ de longitud de onda. El número de barridos o *scans* para las muestras y el espectro de referencia fue de 60. El diámetro de la apertura del microscopio fue de 100 μm. El software con que se procesaron las mediciones de los espectros y espesores es *OMNIC*.

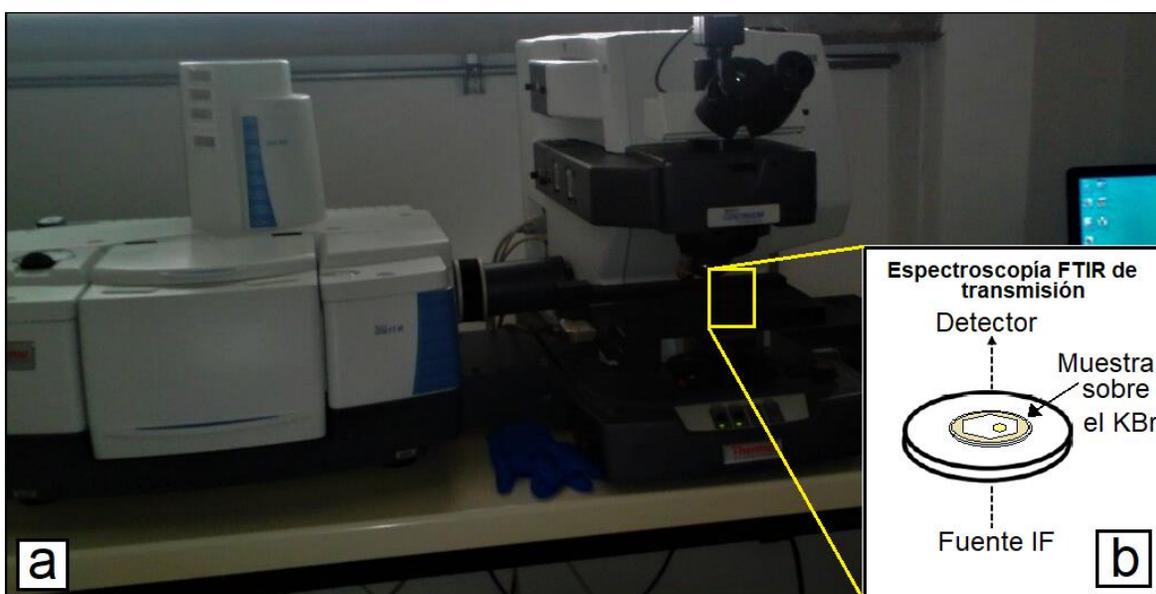


Fig. 4.37. a) Equipo utilizado para el análisis de volátiles en inclusiones de fundido: microscopio y espectrómetro FTIR. b) Esquema de espectroscopía FTIR de transmisión. Modificado de Chen et al. (2015).

Antes de los análisis, las muestras se limpiaron con acetona y alcohol para quitar cualquier residuo que pudiera tener del abrasivo o líquido para pulir.

Para el análisis de inclusiones de fundido, se coloca el mineral huésped sobre un cristal de KBr (bromuro de potasio), la superficie del mineral con la inclusión expuesta se colocó hacia arriba, y la cara con solo el cristal expuesto se coloca hacia abajo. Ambos cristales (mineral huésped y XT/KBr) se colocan sobre la platina del microscopio, con mucho cuidado y sin tocar el vidrio o la muestra con los dedos (Fig. 4.37b).

Primero se ubica la inclusión de vidrio con el objetivo de menor aumento (10x), una vez ubicada la inclusión, se continua con el objetivo con el que se analizará la muestra (con un aumento de 15x) y se enfoca la superficie de la inclusión. Enseguida, con el condensador se enfoca el haz infrarrojo en la superficie de la muestra, y se hace el análisis. Por último, se regresa al objetivo de menor aumento (10x) y posteriormente al XT/KBr (estándar) para realizar el mismo procedimiento al mineral huésped. Por último, con el software se obtuvieron los espectros para cada muestra, de los cuales se midió la absorbancia en los picos de H₂O y CO₂.

La cantidad en porcentaje en peso (wt. %) para el agua, y la cantidad en partes por millón (ppm) para el dióxido de carbono, se obtuvieron aplicando la ecuación de la ley de Lambert y Beer.

$$C = \frac{M * A}{\rho * d * \epsilon} \dots\dots\dots (Ec. 1)$$

Donde *C* es la concentración total del volátil en cuestión, *M* es el peso molecular del H₂O o del CO₂ en (g/mol), *A* es la absorbancia medida en el pico de cada volátil en (cm⁻¹), *ρ* es la densidad del vidrio en (g/L), *d* es el espesor de la muestra en cm y *ε* es el coeficiente de absorción molar en [L/(mol*cm)].

La densidad de 2,310 (g/L) ha sido calculada para vidrios riolíticos (Silver et al., 1990), por lo que fue la que se utilizó, el coeficiente de absorción molar utilizado para el agua y CO₂ fue de 63 [L/(mol*cm)] (Stolper, 1982) y 945 [L/(mol*cm)] (Fine y Stolper, 1985) respectivamente.

La absorbancia para estimar el total de H₂O disuelta se midió en el pico situado en 3550 cm⁻¹. Los espesores de las muestras fueron varios (0.0004-0.002 cm) dependiendo del tamaño de la IFu en cada muestra. Un ejemplo de un espectro se una inclusión de fundido se muestra en la Fig. 4.38.

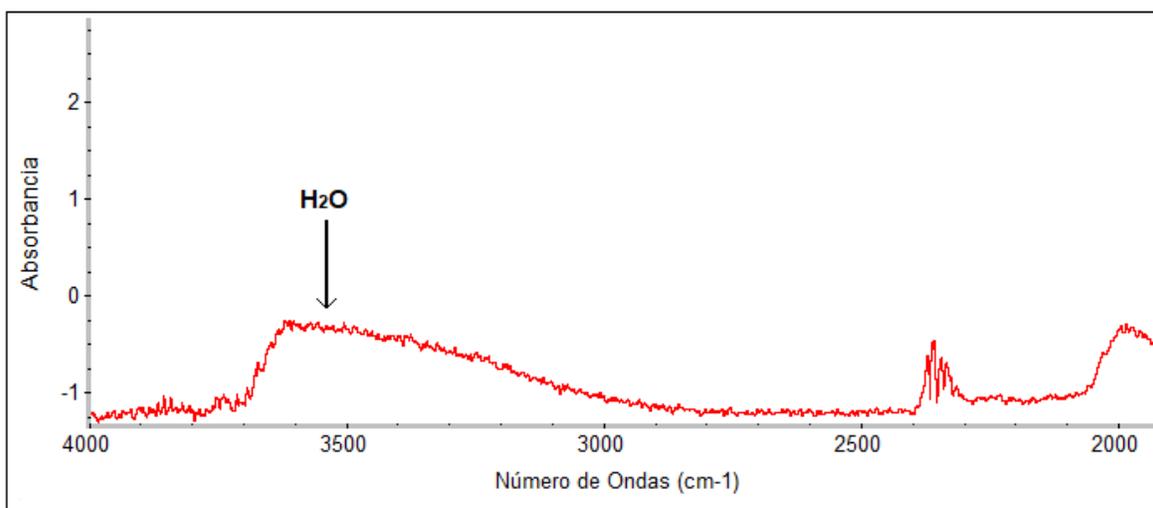


Fig. 4.38. Espectro FTIR, señalando los picos medidos para H₂O.

Resultados FTIR

Se obtuvo un espectro para todas las inclusiones de cada muestra, y se eliminaron los que eran ruidosos y sin posibilidad de medir la cantidad de volátiles. Los espectros de buena calidad se enlistan en la Tabla 4.7.

En general, el promedio del contenido de H₂O en las IFu es de 4.46 wt. %, y van en un rango de 1.66 wt. % a 6.78 wt. % (Tabla 4.7).

En las muestras del horizonte de Pómez Gigante, las IFu de los cristales de VM-04 (correspondientes a la base), varían en su contenido de agua de 3.08 wt. % a 6.78 wt. %, y un promedio de 4.94 wt. %. En otra muestra del HPG (VM-02, estratigráficamente superior), los contenidos de H₂O van de 1.72 wt. % a 4.78 wt. %, y tiene un promedio de 2.81 wt. %.

Para las muestras de la sección LP16-01VM los promedios de contenido de agua son los siguientes: En LP16-01VM-A es de 5.105 wt. %, en LP16-01VM-B es 5.238 wt. %, en LP16-01VM-D 3.745 wt. % y 3.753 wt. % en LP16-01VM-D2.

Para las muestras de la sección LP16-02VM el promedio de agua en las inclusiones de vidrio es de 5.565 wt. %, y tiene un rango que va de 4.59 wt. % a 6.77 wt. % (Tabla 4.7).

El CO₂ no pudo ser medido con éxito en todas las muestras, ya que los picos en su correspondiente parte de la banda eran anómalamente altos, o prácticamente no tenían pico. En los análisis de las inclusiones de vidrio de la Toba Tala tampoco se pudo medir el CO₂ en muestras con alto contenido en sílice (Miguel-Cruz, 2016).

Tabla 4.7. Geoquímica y contenido de volátiles para las muestras donde se pudo medir agua.

Muestra:	Clave	SiO ₂ (wt. %)	TiO ₂ (wt. %)	Al ₂ O ₃ (wt. %)	FeO (wt. %)	MnO (wt. %)	MgO (wt. %)	CaO (wt. %)	Na ₂ O (wt. %)	K ₂ O (wt. %)	H ₂ O (wt. %)
VM-04	N2	75.62	0.19	8.60	1.91	0.11	0.09	0.44	3.69	4.34	3.61
	N3	77.00	0.21	7.83	1.92	0.03	0.08	0.39	3.58	4.11	4.78
	N5	72.36	0.10	10.91	1.55	0.07	0.10	0.20	4.68	4.61	6.43
	O2	73.00	0.15	10.86	1.56	0.10	0.08	0.27	4.20	4.53	3.08
	O3	72.34	0.10	10.60	1.52	0.03	0.08	0.26	3.48	4.62	6.78
VM-02	L1	72.23	0.11	10.69	1.74	0.10	0.07	0.24	3.94	4.35	4.78
	L2	72.61	0.20	10.66	2.22	0.14	0.07	0.37	3.86	4.17	2.43
	M2	73.81	0.15	11.08	1.81	0.07	0.06	0.29	3.81	4.30	2.32
	M4	75.05	0.15	10.74	1.96	0.09	0.07	0.27	4.26	4.33	1.72
LP16-01VM-A	A1	70.41	0.09	11.47	1.88	0.07	0.06	0.31	3.25	4.93	5.71
	B2	73.05	0.17	11.13	1.70	0.01	0.06	0.27	3.97	4.25	6.16
	B3	72.78	0.17	10.75	1.81	0.03	0.06	0.28	3.84	4.42	3.96
	B4	73.32	0.17	10.34	2.02	0.07	0.06	0.28	4.21	4.17	4.59
LP16-01VM-B	C4	72.21	0.14	11.23	1.93	0.09	0.06	0.29	3.47	4.49	3.60
	D5	72.20	0.14	10.81	1.76	0.10	0.06	0.29	3.69	4.39	6.45
	D2	72.66	0.15	10.73	1.67	0.08	0.06	0.26	3.75	4.20	5.11
	D4	72.09	0.16	11.20	1.80	0.11	0.06	0.32	3.53	4.42	5.79
LP16-01VM-D	E2	73.43	0.12	10.82	1.44	0.08	0.08	0.24	3.73	4.52	3.84
	E3	75.19	0.10	10.79	1.51	0.05	0.09	0.22	4.02	4.50	3.99
	E5	70.30	0.23	11.17	1.82	0.01	0.08	0.27	2.50	5.08	5.49
	F5	76.96	0.18	9.25	1.36	0.01	0.08	0.31	3.49	3.93	1.66
LP16-01VM-D2	G2	72.95	0.21	11.36	1.68	0.13	0.06	0.36	4.21	4.38	4.04
	G3	72.65	0.11	10.98	1.59	0.09	0.06	0.23	2.63	4.68	3.78
	G4	74.09	0.15	10.40	1.40	0.08	0.06	0.23	4.47	4.43	3.80
	H3	73.24	0.16	10.72	1.59	0.12	0.06	0.24	4.37	4.52	3.39
LP16-02VM	J1	71.28	0.12	11.04	1.19	0.12	0.08	0.25	3.93	4.32	5.17
	J4	72.74	0.13	10.86	1.34	0.01	0.09	0.25	4.39	3.97	5.73
	J5	72.24	0.13	11.29	1.26	0.04	0.08	0.27	4.03	4.15	4.59
	K4	71.50	0.13	10.76	1.45	0.04	0.10	0.24	3.42	4.14	6.77

Se graficaron diagramas binarios de agua vs sílice (Fig. 4.39) de las IFu de este estudio, y se compararon con las IFu de la Toba Tala (Miguel-Cruz, 2016).

Los resultados de Miguel-Cruz (2016) muestran mayor variación que las IFu de esta tesis en cuanto a sílice, en agua inclusiones de Toba Tala contienen de 0.07 a 6.11 wt. %. En las IFu del horizonte de pomez gigante (VM-04 y VM-02) el H₂O varía de 1.72 a 6.78 wt.% (Fig. 4.39a). Para las IFu en las muestras LP16-01VM-A y LP16-01VM-B su variación en contenido de agua va de 3.6 a 6.45 wt. %. Las IFu en las muestras LP16-01VM-D y LP16-01VM-D2 tienen un rango de agua que va de 1.66 a 4.04 wt. % (Fig. 4.39b). Y para las IFu de LP16-02VM se tiene una variación de agua que va de 4.59 a 6.77 wt. % (Fig. 4.39c).

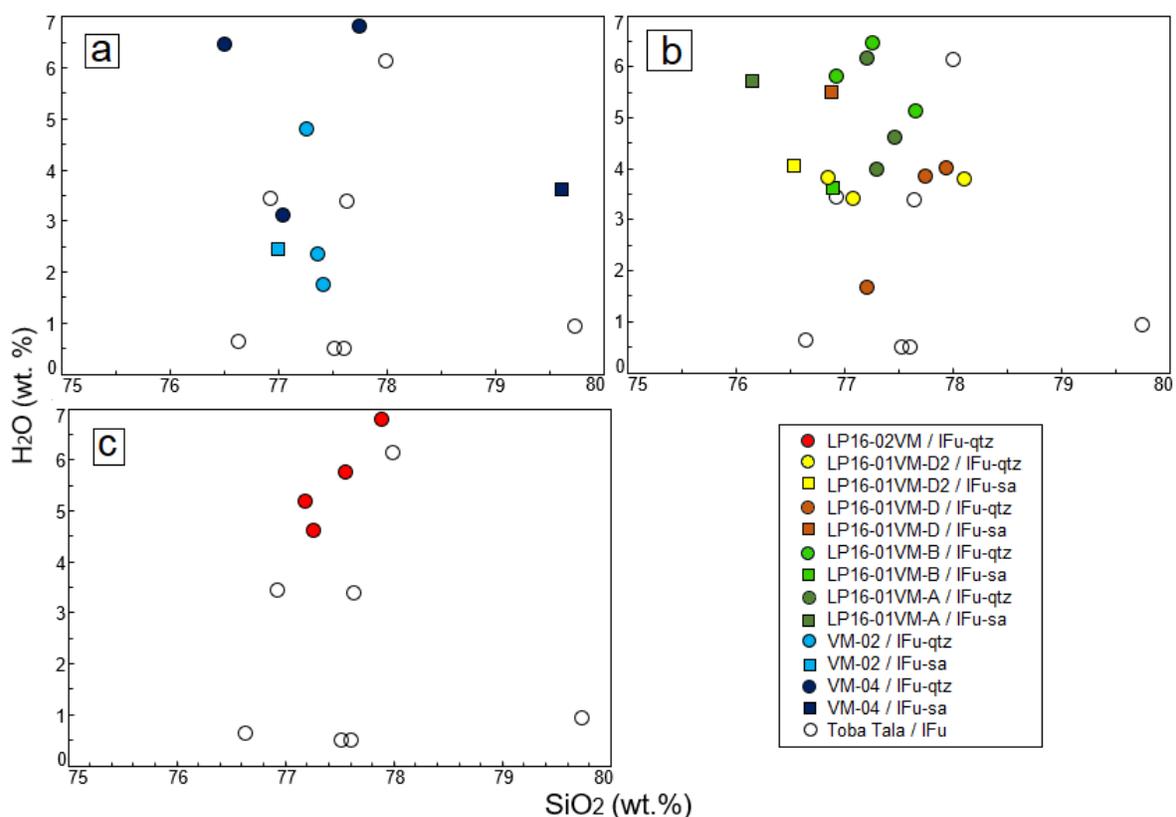


Fig. 4.39. Diagramas binarios de H₂O vs SiO₂. a) IFu de la Pómez Gigante. b) IFu de la sección LP16-01VM. c) IFu de la sección LP16-02VM. Círculos sin relleno: IFu en Toba Tala (Miguel-Cruz, 2016).

También se graficaron diagramas binarios de H₂O vs K₂O (Fig. 4.40) para las IFu de este trabajo, y de igual manera se comparan con los resultados de las IFu correspondientes al evento sin-caldera (Toba Tala). Las IFu del HPG en la base (VM-04) contienen más agua y K₂O que las de la cima (VM-02) (Fig.4.40a). Por otra parte, las IFu en LP16-01VM-A y LP16-01VM-B tienen más agua y menos K₂O que las IFu de LP16-01VM-D y LP16-01VM-D2 (Fig. 4.40b). En LP16-02VM el contenido de agua en las IFu vuelve a aumentar, y sus concentraciones son similares a las de la base del HPG (Fig. 4.40c).

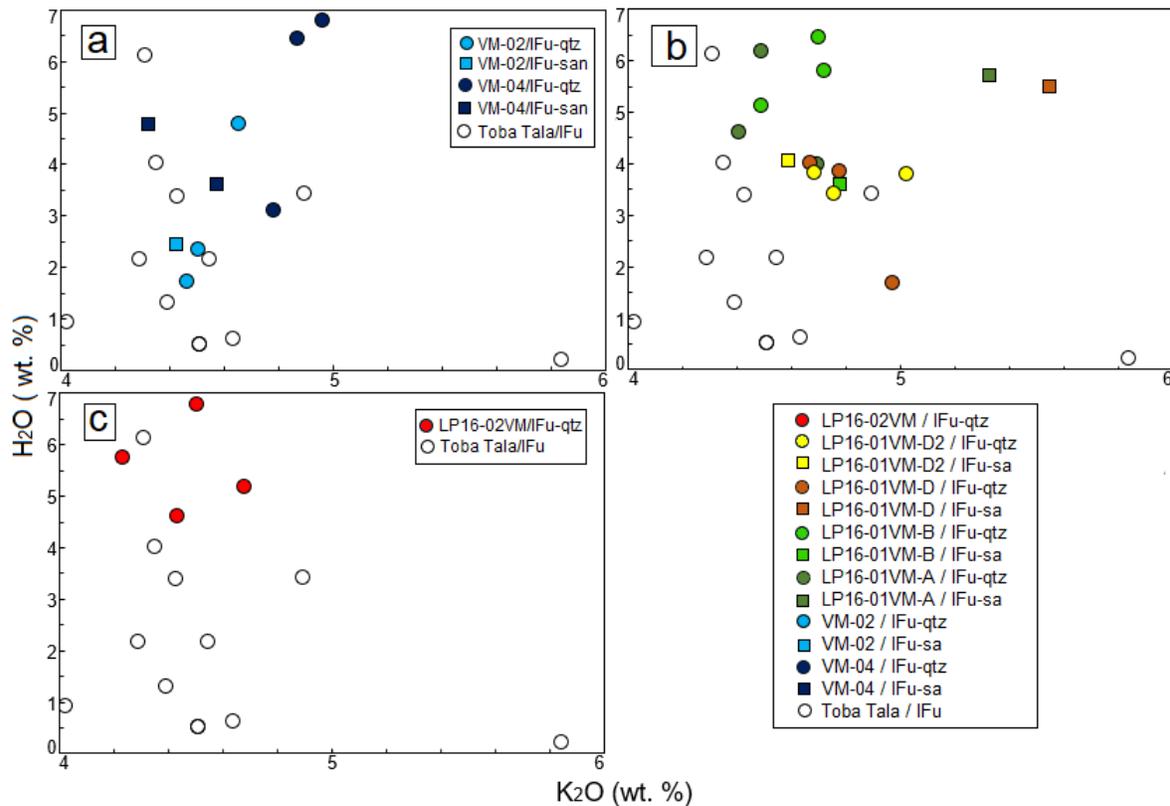


Fig. 4.40. Diagramas binarios de agua vs potasio. a) IFu de la Pómez Gigantes. b) IFu de la sección LP16-01VM. c) IFu de la sección LP16-02VM. Círculos sin relleno: IFu en Toba Tala (Miguel-Cruz, 2016).

Con ayuda de *VolatileCalc* (Newman y Lowestern, 2002) se calcularon las presiones para las IFu de este estudio y para las IFu de Miguel-Cruz (2016). Los resultados se graficaron en diagramas binarios de presión vs. sílice (Fig. 4.41) y presión vs. potasio (Fig. 4.42).

En las IFu que corresponden a la Toba Tala (sin-caldera) se tienen presiones que varían de 2 a 195 MPa. Las presiones para las IFu del HPG (VM-04 y VM-02) van de 34 a 228 MPa (Fig. 4.41a). Las presiones para las IFu de LP16-01VM-A y LP16-01VM-B van de 75.5 a 211 MPa. Para las IFu de LP16-01VM-D y LP16-01VM-D2 se obtuvieron presiones que van de 18 a 161 MPa (Fig. 4.41b). Y para las IFu de LP16-02VM las presiones obtenidas van de 118 a 228 MPa (Fig. 4.41c).

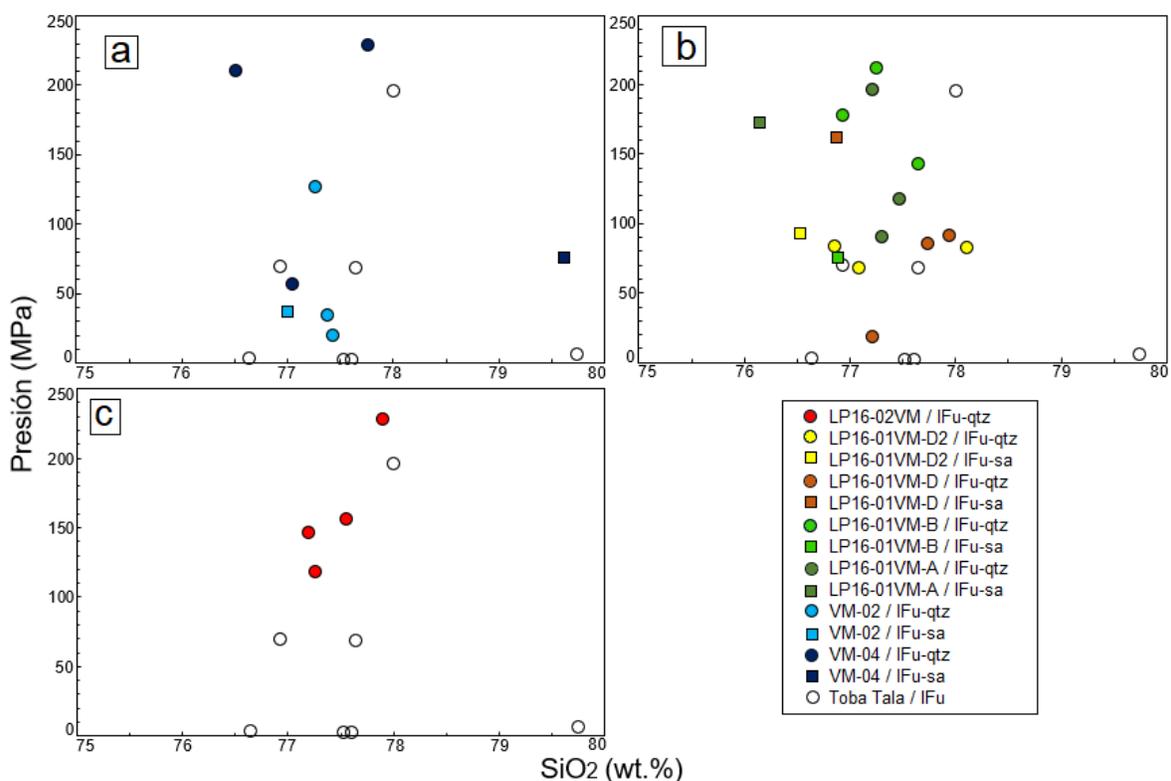


Fig. 4.41. Diagramas binarios Presión vs sílice. Círculos sin relleno: IFu en Toba Tala (Miguel-Cruz, 2016). a) IFu de la Pómez Gigantes. b) IFu de la sección LP16-01VM. c) IFu de la sección LP16-02VM.

En la gráfica K₂O vs. presión (Fig. 4.42) y en la gráfica anterior (Fig. 4.41) se nota que las IFu en la base del HPG (VM-04) se formaron a mayor presión que las de la cima (VM-02)(Fig. 4.42a). En general también las IFu en LP16-01VM-A y LP16-01VM-B presentan presiones más altas que las de LP16-01VM-D y D2 (Fig. 4.42b). Al igual que el contenido de agua, la presión también aumenta para las IFu en la muestra LP16-02VM (Fig. 4.42c).

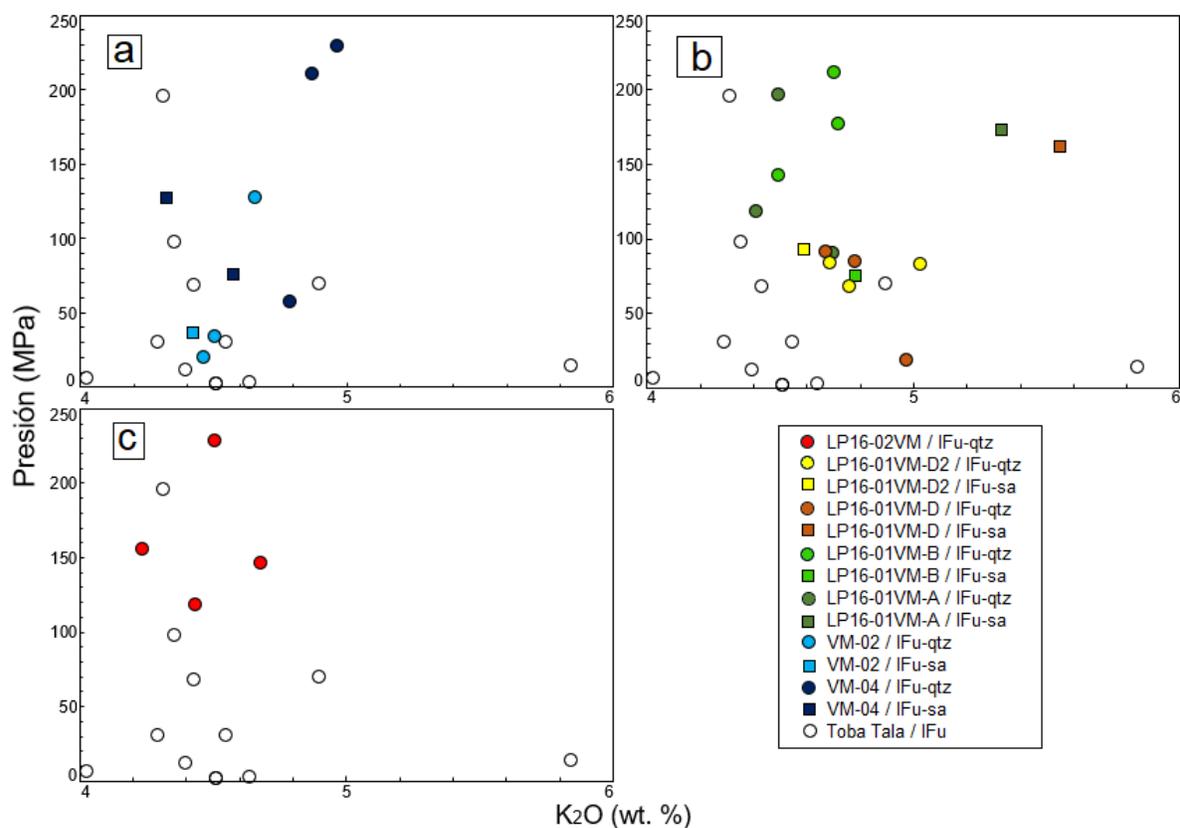


Fig. 4.42. Diagramas binarios de Presión vs potasio. a) IFu de la Pómez Gigantes. b) IFu de la sección LP16-01VM. c) IFu de la sección LP16-02VM. Círculos sin relleno: IFu en Toba Tala (Miguel-Cruz, 2016).

Capítulo 5. Discusión

Los objetivos e hipótesis de la presente tesis persiguen el conocer las condiciones actuales del sistema geotérmico en la caldera de La Primavera actualmente, esto es, después de formada la caldera. Por lo tanto, se eligió estudiar las unidades post-caldera, pues representan los últimos eventos magmáticos en La Primavera, responsables de la configuración del sistema geotérmico actual.

Para comprender mejor el sistema geotérmico de La Primavera es necesario investigar procesos magmáticos, así como la profundidad en la que ocurren, ya que son de vital importancia para el entendimiento de la fuente de calor, así como su ubicación en un sistema geotérmico.

5.1 Evolución de procesos magmáticos y su relación con el sistema geotérmico

Aunque la Caldera de La Primavera se destaca por sus lavas medianamente peralcalinas, no son las únicas rocas en la parte occidental de la Faja Volcánica Transmexicana que representan magmas peralcalinos. Algunas rocas en la región de Guadalajara son peralcalinas y metaluminosas, estas rocas son la ignimbrita San Gaspar (4.8 Ma) y la ignimbrita Guadalajara (3.3 Ma). De hecho, la ignimbrita Guadalajara presenta fiames que en composición son ligeramente menos evolucionadas que las riolitas de La Primavera (Mahood et al., 1985).

Investigaciones previas sobre la geoquímica de las rocas de la Caldera de La Primavera, han sugerido que Toba Tala (unidad sin-caldera) esta zoneada (desde medianamente peralcalina en la base, a una porción metaluminosa en la cima)(Mahood 1981). En campo son distinguibles tres horizontes que conforman a dicha unidad (Mahood 1981; Miguel-Cruz 2016). El segundo horizonte de Toba Tala contiene pómez afírica blanca y pómez gris con menos del 1 % cuarzo y sanidino, las cuales representan la mezcla de los dos magmas (Mahood, 1980).

El horizonte de pómez gigante (HPG), al ser extruido casi inmediatamente después del evento de colapso de caldera (Toba Tala ~ 95 ka), es un distinguido horizonte para estudiar y conocer sobre los procesos magmáticos que han ocurrido después de la formación de la caldera, y así poder inferir el sistema de bombeo (*plumbing system*), que es importante para el desarrollo del sistema geotérmico en la zona de la Caldera de La Primavera.

Witter et al., (2005), Sosa Ceballos et al., (2012) y Ruth et al., (2018) han estudiado la importancia de procesos magmáticos como la mezcla de magmas para erupciones en las diversas estructuras volcánicas en la FVTM.

5.1.1 Mezcla de magmas en la química de roca total

En la Fig. 5.1a se aprecia que las muestras de la pómez gigante (hacia la base de la columna) y las de la parte media de la columna estratigráfica muestran una tendencia descendente bien marcada a medida que incrementa el sílice. Por otro lado la muestra estratigráficamente más joven que se colectó se grafican prácticamente a la mitad de la tendencia. Esto sugiere mezcla de magmas ligeramente diferentes, en donde posibles miembros terminales, uno alcalino y otro sub-alcalino se mezclan.

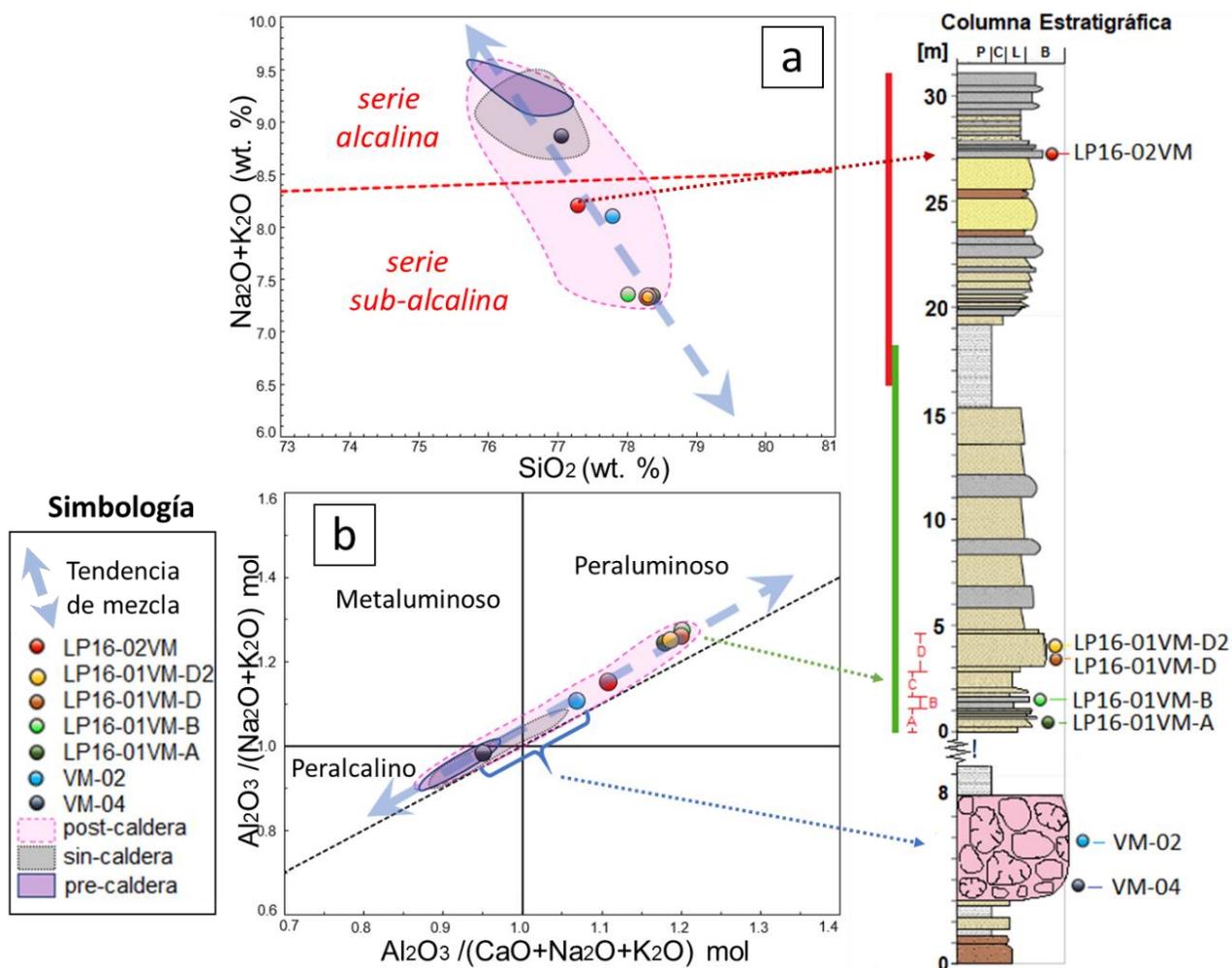


Fig. 5.1. Diagramas para pómez que muestran mezcla de magmas (flecha azul) y columna estratigráfica descrita en la tesis. a) Diagrama TAS. b) Diagrama ANK vs. ACNK. Los datos se comparan con la geoquímica publicada de La Primavera.

Además en el diagrama A/NK vs. A/CNK (Fig. 5.1b) se aprecia que las rocas pre-caldera son prácticamente peralcalinas, mientras que las rocas sin y post-caldera transgreden los límites hasta

tener composiciones peraluminosas. Las muestras de la mitad de la comuna llegan a ser las más peraluminosas.

La gráfica índice de peralcalinidad (P.I.) vs. sílice señala una trayectoria evolutiva desde los eventos pre-caldera hasta los post-caldera (Fig. 5.2), dicha gráfica revela zoneamiento composicional del HPG (al igual que en Toba Tala). La base del HPG muestra una mezcla menor a la parte superior. Además se aprecia que las muestras de la mitad de la columna entran en la tendencia de zoneamiento de la Pómez Gigante, y la muestra estratigráficamente superior se grafica en una parte intermedia de la tendencia. Quizá la mezcla de magmas peralcalinos y peraluminosos pudo catalizar la erupción del horizonte de pómez gigante, el colapso pudo haber trastocado el subsuelo bajo la caldera y pudo haber facilitado la mezcla de dichos magmas (Sosa-Ceballos et al., 2018).

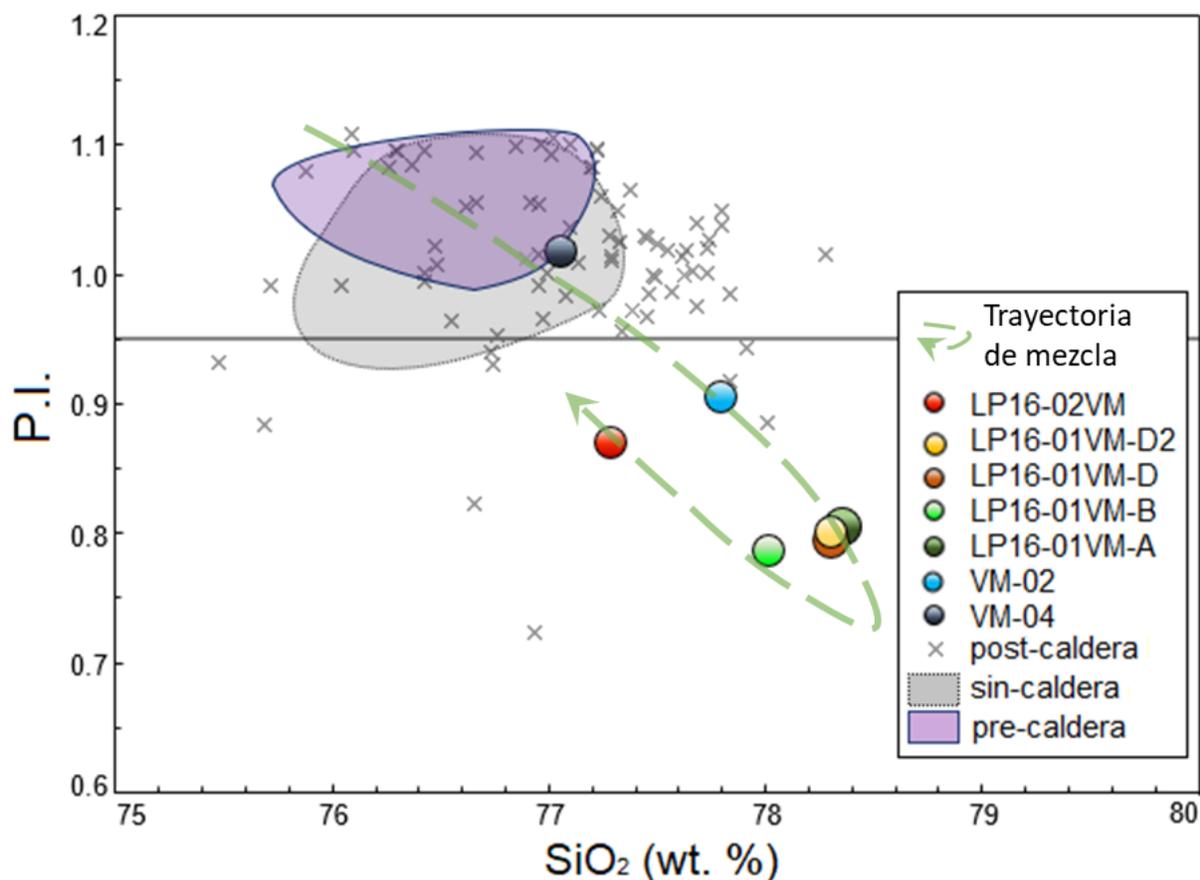


Fig. 5.2. Diagramas para pómez de índice de peralcalinidad P.I. ($[(NaO_2+K_2O)/Al_2O_3]$ molar) vs. Sílice, con la trayectoria de evolución composicional (flecha verde). Las muestras que se grafican por arriba de la línea son peralcalinas (tomada desde 0.95 por los posibles errores analíticos). Los datos se comparan con la geoquímica publicada de La Primavera.

En general, los elementos traza de las rocas que pertenecen a los eventos post-caldera muestran variaciones más importantes en las concentraciones de dichos elementos, que las rocas de los eventos pre-caldera y sin-caldera. Además la anomalía negativa de Eu podría indicar bajos grados de fusión parcial.

5.1.2 Mezcla de magmas en la geoquímica de inclusiones de fundido

Los datos graficados en el diagrama TAS para las inclusiones de fundido (IFu) muestran también la tendencia negativa (Fig. 5.3a). Para el caso de las IFu en las Pómez Gigante son en composición similar a la de su roca huésped, pero para las IFu de la sección LP16-01VM (parte superior de la columna) son ligeramente menos evolucionadas que su roca huésped. Para la muestra estratigráficamente más joven y sus IFu, se obtuvieron composiciones similares. La gran mayoría de las IFu analizadas en este trabajo se grafican en el campo de las rocas alcalinas (Fig. 5.3).

En la Fig. 5.3 se observa que prácticamente todas las IFu del HPG se grafican en el campo de rocas peralcalinas. La gran mayoría de las IFu que pertenecen a las pómez colectadas a la mitad de la columna estratigráfica, muestran una composición peralcalina, pero unas pocas son peraluminosas (de hecho llegan a ser las más peraluminosas), por lo que un magma peraluminoso y sub-alcalino empieza a tener más influencia en las composiciones. En las IFu de las pómez más jóvenes estratigráficamente hablando, se puede observar que la mitad son peralcalinas y la otra mitad peraluminosas.

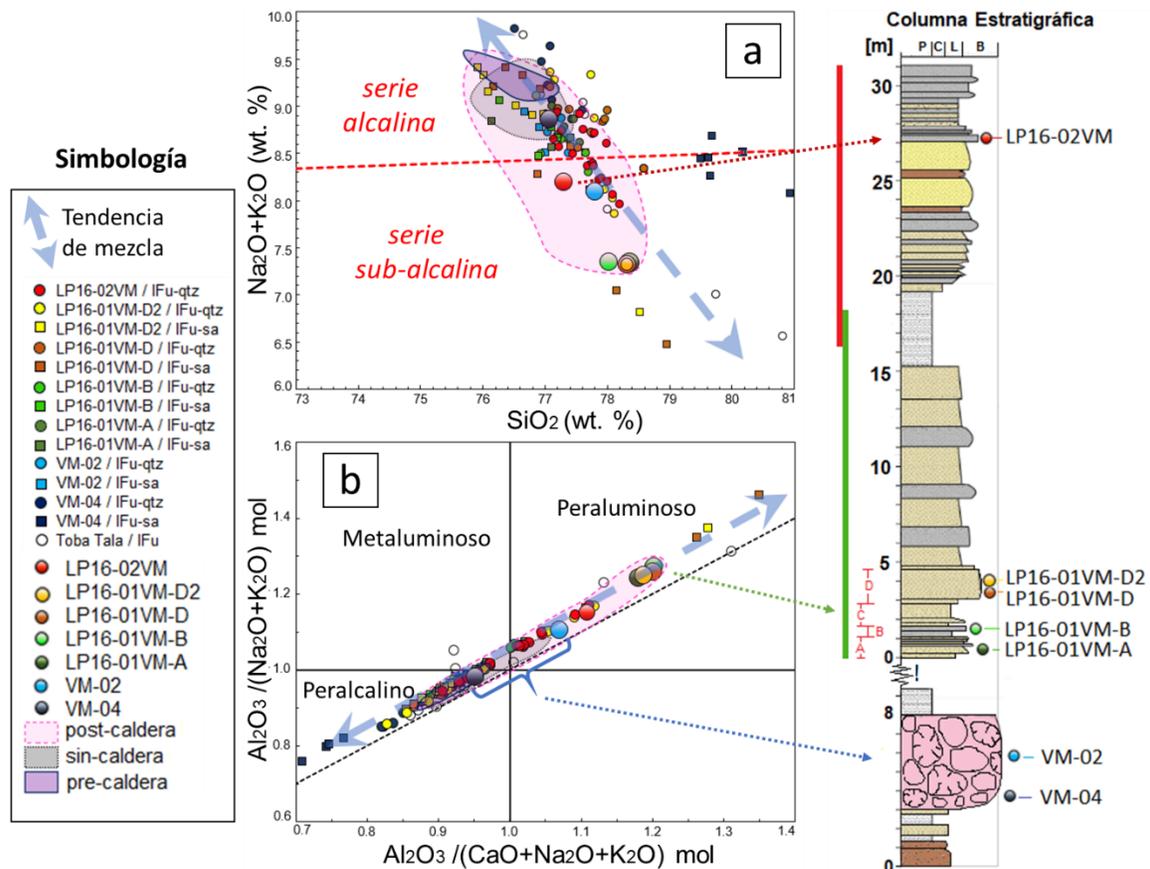


Fig. 5.3. Diagramas para IFu y roca huésped que muestran mezcla de magmas (flecha azul) y columna estratigráfica descrita en la tesis. a) Diagrama TAS. b) Diagrama ANK vs. ACNK. Los datos se comparan con la geoquímica publicada de La Primavera (áreas de color). Círculos y cuadrados pequeños representan inclusiones de fundido; círculos grandes representan análisis de roca total en pómez.

De la misma manera que para las pómez huésped se graficaron los datos de las IFu de las distintas muestras en diagramas P.I. vs sílice (Fig. 5.4), y se marcó de igual forma una trayectoria de evolución composicional. En este diagrama también se observó que todas las IFu del HPG son peralcalinas, la pómez de la parte superior del HPG es más evolucionada con respecto a la base (Fig. 5.4a). Posteriormente las IFu de las pómez de la parte intermedia de la columna (Fig. 5.4b-c), muestran que algunas se grafican por debajo del campo de peralcalinidad, principalmente las IFu que pertenecen al estrato D, pero aun así la mayoría son peralcalinas (Fig. 5.4c). Por último en el caso de las IFu más jóvenes estratigráficamente hablando se revela una mezcla más avanzada ya que las inclusiones se concentran en la transición del índice peralcalino (Fig. 5.2d).

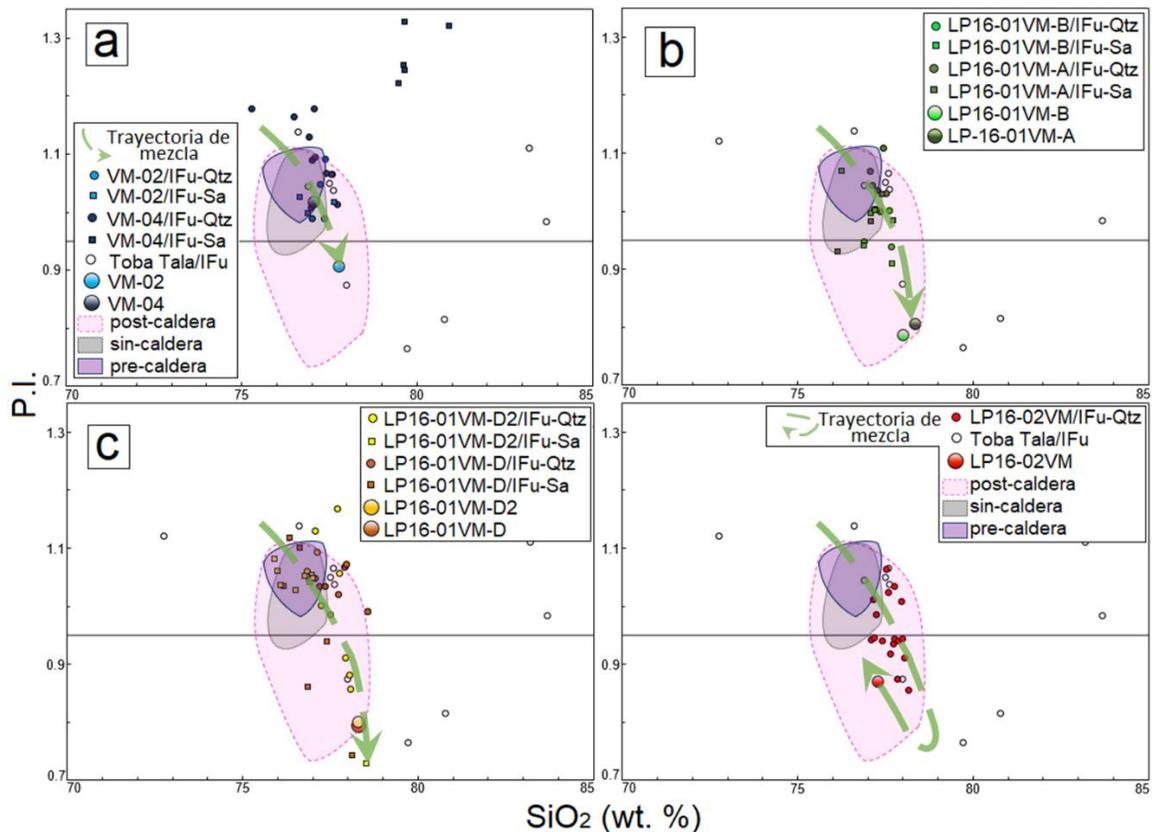


Fig. 5.4.

Diagramas de índice de peralcalinidad P.I. ($[(\text{NaO}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3]$ molar) vs sílice para las IFu en este estudio, con trayectoria de evolución composicional (flecha verde) a) Roca huésped e IFu de la Pómez Gigantes. b) Roca huésped e IFu en las muestras LP16-01VM-A y B. c) Roca huésped e IFu en las muestras LP16-01VM-D y D2. d) Roca huésped e IFu de la sección LP16-02VM. Los datos se comparan con la geoquímica publicada de La Primavera (áreas de color). Círculos y cuadrados pequeños representan inclusiones de fundido; círculos grandes representan análisis de roca total en pómez.

5.1.3 Condiciones barométricas del sistema geotérmico actual reveladas por análisis de inclusiones de fundido

Los datos arrojados por los estudios FTIR nos ayudan a construir diagramas binarios como K_2O vs. H_2O , los cuales sirven para vislumbrar procesos magmáticos como cristalización fraccionada y mezcla de magmas.

En el caso de la cristalización fraccionada la tendencia debería reflejarse como una pendiente negativa por la cristalización de feldespato (empobrecimiento en K_2O y enriquecimiento de H_2O), pero dicha tendencia no se ve reflejada en los resultados obtenidos en esta tesis (Fig. 5.5). Sin embargo, en el HPG se observa que las IFu en cuarzos tienen concentración de H_2O más altas a las contenidas en feldespato (Fig. 5.5a), posiblemente porque era un magma subsaturado cuando los

feldespatos cristalizaron, por lo tanto enriquecieron el fundido en H₂O y entonces los cuarzos, que son una fase más tardía que el feldespato, registran mayor cantidad de H₂O. O simplemente, los cuarzos y feldespatos crecieron en un magma sobresaturado en agua, sólo que el agua se fuga más fácil en los feldespatos que en los cuarzos. Las variaciones de agua son evidentes, en general en el HPG se observa que de base a cima disminuye su contenido en H₂O, por lo que es claro que hay magmas evolucionando en diferentes reservorios, a diferente presión. Además las IFu de Toba Tala (Miguel-Cruz, 2016) deben tener fuga porque sus concentraciones más bajas no corresponden a entrapamientos magmáticos, sobre todo tomando en cuenta que si están en equilibrio con las inclusiones que tienen más agua.

Las IFu de la parte intermedia de la columna estratigráfica tienen más agua que las IFu de la cima de la pómez, pero disminuye en sus concentraciones en las dos últimas muestras en esa parte de la columna (Fig. 5.5b).

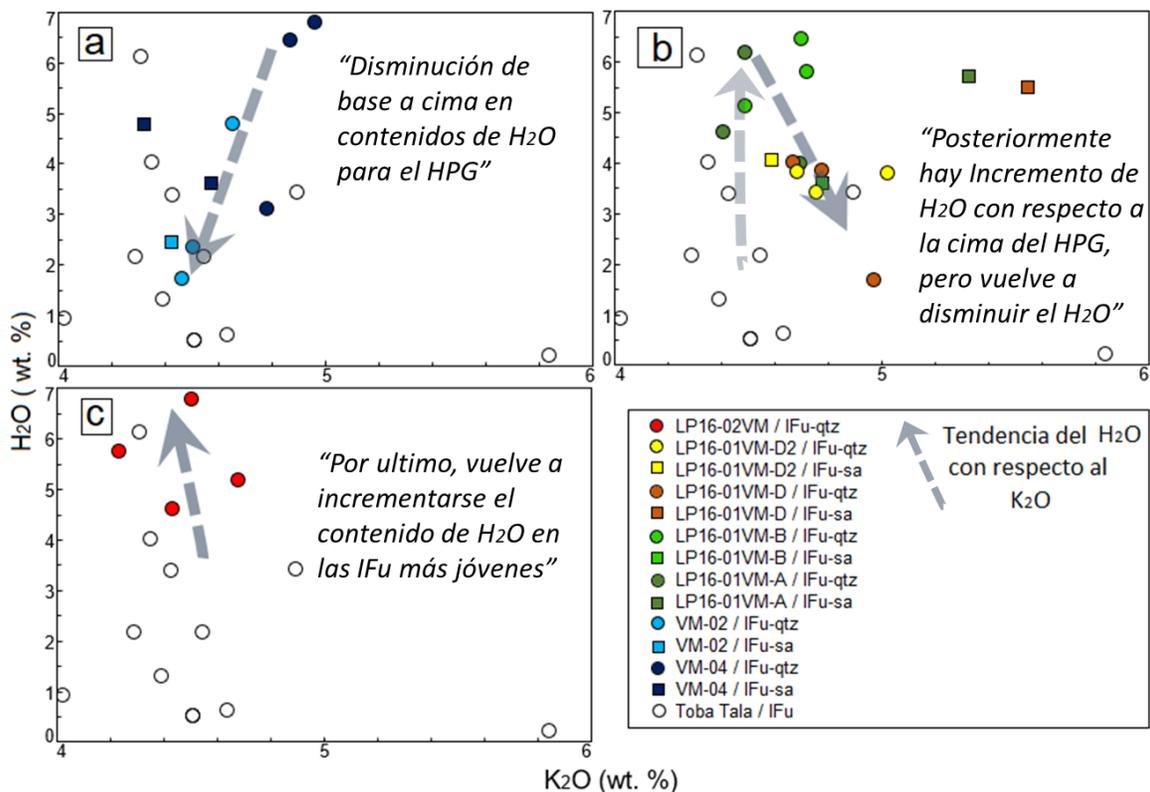


Fig. 5.5. Diagramas binarios de agua vs potasio. a) IFu de la Pómez Gigantes. b) IFu de la sección LP16-01VM. c) IFu de la sección LP16-02VM. Círculos sin relleno: IFu en Toba Tala (Miguel-Cruz, 2016). Se muestra la tendencia evolutiva de los eventos post-caldera.

Al final se vuelve a ver un incremento de H₂O en las IFu de las pómez más jóvenes con respecto a las anteriores (4.5-7wt. %)(Fig. 5.5c). Estos datos podrían sugerir mezcla de dos magmas riolíticos a distintas profundidades (sistema multi-reservorios), después de la formación de la caldera.

5.2 Mezcla de magmas como detonante de la formación de la caldera de La

Primavera

En general los datos de geoquímica de roca total y datos de las IFu sugiere que el proceso magmático predominante para generar el vulcanismo post-caldera de La Primavera sería una mezcla de magmas silícicos, que además es muy poco común. También dichos datos obtenidos de las IFu proponen un sistema multi-reservorio, por lo que se realizó un modelo esquemático de cómo evolucionó la caldera de La Primavera a partir de unidad sin-caldera (Fig. 5.6).

Tomando en cuenta lo antes publicado por Mahood (1981) y Miguel Cruz (2016), una gran cámara magmática zoneada hizo erupción para dar lugar a la caldera volcánica (Fig. 5.6a). La mezcla de magmas peralcalinos y peraluminosos se da durante o posterior a la formación de la caldera, lo que sí es seguro es que después del colapso la mezcla es más evidente según nuestros datos (HPG), y probablemente el colapso provoco que el sistema de bombeo “*plumbing system*” se modificara dando lugar a un sistema multi reservorio (Fig. 5.6b). Posteriormente hubo un gap de vulcanismo entre los domos anulares antiguos y domos anulares jóvenes (Fig. 5.6c) , donde probablemente los magmas peraluminosos tuvieron mayor aporte, pues los datos de las muestras ubicadas a la mitad de la columna estratigráfica son más peraluminosas (relacionada a la erupción de los domos anulares jóvenes). Después de la formación de los domos anulares jóvenes hay un levantamiento topográfico relacionado al crecimiento de una cámara magmática que dio lugar al arco sur (Fig. 5.6d), esta cámara magmática presenta de igual forma una mezcla de magmas, pero sus productos (muestra estratigráficamente más joven en este trabajo) muestran una disminución en peraluminosidad con respecto a los domos anulares jóvenes.

Probablemente después del último evento volcánico (Fig. 5.6e) pequeñas cámaras magmáticas continúan aportando energía calorífica para el desarrollo del sistema geotérmico actual en la caldera de La Primavera.

A partir de los análisis de IFu podemos decir que las cámaras magmáticas están aproximadamente de 4 a 8 km de profundidad.

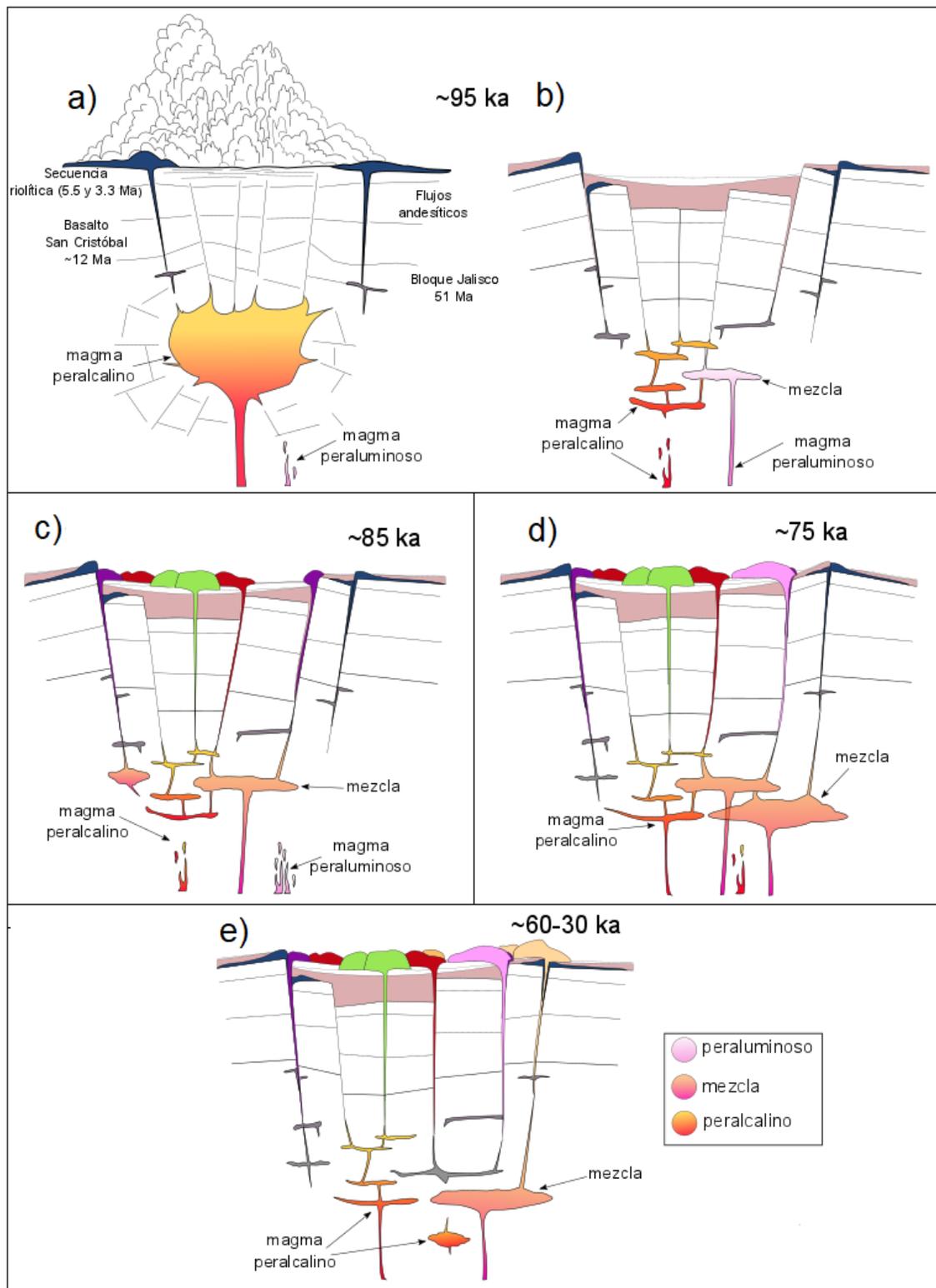


Fig. 5.6 . Modelo esquemático del sistema de bombeo de La Primavera, no está a escala. A) La erupción de Toba Tala. B) Condiciones pre-eruptivas del HPG, domos centrales y domos anulares antiguos. C) Condiciones pre-eruptivas domos anulares jóvenes. D) Levantamiento topográfico hacia el sur. E) Formación Arco de lavas Sur y domo El Colli.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- La geoquímica de roca total en las unidades pre-caldera y sin-caldera muestran una composición alcalina, mientras que las unidades post-caldera van de alcalinas a subalcalinas.
- Las inclusiones de fundido (IFu) analizadas se clasifican como riolitas, ya que presentan una variación de SiO_2 entre ~ 75 a 80.5 wt%, y en álcalis los valores van desde ~ 6.5 a 10 wt%, por lo que se encuentran en la transición de las rocas alcalinas-subalcalina conforme a Miyashiro (1978). Inclusiones de fundido de composición alcalina también se clasifican como peralcalinas, y las subalcalinas como peraluminosas.
- En la distribución de Al_2O_3 que se observa en las IFu de las Pómez Gigante contenido de entre ~ 8 y 12 wt%, y la variación de FeO va de ~ 1.6 a 2.4 wt%, por lo que se clasifican como riolitas comendíticas de acuerdo con el diagrama de rocas hiperalcalinas (McDonald, 1974).
- En términos generales la cantidad de agua en las IFu es variable, aunque en la mayoría se encontraron medidas de 4 a 6 % de agua, lo que implica de 100 a 200 MPa que son de 4 a 8 km por debajo de la superficie. Estas son profundidades similares a la Toba Tala, por lo tanto puede tratarse de un sistema multi-reservorios. Después del colapso de la caldera, se pudo haber fracturado el subsuelo, y a su vez esto permitió el ascenso de magma subalcalino (peraluminoso), lo cual favorece la mezcla parcial de dos magmas silícicos. Hacia las últimas etapas de vulcanismo en La Primavera el aporte de magma alcalino (peralcalino) vuelve a ser mayor al subalcalino (peraluminoso).
- La concentración de CO_2 es muy baja y no puede ser medible con las técnicas empleadas, ya que IFu con $>72\%$ SiO_2 no presentan concentraciones significativas (Miguel Cruz, 2016).
- Los resultados implican que la fuente de calor del sistema geotérmico actual se encuentra a 4-8 km de profundidad, representado por magmas emplazados en etapas post-caldera.

6.2. Recomendaciones

- Hacer un estudio de inclusiones de fundido en unidades pre-caldera para tener un contexto más amplio sobre la evolución geológica de la caldera de La Primavera.
- Muestrear todas las unidades post-caldera para hacer un estudio geoquímico de roca total y de sus inclusiones de fundido, así como de los depósitos piroclásticos asociados a las erupciones de estas.
- Medir elementos traza en las IFu empleando microsonda iónica (*e.g.* SIMS) para tener una mejor panorámica sobre los procesos magmáticos que ocurrieron después de la formación de la caldera.
- Hacer análisis de IFu en contenido de volátiles con microespectrometría Raman usando una resina u otro material que no produzca fluorescencia para evitar ruido en los espectros.

Bibliografía

- Alatorre-Zamora, M.A., Campos-Enriquez, J.O., 1992. La Primavera Caldera (Mexico): Structure inferred from gravity and hydrogeological considerations: *Geofísica Internacional*, v. 31, n° 4, 371-382.
- Allen, S. R., McPhie, J., 2009. Products of neptunian eruptions: *Geological Society of America*, v. 37, n° 7, 639-642.
- Ávila Ortiz, N. A. H., 2018. Edad y génesis del Domo "El Chapulín", Caldera de La Primavera, Jalisco, México: Tesis de licenciatura. F. C. UNAM. 1-98.
- Ban, M., Hasenaka, T., Delgado-Granados, H., Takaoka, N., 1992. K-Ar ages of lavas from shield volcanoes in the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Mexico: *Geofísica Internacional*, 31, 467-473.
- Burke E. A.J., 2001. Raman microspectrometry of fluid inclusions: *Lithos*, 55, 139-158.
- Capra, L., Macías, J., Garduño, V., 1997. The Zitácuaro Volcanic Complex, Michoacán, México: magmatic and eruptive history of a resurgent caldera: *Geofísica Internacional*, 36(3), 161-179.
- Chabiron, A., Pironon, J., 2004. Characterization of water in synthetic rhyolitic glasses and natural melt inclusions by Raman spectroscopy: *Contrib Mineral Petrol*, 146, 485-492.
- Chen, X.W., 2013. Petrography and Geochemistry Indication of Crystallization Differentiation and Magma Mixing Process of the Tianchi Volcano, Changbaishan, (M.S. Dissertation). Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing.
- Chen, Y., Zou, C., Mastalerz, M., Hu, S., Gasaway, C., Tao, X., 2015. Applications of Micro-Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) in the Geological Sciences- A Review: *International Journal of Molecular Sciences*, 16, 30250-30250.
- Clough, B. J., Wright, J. V., Walker, G. P. L., 1981. An unusual bed of giant pumice in Mexico: *Nature*, 289, 49-50.
- Clough, B. J., Wright, J. V., Walker, G. P. L., 1982. Morphology and dimensions of the Young comendite lavas of La Primavera volcano, Mexico: *Geol. Mag*, 119, 477-485.
- Cruz-Lara A. U., 2015. Evolución del Domo San Miguel, Campo Volcánico La Primavera, Jalisco, México. Estudio de Estratigrafía y Geoquímica, Instituto Tecnológico Superior de Tacámbaro, tesis de licenciatura.
- Demant, Alan., Vincent, P. M., 1978. A preliminary report on the comenditic dome and ash flow complex of Sierra la Primavera, Jalisco; *Discusion: Foro*, 218-222.
- Ferrari, L., López-Martínez, Margarita., Aguirre-Díaz, G., Carrasco-Núñez, G., 1999. Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: From the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt: *Geology*, v. 27, n° 4, 303-306.
- Ferrari L., Conticelli S., Vaggelli C., Petrone C., and Manetti P., 2000. Late Miocene mafic volcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics*, 318, 161-185.
- Ferrari L., Rosas-Elguera J., 2000. Late Miocene to Quaternary extension at the northern boundary of the Jalisco block, western Mexico: the Tepic-Zacoalco rift revised. *Geological Society of America Special Paper*, 334, 03, 42-64.
- Ferrari L., Petrone C.M., Francalanci L., Tagami T., Eguchi M., Conticelli S., Manetti P., Venegas-Salgado S., 2003. Geology of the San Pedro-Ceboruco graben, western Trans-Mexican Volcanic Belt. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20, 165-181.
- Ferrari L., 2004. Slab detachment control on volcanic pulse and mantle heterogeneity in Central Mexico. *Geology*, 32, 77-80.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, Martin., Bryan, S., 2005. Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica: *Boletín de la Sociedad Geológica mexicana, Volumen Conmemorativa del Centenario, Temas selectos de Geología mexicana*, Tomo LVII, n° 3, 343-378.

- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., Manea, M., 2011. The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone: *Tectonophysics*, 1-28.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S. E., Lopez-Martinez, M., Silva-Fragoso, A., 2018. Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental Silicic Large Igneous Province and the Comondú Group with the Gulf of California rift. *Earth-Science Reviews*, 183, pp. 115-152.
- Ferriz, H., Mahood, G. A., 1986. Volcanismo riolítico en el eje Neovolcánico Mexicano: *Geofísica Internacional*, v. 25-1, 117-156.
- Fine, G., Stolper, E., 1985. The speciation of carbon dioxide in sodium aluminosilicate glasses: Contributions to Mineralogy and Petrology, 91:105-121.
- Frezzotti, M.L., 2001. Silicate-melt inclusions in magmatic rocks: applications to petrology: *Lithos*, 55, 273-299.
- García-Palomo, A., Macías, J., Tolson, G., Valdez, R., Mora-Chaparro, J., 2002. Volcanic stratigraphy and geological evolution of the Apan region, east-central sector of the Transmexican Volcanic Belt: *Geofísica Internacional*, 41, 133-150.
- Gastil, G., Krummenacher, D., Jenschky, A., 1979. Reconnaissance geology of west-central Nayarit, Mexico: summary: Geological Society of America Bulletin, 90, 15-18.
- Gómez-Álvarez F. 2015, Análisis Petrológico de los Domos Tajo y Colli e Implicaciones en el Potencial Geotérmico del Complejo Volcánico La Primavera (CVLP), Jalisco, Instituto Tecnológico Superior de Tacámbaro, tesis de licenciatura.
- Gómez-Tuena, A., LaGatta, A., Langmuir, C., Goldstein, S., Ortega-Gutiérrez, F., Carrasco-Núñez, G., 2003. Temporal control of subduction magmatism in the Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: mantle sources, slab contributions and crustal contamination: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(8), doi:10.1029/2003GC000524, 1-33. Disponible en línea.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, T., Ferrari, L., 2005. Patogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana: *Boletín de la Sociedad Geológica mexicana, Volumen Conmemorativa del Centenario, Temas selectos de Geología mexicana*, Tomo LVII, n° 3, 227-283.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, T., Ferrari, L., 2007. Igneous petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Geological Society of America*, 422, 129-181.
- Gómez-Tuena, A., Mori, L., Straub, S. M., 2016. Geochemical and petrological insights into the tectonic origin of the Transmexican Volcanic Belt: *Earth Science Reviews*, doi: 10.1016/j.earscirev.2016.12.006
- Ihinger, P. D., Hervin, R. L., Mc Millan, P. F., 1994. Analytical Methods for Volatiles in Glasses: *Mineralogical Society of America*, 30, 67-122.
- King, P.L., Venneman, T.W., Holloway, J.R., Herving, R.L., Lowenstern, J.B., Forneris, J.F., 2002. Analytical techniques for volatiles: A case study using intermediate (andesitic) glasses: *American Mineralogist*, 87, 1077-1089.
- Le Maitre, R. W., 2002. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. New York, United States: Cambridge University Press.
- Li, Z., 1994. The silicate-melt inclusions in igneous rocks. In: De Vivo, B., Frezzotti, M.L. (Eds.), *Fluid Inclusions in Minerals: Methods and Applications*. Pontignano (Siena): Short Course of the IMA Working Group "Inclusions in Minerals". Virginia Polytechnic Institute and State Univ. Press, Blacksburg. 73-94.
- Lowenstern, J.B., 1995. Applications of silicate melt inclusions to the study of magmatic volatiles. In: J.F.H. Thompson (ed). *Magmas, Fluids and Ore Deposits*. Mineralogical Association of Canada Short Course, 23, 71-99.
- Macdonald, R., 1974. Nomenclature and petrochemistry of the peralkaline oversaturated extrusive rocks. *Bulletin of Volcanology* 38, 498-516.

- Mahood, G. A., 1977. A preliminary report on the comenditic dome and ash flow complex of Sierra La Primavera, Jalisco: *Inst. Geología*, v. 1, 177-190.
- Mahood, G. A., 1980. Geological evolution of a Pleistocene Rhyolitic Center-Sierra la Primavera, Jalisco, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 8, 199-230.
- Mahood, G. A., 1981a. A Summary of the Geology and Petrology of the Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico: *Journal of Geophysical Research*, v. 86, n° B11, 10137-10152.
- Mahood, Gail A., 1981b. Chemical Evolution of a Pleistocene Rhyolitic Center: Sierra La Primavera, Jalisco, México. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. Vol. 77, p 129-149.
- Mahood, G. A., Drake, R. E., 1982. K-Ar dating Young rhyolitic rocks: A case study of the Sierra La Primavera, Jalisco Mexico: *Geological Society of American Bulletin*, v. 93, 1232-1241.
- Mahood, G. A., 1983a. A discussion of <<The Rio Caliente Ignimbrite: Analysis of a Compound Intraplinian Ignimbrite from a Major Late Quaternary Mexican Eruption> by J.V. Wright: *Bull Volcano*, 46-2.
- Mahood, G. A., Truesdell, A. H., Templos, L. A., 1983b. A reconnaissance geochemical study of la Primavera geothermal area, Jalisco, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 16, 247-261.
- Mahood, G. A., 1985a. A preliminary report on the comenditic dome and ash flow complex of Sierra la Primavera, Jalisco, Reply: *Foro*, 184-190.
- Mahood, G. A., Gilbert, C. M., Carmichael, I. S.E., 1985b. Peralkaline and metaluminous Mixed-Liquid Ignimbrites of the Guadalajara Region, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25, 259-271.
- Mahood, G. A., Halliday, A. N. 1988. Generation of high-silica rhyolite: A Nd, Sr, and O isotopic study of Sierra La Primavera, Mexican Neovolcanic Belt. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 100, p 183-191.
- Melgarejo, J.C., Proenza, J.A., Galí, S., Llovet, X., 2010. Técnicas de caracterización mineral y su aplicación y explotación minera: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62, 1, 1-23.
- Miguel-Cruz, A., 2016. Estudio de inclusiones de vidrio en cristales de la Toba Tala, Sierra de La Primavera, Jalisco, México: Tesis de licenciatura. F. I. UNAM. 1-70.
- Miyashiro, A., 1978. Nature of Alkalic Volcanic Rock Series: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 66, 91-104.
- Mora-Álvarez, G., Caballero-Miranda, C., Urrutia-Fucugauchi, J., Uchiumi, S., 1991. Southward migration of volcanic activity in the Sierra de Las Cruces, basin of Mexico? -a preliminary K-Ar dating and palaeomagnetic study: *Geofísica Internacional*, 30, 61-70.
- Newman, S., Stolper, E. M., Epstein, S., 1986. Measurement of water in rhyolitic glasses: Calibration of an infrared spectroscopic technique: *American Mineralogist*, 71, 1527-1541.
- Newman, S., Lowenstern, J.B., 2002. VOLATILECALC: a silicate melt-H₂O-CO₂ solution model written in Visual Basic for excel: *Computer Geosciences*, 28, 597-604.
- Orozco-Esquivel, M. T., Ferrari, L., Eguchi, M., Tagami, T., Petrone, C., Jacobo-Albarran, J., 2003. The Eastern Alkaline Province (Mexico) revised: geology, geochronology and geochemistry of Neogene volcanism in Veracruz State, en 99ª Reunión Anual, Geological Society of America, Cordilleran Section, Puerto Vallarta, Jal., Libro de resúmenes, p. 58.
- Osete, M., Ruiz-Martínez, V., Cabellero, C., Galindo, C., Urrutia-Fucugauchi, J., Tarling, D., 2000. Southward migration of continental volcanic activity in the Sierra de las Cruces, Mexico: paleomagnetic and radiometric evidence: *Tectonophysics*, 318, 201-215.
- Pasquaré, G., Ferrari, L., Garduño, V., Tibaldi, A., Vezzoli, L., 1991. Geology of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacan: Boulder, CO, *Geological Society of America*, Map and Chart Series MCH072, 22.

- Righter, K., Carmichael, I., Becker, T., Renne, R., 1995. Pliocene to Quaternary volcanism and tectonics at the intersection of the Mexican Volcanic Belt and the Gulf of California: *Geological Society of America Bulletin*, 107, 612-626.
- Roedder, E., 1984. Fluid Inclusions: Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America, 12, 644.
- Roedder, E., 1992. Fluid inclusion evidence for immiscibility in magmatic differentiation: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56, 5-20.
- Roedder, E., 1979. Origin and significance of magmatic inclusions: *Bull. Mineral*, 102, 487-510.
- Rosas-Elguera, J., Ferrari, L., Garduño-Monroy, V., Urrutia-Fucugauchi, J., 1996. Continental boundaries of the Jalisco Block in the Pliocene- Quaternary kinematics of western Mexico: *Geology*, 24, 921-924.
- Rossotti, A., Ferrari, L., López-Martínez, M., Rosas-Elguera, Jose., 2002 Geology of the boundary between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt in the Guadalajara region, western Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19, 1-15.
- Ruth, D.C.S., Costa, F., Bouvet de Maisonneuve, C., Franco, L., Cortés, J. A., Calder, E. S., 2018. Crystal and melt inclusion timescales reveal the evolution of magma migration before eruption: *Nature Communications*, 9:2657.
- Rutherford, MJ., and Devine, J.D. 1988. The May 18, 1980 eruption of Mount St. Helens: III. Stability and chemistry of amphibole in the magma chamber. *Journal of Geophysical Research*, 93,11949-11959.
- Rutherford, MJ., and Devine, J.D. 1995. Pre-eruption P-T conditions and volatiles in the 1991 Pinatubo magma. In R.S. Punongbayan and e.G. Newhall, Eds., *The 1991 eruptions of Pinatubo volcano, Philippines*. U.S. Geological Survey Special Publication, in press.
- Schaaf, P., Morán-Zenteno, D., Hernández-Bernal, M., Solís-Pichardo, G., Tolson, G., Köhler, H., 1995. Paleogene continental margin truncation in southwestern Mexico: geochronological evidence: *Tectonics*, 14(5), 1339-1350.
- Shand, S.J. (1943) *Eruptive Rocks. Their Genesis Composition. Classification, and Their Relation to Ore-Deposits with a Chapter on Meteorite*. John Wiley & Sons, New York.
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H., Alderton, D.H., 1985. *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies*. Blackie & Sons, Glasgow.
- Silver, L.A., Ihinger P, D., Stolper E., 1990. The influence of bulk composition on the speciation of water in silicate glasses: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104:142-162.
- Sorby, H. C., 1858. On the microscopic structures of crystals, indicating the origin of minerals and rocks. *Journal of the Geological Society of London*, 14, 453–500.
- Sosa-Ceballos G., Gardner E.J., Siebe C., Macías J.L., 2012. A calderaforming eruption *14100 14C yr BP at Popocatepetl volcano, México: insights from eruption dynamics and magma mixing. *Journal of Volcanology Geotherm, Res* 213–214:27–40
- Sosa-Ceballos, G., Macías, J.L., Avellán, D.R., Salazar-Hermenegildo, N., Boijseauneau-López, M.E., Pérez-Orozco, J.D., 2018. The Aocolco Caldera Complex magmas: Genesis, evolution and relation whit the Aocolco geothermal system: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 358, 288-306.
- Sourisseau, D., (Trabajo en proceso). Erupciones plinianas asociadas a la actividad post-caldera de La Primavera, Jalisco, México. Tesis de doctorado. IGUM.
- Stolper, E., 1982. Water in Silicate Glasses: An Infrared Spectroscopic Study: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 81: 1-17.
- Sun, S. S. & McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In:Saunders, A. D. & Norry, M. J(eds) *Magmatism in the Oceanic Basins*. Geological Society, London, Special Publications 42, p 313-345.

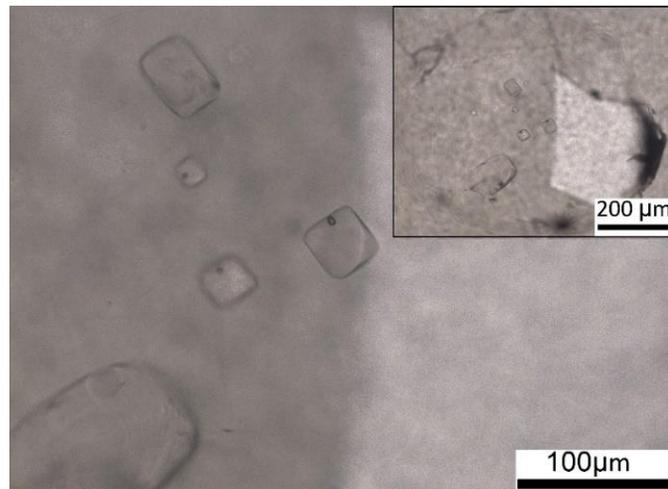
- Thomas, R., 2000. Determination of water contents of granite melt inclusion by confocal laser Raman microprobe spectroscopy: *American Mineralogist*, 85, 868-872.
- Tinoco Murillo, Z.S., 2017. Génesis y mecanismos de emplazamiento de la pómez gigante de la Caldera de La Primavera, Jalisco. Tesis de Maestría en Geociencias y Planificación de Territorio. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo. 95.
- Touret, J.L.R., Frezzotti, M.-L., 1993. Magmatic remnants in plutonic rocks. *Bulletin de la Societe Geologique de France*. 164 II., 229–242.
- Van de Kerkhof, A. M., Hein, U. F., 2001. Fluid inclusion petrography: *Lithos*, 55, 27-47.
- Walker, G. P. L., Auckland., Wright, J. V., Clough, B. J., Booth, B., 1981. Pyroclastic geology of the rhyolitic volcano of La Primavera, Mexico: *Aufsätze*, 1100-1118.
- Witter, J.B., Kress V.C., Newhall, C.G., 2005. Volcan Popocatepetl, Mexico. Petrology, magma mixing, and immediate source of volátiles for the 1994-present eruption: *Journal of Petrology*, 41:1397-1411.
- Wright, J. V., 1981. The Rio Caliente Ignimbrite: Analysis of a Compound Intraplinian ignimbrite from a Major Late Quaternary Mexican Eruption: *Bull Volcano*, 44-2, 189- 213.
- Wright, J. V., 1983. Reply to A Discussion of the Rio Caliente Ignimbrite: Analysis of a Compound Intraplinian Ignimbrite from a Major Late Quaternary Mexican Eruption>> by G.A. Mahood: *Bull Volcano*, 46-2.
- Yokoyama, I., Mena, M., 1991. Structure of a La Primavera caldera, Jalisco, Mexico, deduced from gravity anomalies and drilling results: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 47, 183-193.
- Zajacz, Z., Halter, W., Malfait, W. J., Bachmann, M. M., Mandeville, C. W., Morizet, Y., Müntener, O., Ulmer, P., Webster, J. D., 2005. A composition-independent quantitative determination of the water content in silicate glasses and silicate melt inclusion by confocal Raman spectroscopy: *Contrib Mineral Petrol*, 150, 631-642.

Anexos

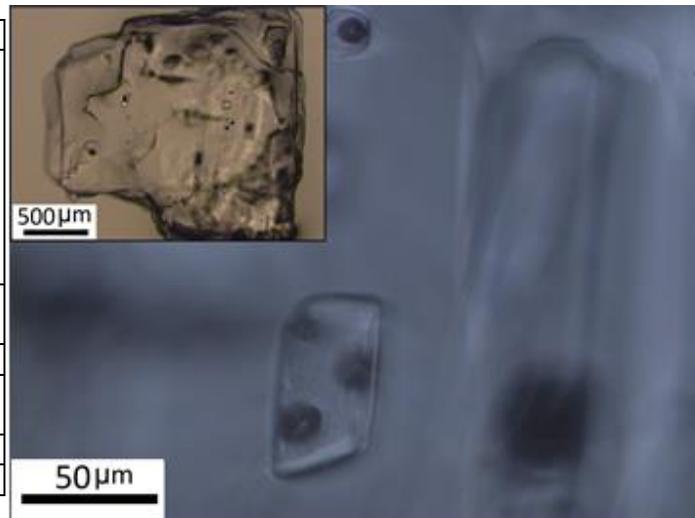
Petrografía de Inclusiones de fundido

Muestra: VM-04

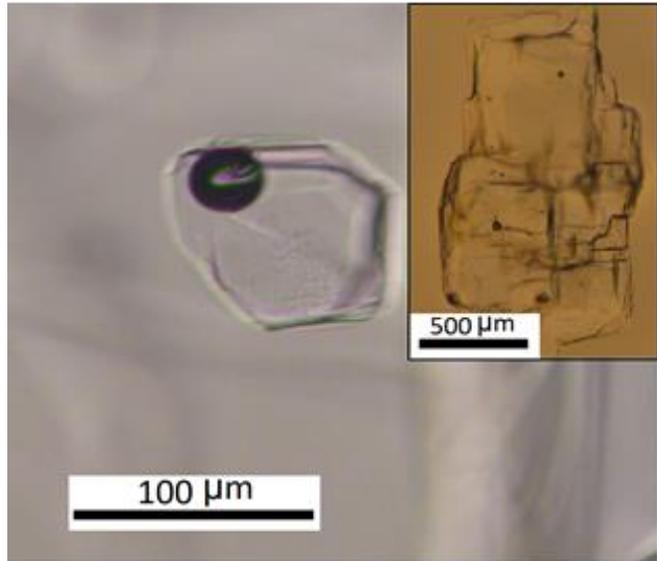
Clave	N1
Cristal	Cuarzo Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prismático Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Crucero: perfecto
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas.
Tamaño	$\sim 150\text{-}13 \mu\text{m}$
Forma	Cristal negativo, algunas más rectangulares
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas



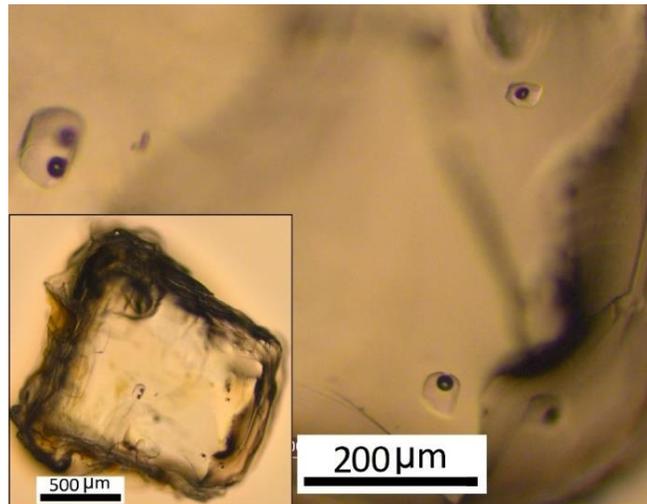
Clave	N2
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Crucero: perfecto
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas.
Tamaño	$\sim 175\text{-}15 \mu\text{m}$
Forma	Cuadradas y rectangulares (forma de cristal negativo)
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas



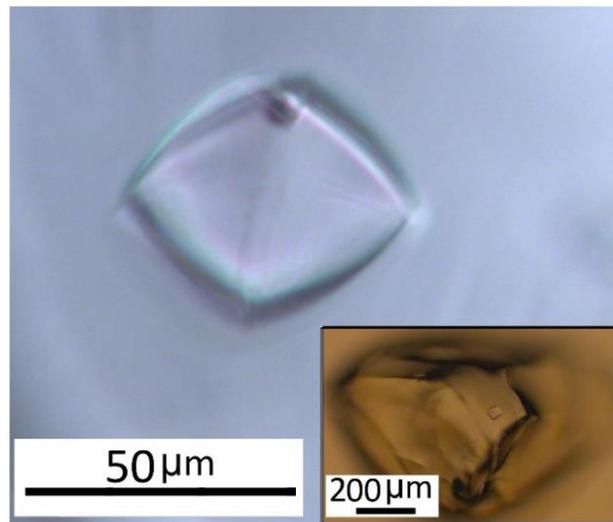
Clave	N3
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: rectangular tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Cruceo: perfecto Maclado
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas.
Tamaño	$\sim 85\text{-}10 \mu\text{m}$
Forma	Cuadradas e irregulares y alargadas
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas



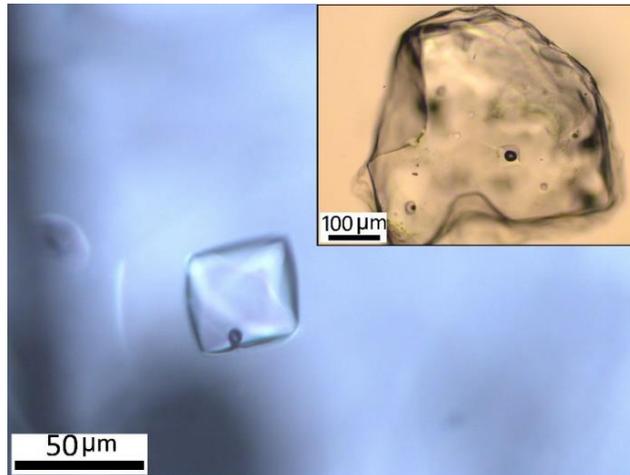
Clave	N4
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: rectangular tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Cruceo: perfecto
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas.
Tamaño	$\sim 80\text{-}35 \mu\text{m}$
Forma	Cuadradas con bordos redondeados (cristales negativos), algunas irregulares.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas



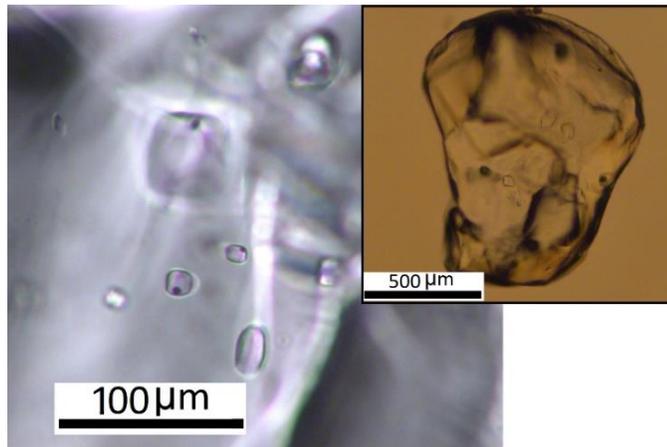
Clave	N5
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: prisma hexagonal y piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásica.
Tamaño	$\sim 50 \mu\text{m}$
Forma	Cristal negativo.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas



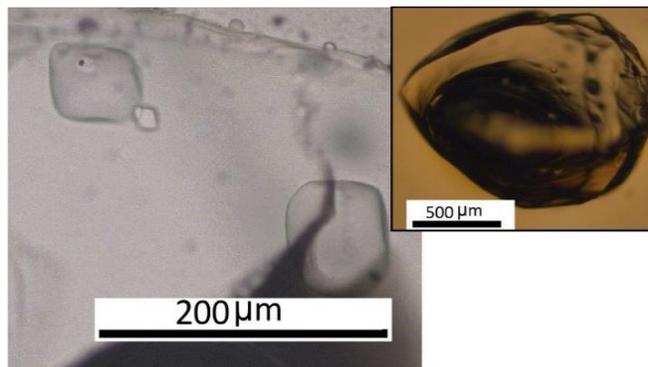
Clave	O1
Cristal	Cuarzo Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Cruceo: perfecto
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas.
Tamaño	$\sim 50\text{-}10 \mu\text{m}$
Forma	Cristal negativo
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas



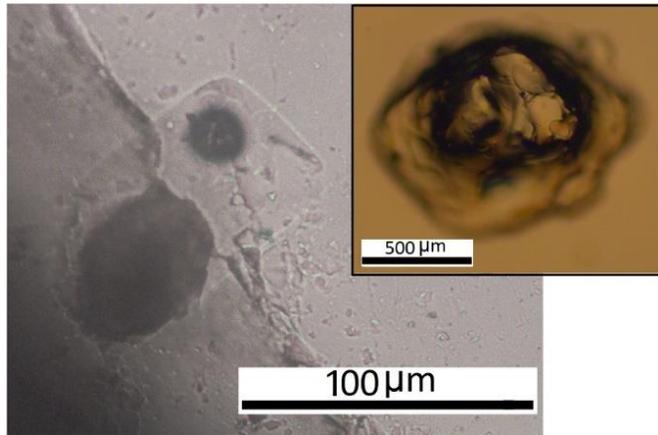
Clave	O2
Cristal	Cuarzo Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: prismática Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: conchoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas.
Tamaño	$\sim 100\text{-}10 \mu\text{m}$
Forma	Cuadradas y algunas pocas rectangulares con bordos redondeados
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas



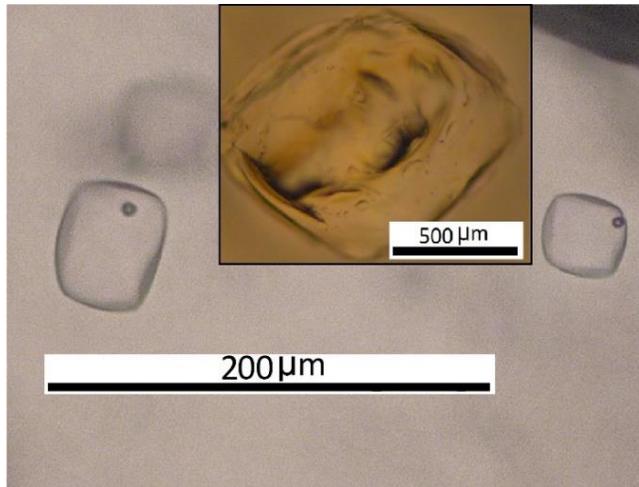
Clave	O3
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: prisma hexagonal y piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: conchoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas.
Tamaño	$\sim 85\text{-}13 \mu\text{m}$
Forma	Cristal negativo
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas



Clave	O4
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: prisma hexagonal y piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas.
Tamaño	$\sim 100 \mu\text{m}$
Forma	Cuadradas y rectangulares con bordos redondeados (Forma de cristal negativo)
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas

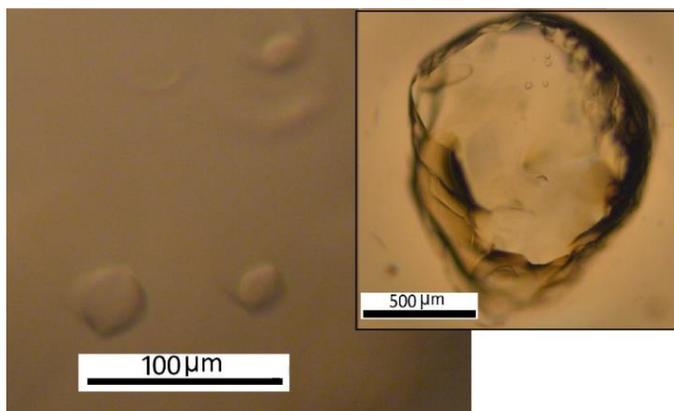


Clave	O5
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: prisma hexagonal y piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas y monofásicas.
Tamaño	$\sim 60-5 \mu\text{m}$
Forma	Cristales negativos
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas

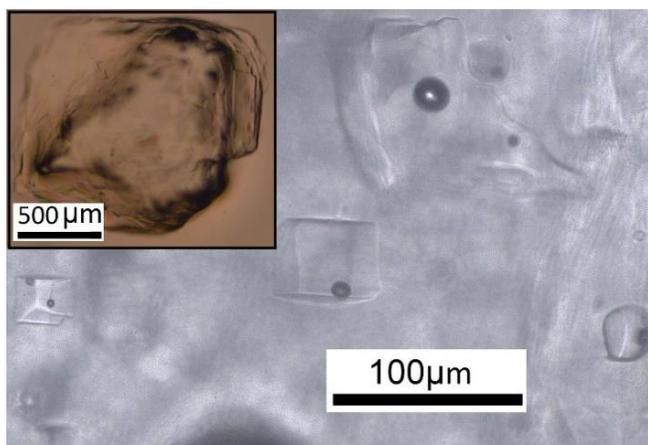


Muestra: VM-02

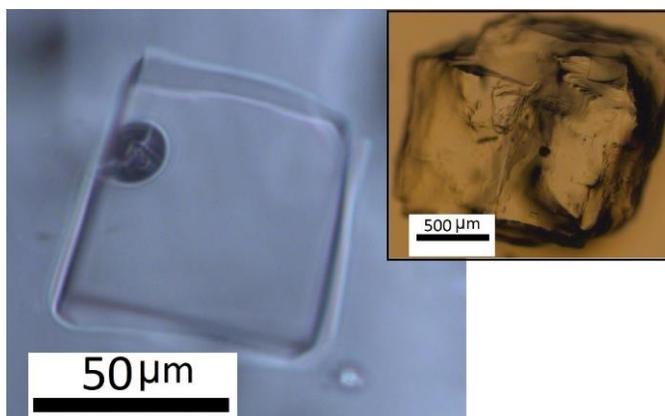
Clave	L1
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prisma hexagonal y piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas.
Tamaño	$\sim 35\text{-}17 \mu\text{m}$
Forma	Cristal negativo
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio



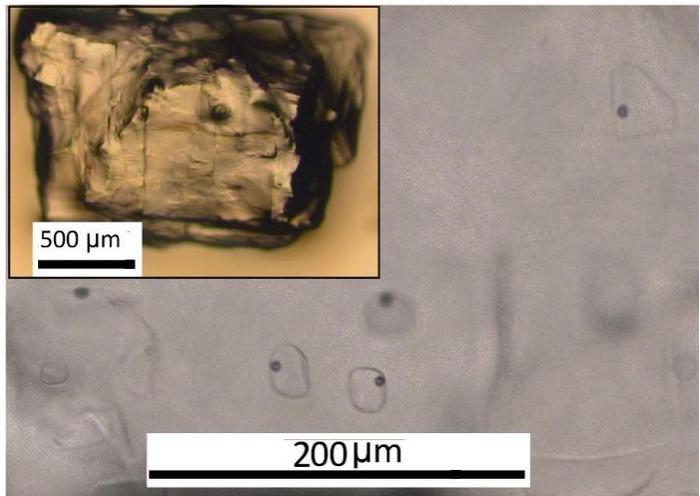
Clave	L2
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: cuadrada y tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Crucero: perfecto
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas y monofásicas.
Tamaño	$\sim 120\text{-}5 \mu\text{m}$
Forma	Rectangulares, cuadradas y algunas deformes.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas



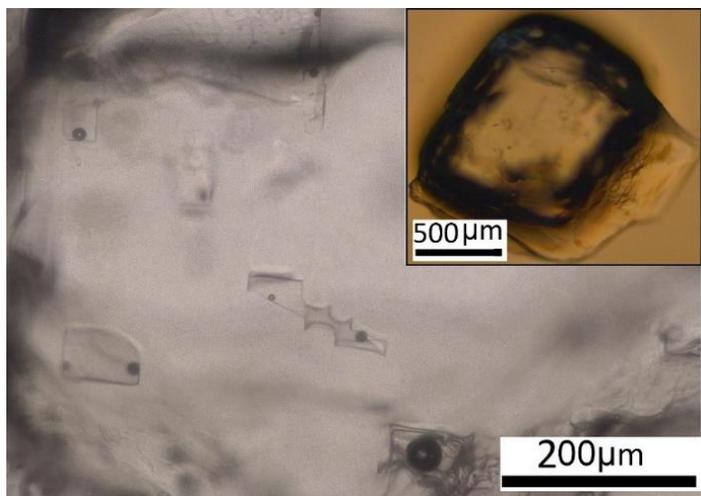
Clave	L3
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: cuadrada y tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Crucero: perfecto
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas y monofásicas
Tamaño	$\sim 70\text{-}8 \mu\text{m}$
Forma	Cuadradas (forma de cristal negativo), y algunas un poco irregulares.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio, gas y solido



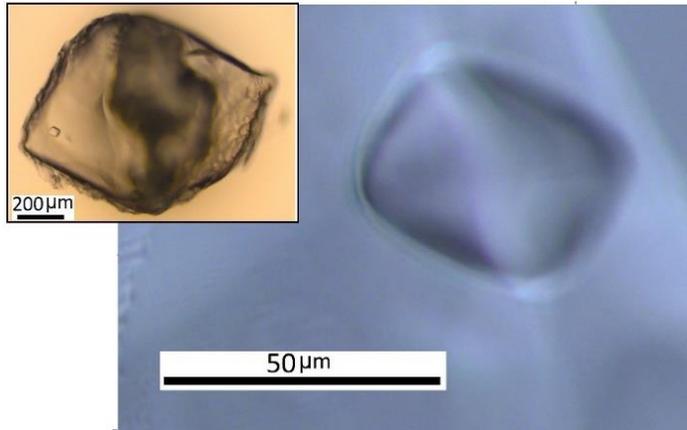
Clave	L4
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: rectangular y tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Cruceo: perfecto Maclado
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas y monofásicas.
Tamaño	$\sim 40\text{-}15 \mu\text{m}$
Forma	Cuadradas y rectangulares (cristales negativos), alargadas e irregulares.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio, gas y solido



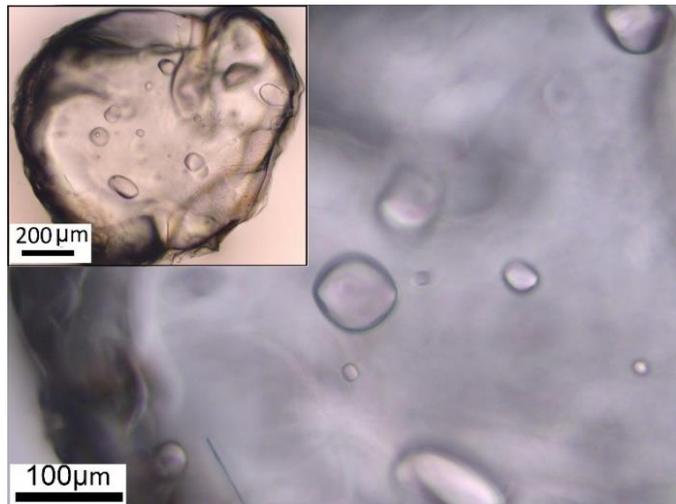
Clave	L5
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prisma piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: conchoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas
Tamaño	$\sim 80\text{-}20 \mu\text{m}$
Forma	Rectangulares y cuadradas, algunas inclusiones parece que se unieron y tienen forma irregular, también hay alargadas.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gases.



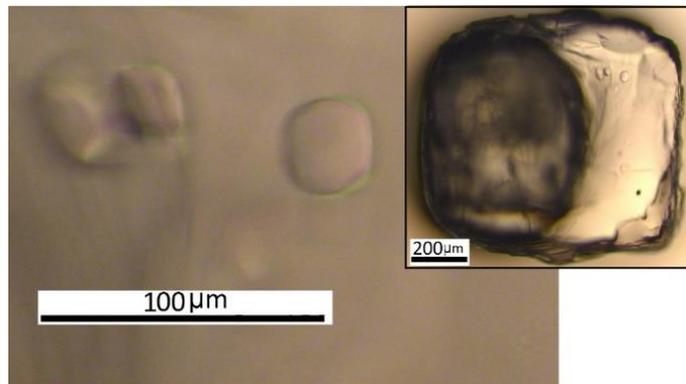
Clave	M1
Cristal	Cuarzo Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: prisma hexagonal y piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas.
Tamaño	$\sim 43 \mu\text{m}$
Forma	Cristales negativos
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio



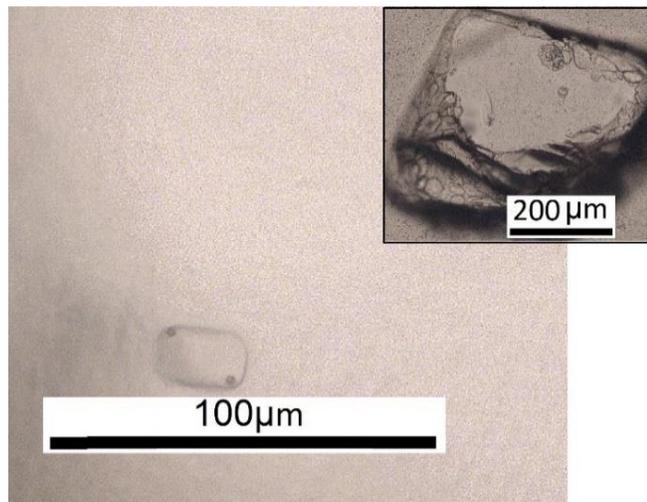
Clave	M2
Cristal	Cuarzo Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: prisma hexagonal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido a transparente Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas y bifásicas.
Tamaño	$\sim 115\text{-}6 \mu\text{m}$
Forma	Cristales negativos, algunas alargadas e irregulares.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas



Clave	M3
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Crucero: perfecto
Carácter	Intracristalinas, primarias y monofásicas
Tamaño	$\sim 33\text{-}27 \mu\text{m}$
Forma	Cristales negativos y algunos irregulares
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio, gas y solidos

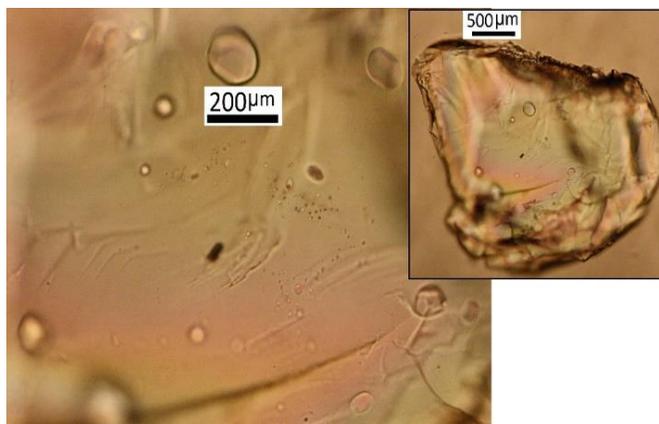


Clave	M4
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: prisma piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas y bifásicas.
Tamaño	$\sim 50\text{-}25 \mu\text{m}$
Forma	Cuadrados a rectangulares con bordos redondeados (Cristal negativo)
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas

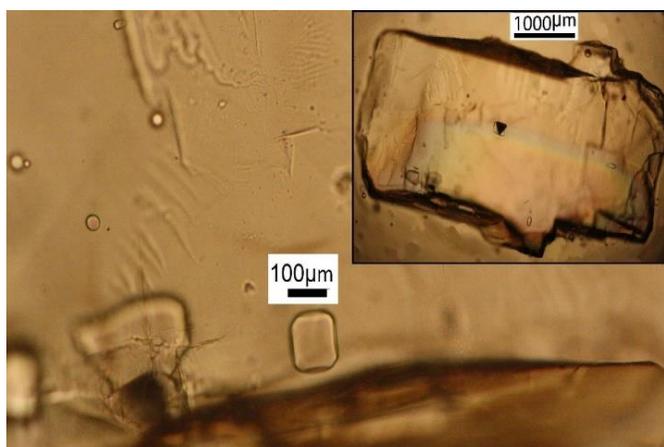


Muestra: LP16-01VM-A

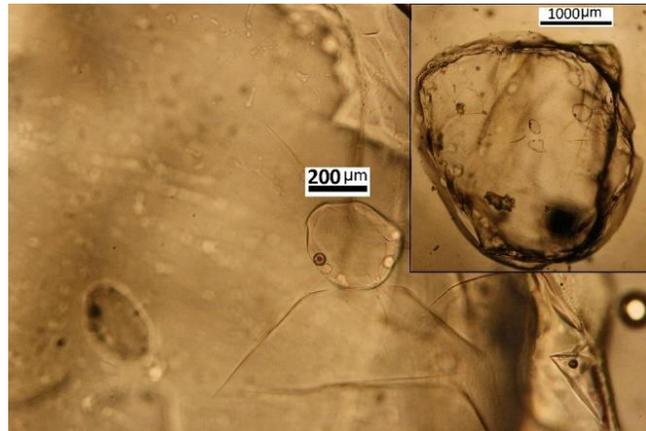
Clave	A1
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Crucero: perfecto
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas.
Tamaño	$\sim 145\text{-}7 \mu\text{m}$
Forma	Redondeadas y algunas alargadas que son pequeñas.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio



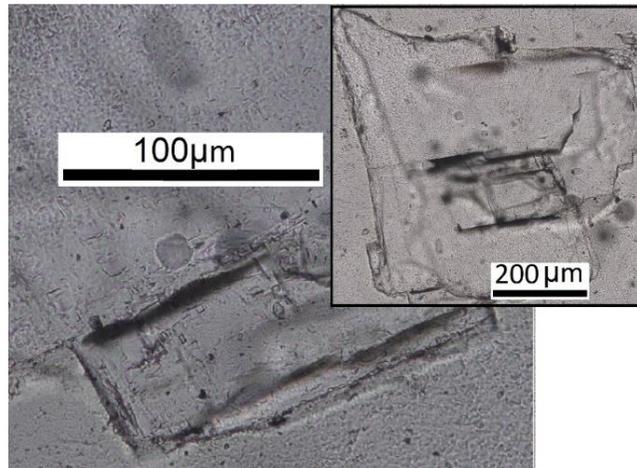
Clave	A2
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Crucero: perfecto Con Macla
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas, bifásicas y trifásicas.
Tamaño	$\sim 200\text{-}20 \mu\text{m}$
Forma	Rectangulares con bordes redondeados, cuadradas y pocas elípticas a circulares.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio, gases y sólidos



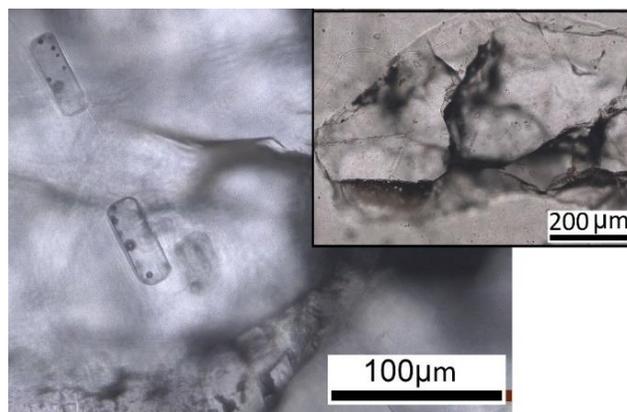
Clave	A3
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prismático Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas, primarias. Bifásicas y multifásicas.
Tamaño	$\sim 300\text{-}50 \mu\text{m}$
Forma	Redondeadas e irregulares, algunas parecieran ser paralelas a las caras del cristal (forma de cristal negativo), también hay cuadraditas y una alargada
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gases



Clave	A4
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Crucero: perfecto
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas a bifásicas
Tamaño	$\sim 35\text{-}5 \mu\text{m}$
Forma	Cuadradas (forma de cristal negativo) y rectangulares con bordos redondeados
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gases

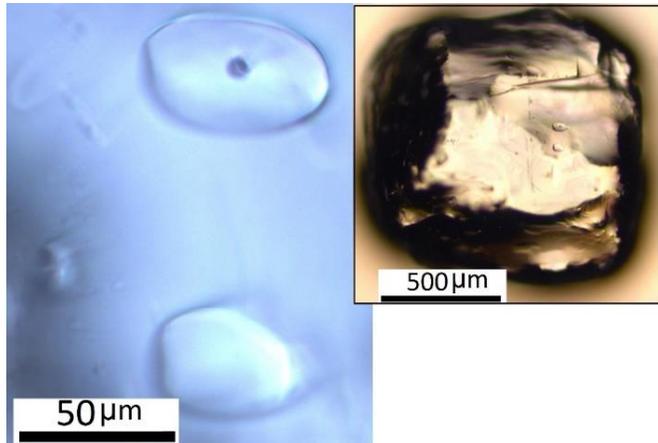


Clave	A5
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: transparente Fractura: irregular Crucero: perfecto
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas
Tamaño	$\sim 52\text{-}18 \mu\text{m}$
Forma	Cuadradas y rectangulares (formas de cristal negativo),

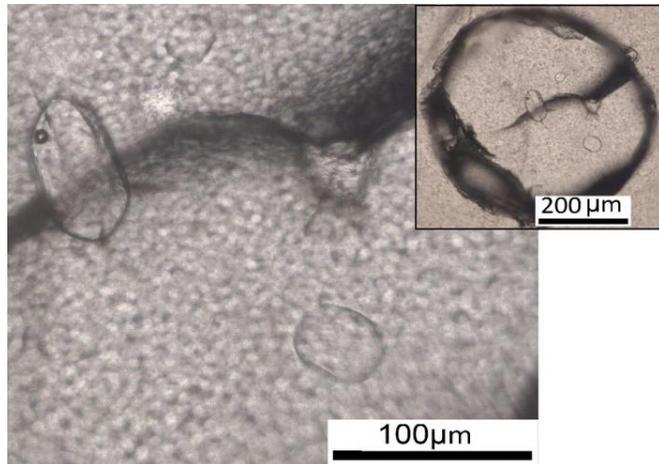


	algunas un poco irregulares que tienden a una forma triangular
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gases

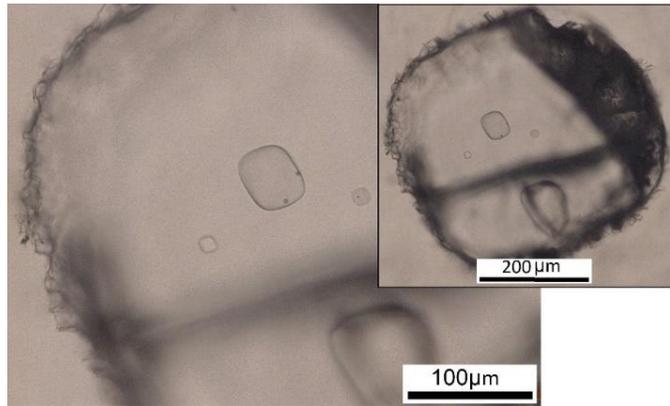
Clave	B1
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prismático Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas y bifásicas
Tamaño	$\sim 58-16 \mu\text{m}$
Forma	Redondeadas a ovaladas, algunas un poquito deformadas, también hay unas alargadas que sigue una tendencia lineal
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas



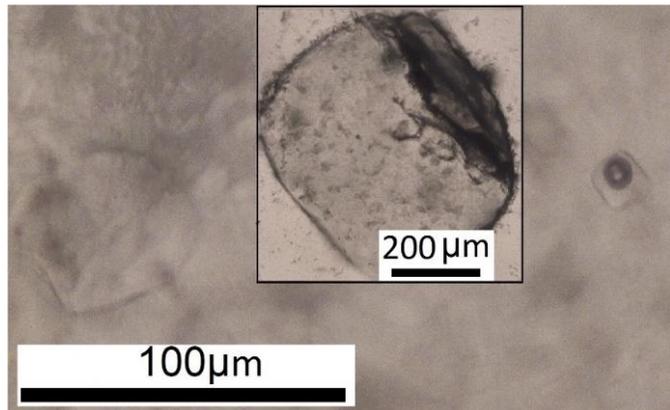
Clave	B2
Cristal	Cuarzo Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: prismático, pirámide hexagonal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas y bifásicas
Tamaño	$\sim 70-25 \mu\text{m}$
Forma	Cuadradas con bordos redondeados, y la más grande está más alargada.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas



Clave	B3
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 500 \mu\text{m}$ Forma: prismático, pirámide hexagonal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: ausente
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas a monofásicas
Tamaño	$\sim 122\text{-}22 \mu\text{m}$
Forma	De cristal negativo
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas
Grado de relleno:	$(G \pm V_1 \pm V_2)$, $(G \pm V_1)$ y (G)

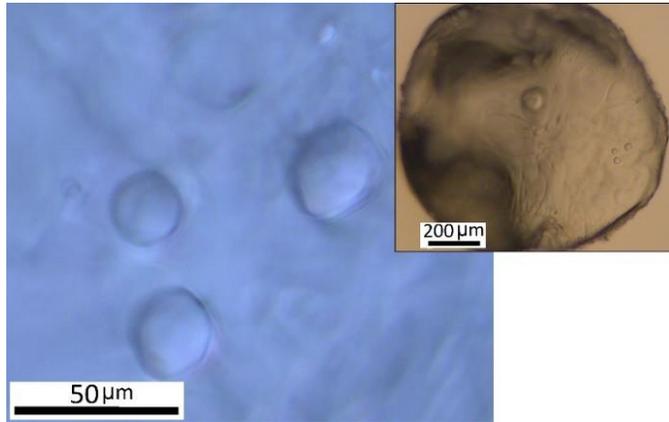


Clave	B4
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 500 \mu\text{m}$ Forma: prisma piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: ausente
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas y monofásicas
Tamaño	$\sim 52\text{-}16 \mu\text{m}$
Forma	Cuadradas con forma de cristal negativo
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gases
Grado de relleno:	$(G \pm V_1)$ y (G)

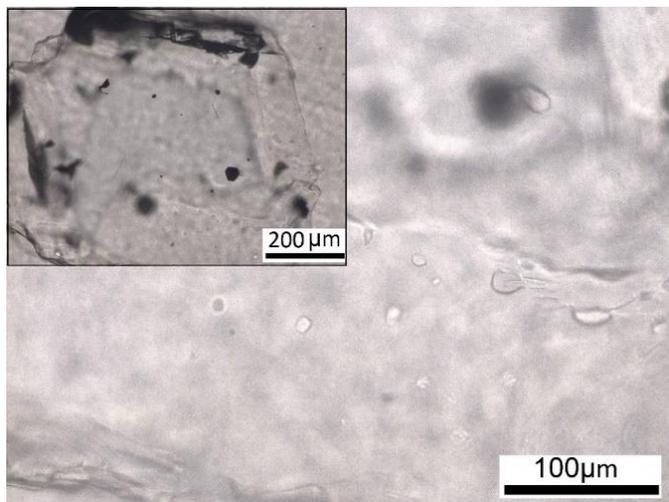


Muestra: LP16-01VM-B

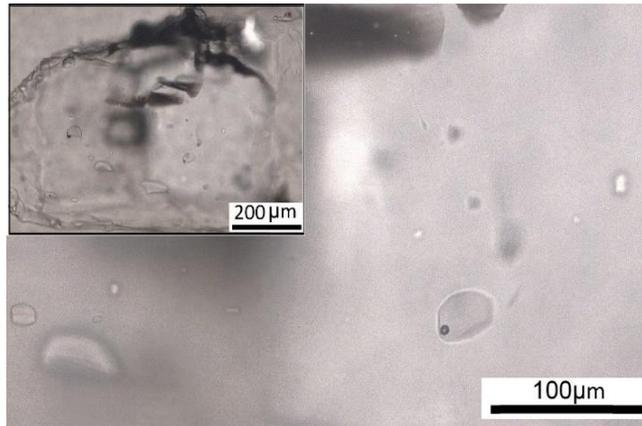
Clave	C1
Cristal	Cuarzo Tamaño $\geq 500 \mu\text{m}$ Forma: prisma piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas
Tamaño	$\sim 30\text{-}6 \mu\text{m}$
Forma	Redondeadas, algunas con forma de cristal negativo.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio



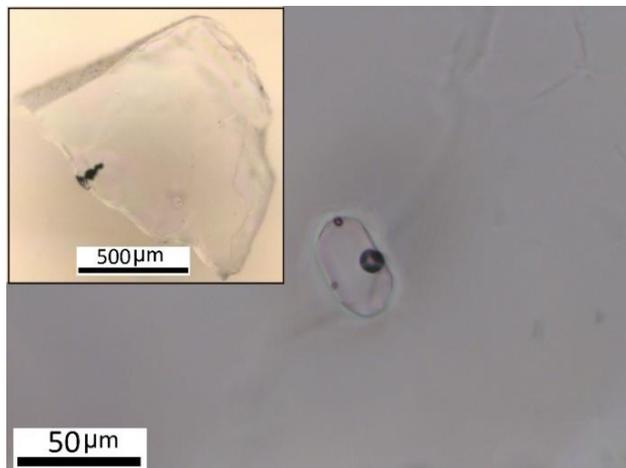
Clave	C2
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: transparente Fractura: irregular Crucero: perfecto
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas y monofásicas
Tamaño	$\sim 35\text{-}5 \mu\text{m}$
Forma	Redondeadas y algunas cuadradas con bordos redondeados, y unas pequeñas que son alargadas.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio, gases y solido



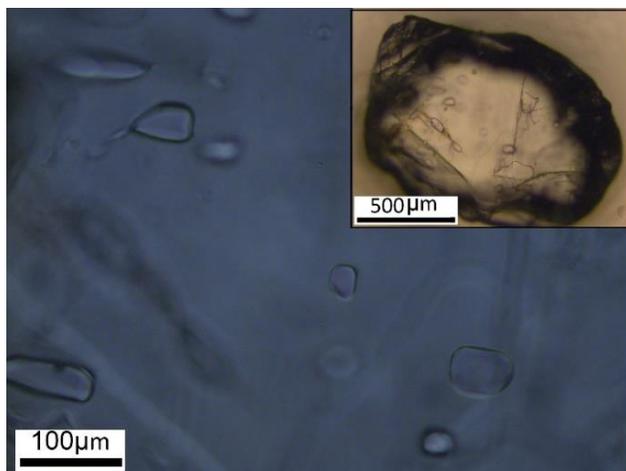
Clave	C3
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Crucero: perfecto
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas y bifásicas.
Tamaño	$\sim 83\text{-}8 \mu\text{m}$
Forma	Algunas tienen formas de cristal negativo y otras están un poco deformes, algunas inclusiones parecen estar alteradas
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas



Clave	C4
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: transparente Fractura: irregular, está roto Crucero: perfecto
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas y monofásica.
Tamaño	$\sim 40\text{-}10 \mu\text{m}$
Forma	Rectangular con borde algo redondeadas, también hay redondeadas
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio, gas y solidos

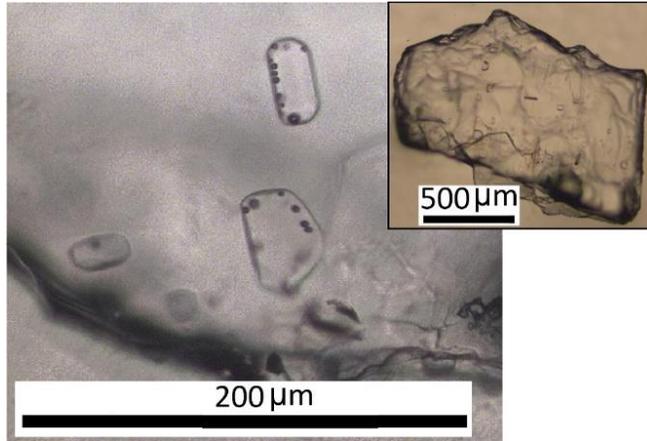


Clave	C5
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: tabular a prismático Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas y monofásicas
Tamaño	$\sim 88\text{-}12 \mu\text{m}$
Forma	Redondeadas a elípticas un poco deformes, cuadradas con bordes redondeadas y algunas alargadas

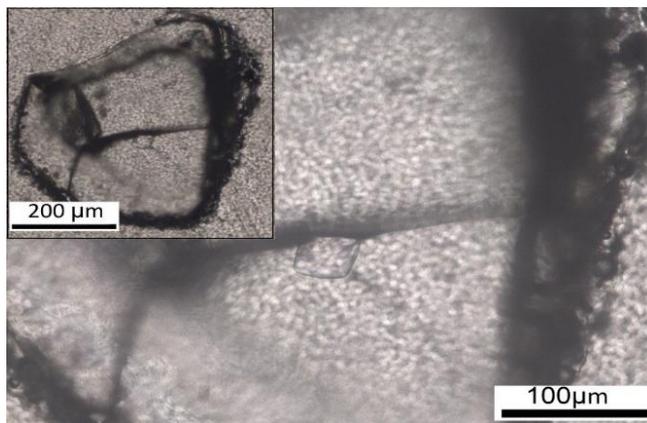


Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio, gases y solido

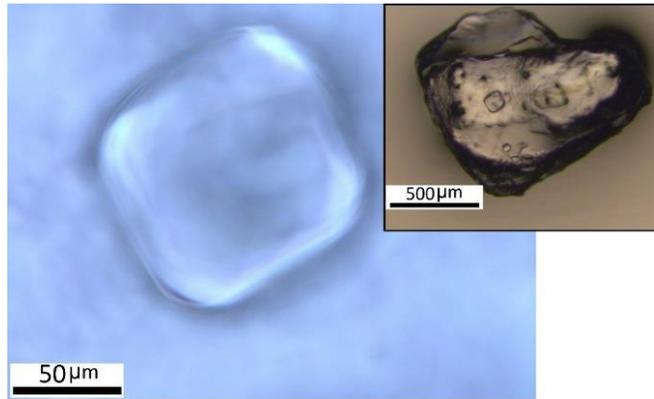
Clave	D1
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Crucero: perfecto
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas y monofásicas
Tamaño	$\sim 47\text{-}12 \mu\text{m}$
Forma	Rectangulares (Formas de cristal negativo), cuadradas, pocas redondeadas y algunas están poco deformes, también hay unas alargadas muy delgadas como cabellos.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio



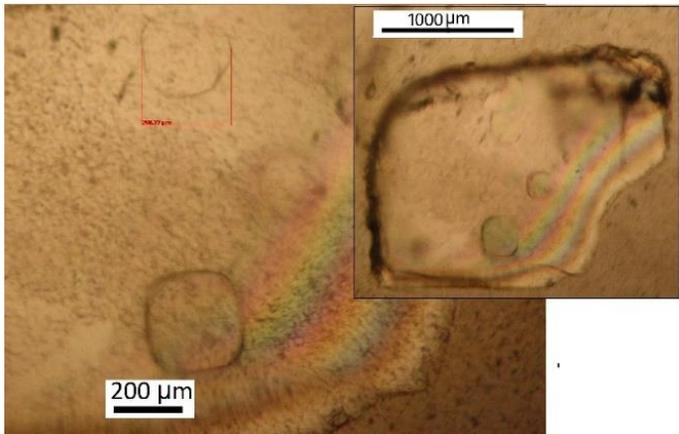
Clave	D2
Cristal	Cuarzo Tamaño $\geq 500 \mu\text{m}$ Forma: prisma piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: conchoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas
Tamaño	$\sim 45\text{-}9 \mu\text{m}$
Forma	Cuadradas con bodes redondeados (forma de cristal negativo) y un ovalada
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio, gas y solido



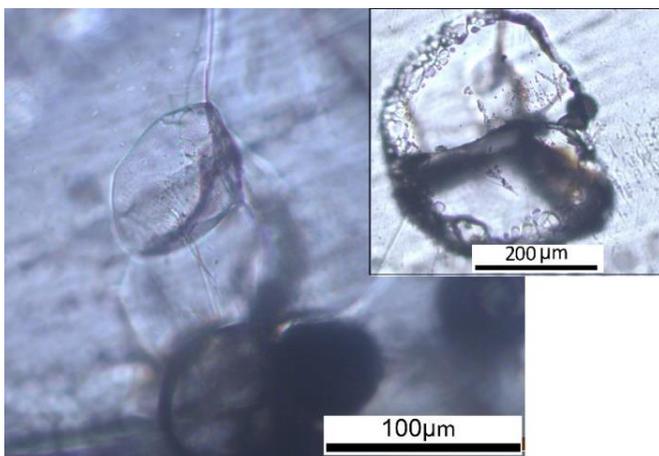
Clave	D3
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: prismático Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoidal Cruce: perfecto
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas y bifásicas.
Tamaño	$\sim 108-35 \mu\text{m}$
Forma	Cuadradas con bordos redondeados (forma de cristal negativo), otras más grandes están un poco deformes
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio, gases y sólido



Clave	D4
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prisma piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide, está roto
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas y bifásicas.
Tamaño	$\sim 280-100 \mu\text{m}$
Forma	Cristal negativo
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gases

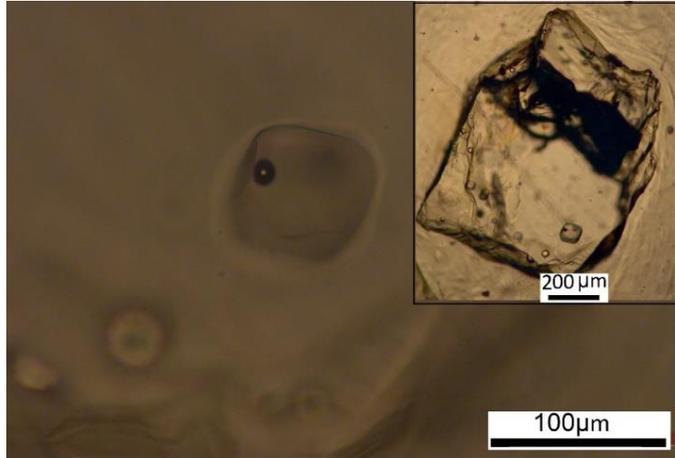


Clave	D5
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 500 \mu\text{m}$ Forma: prisma piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas
Tamaño	$\sim 90-30 \mu\text{m}$
Forma	Las más pequeñas de cristal negativo y las más grandes poco deformadas
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio

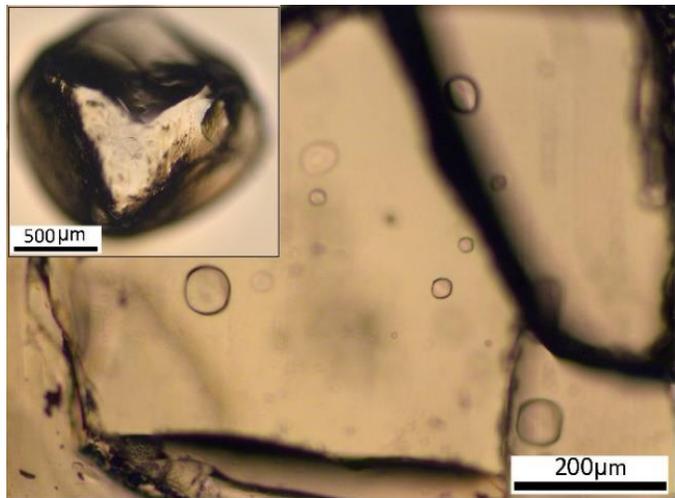


Muestra: LP16-01VM-D

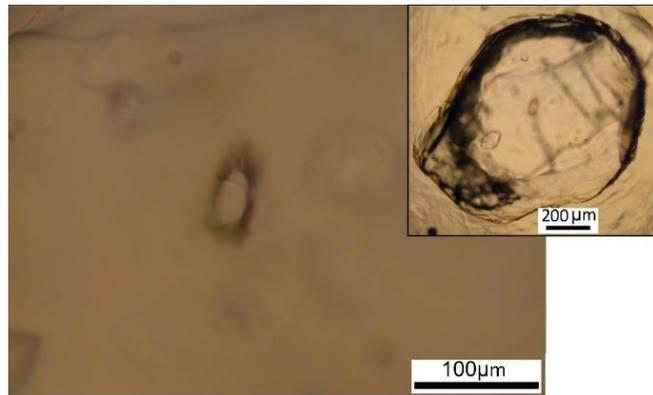
Clave	E1
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prismático Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide Crucero: perfecto
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas y bifásicas
Tamaño	$\sim 72\text{-}30 \mu\text{m}$
Forma	Cuadradas con bordes redondeados (forma de cristal negativo, y unas pocas rectangulares a ovaladas).
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gases



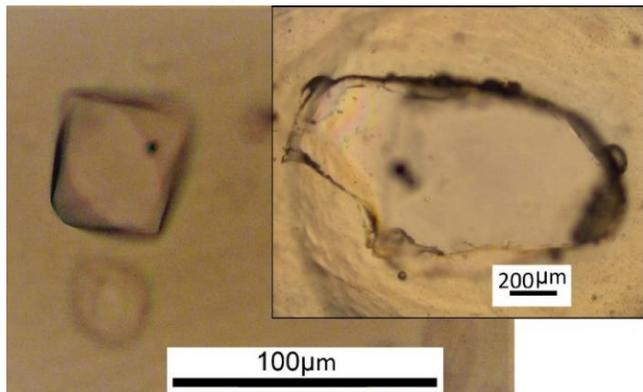
Clave	E2
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prisma bipiramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas
Tamaño	$\sim 55\text{-}18 \mu\text{m}$
Forma	Cristal negativo
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio



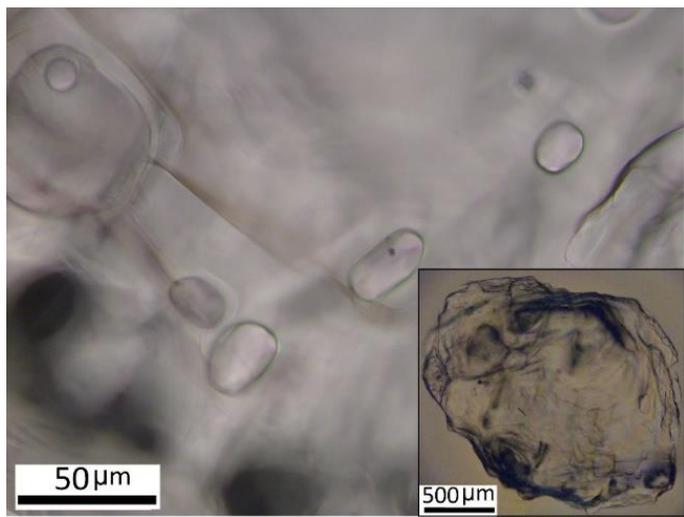
Clave	E3
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prisma piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido a transparente Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas
Tamaño	$\sim 240\text{-}50 \mu\text{m}$
Forma	De cristal negativo, algunos un poco irregulares
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio



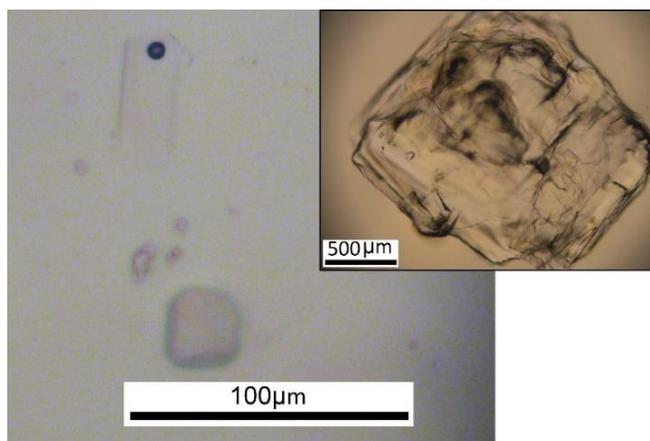
Clave	E4
Cristal	Cuarzo Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prisma piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido a transparente Fractura: concoide, está roto casi por la mitad
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas y bifásicas
Tamaño	$\sim 47\text{-}15 \mu\text{m}$
Forma	Cristal negativo
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio, gas y solidos



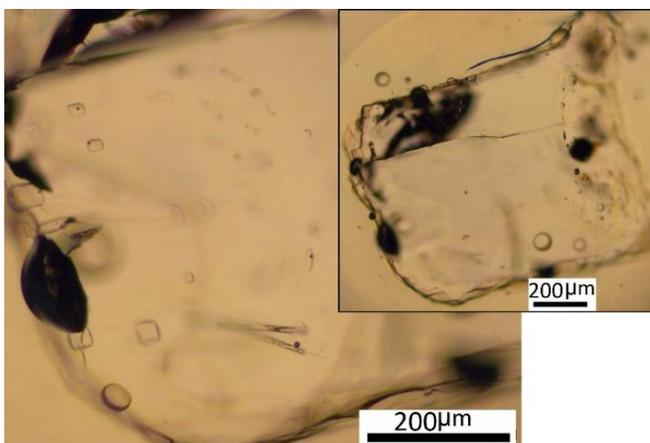
Clave	E5
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prismático a tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Crucero: perfecto
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas y bifásicas.
Tamaño	$\sim 57\text{-}10 \mu\text{m}$
Forma	Redondeadas e irregulares, algunas un poco cuadradas en forma de cristal negativo.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio



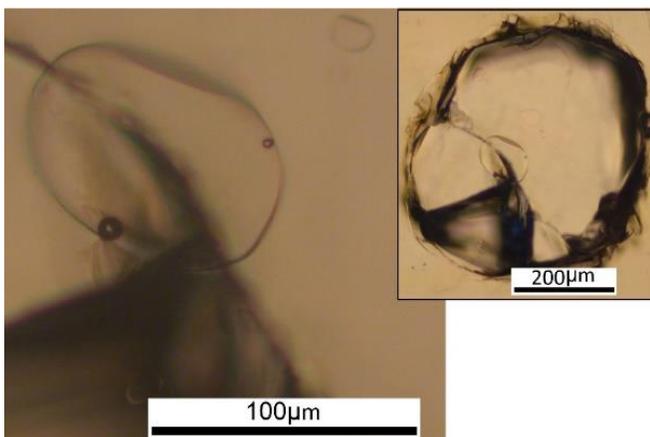
Clave	F1
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Crucero: perfecto
	Intracristalinas y primarias. Bifásicas y monofásicas
Tamaño	$\sim 53\text{-}5 \mu\text{m}$
Forma	Cuadradas con bordes redondeados (cristal negativo), algunas rectangulares, y otras un poco ovaladas
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gases



Clave	F2
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: tabular Color: incoloro, con algunas impurezas amarillas Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Crucero: perfecto
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas y bifásicas.
Tamaño	$\sim 173\text{-}9 \mu\text{m}$
Forma	Cuadradas, unas un poco deformes y también hay delgaditas y largas.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio, gases y solidos

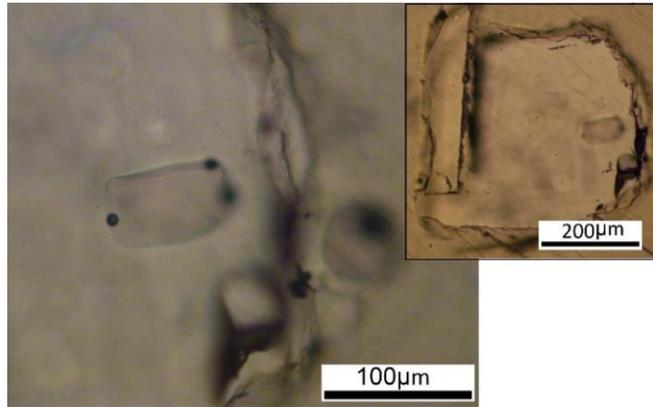


Clave	F3
Cristal	Cuarzo Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: prisma piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. monofásicas y bifásicas.
Tamaño	$\sim 100\text{-}15 \mu\text{m}$
Forma	Tienden a ser como de cristal negativo, unas pocas alargadas.

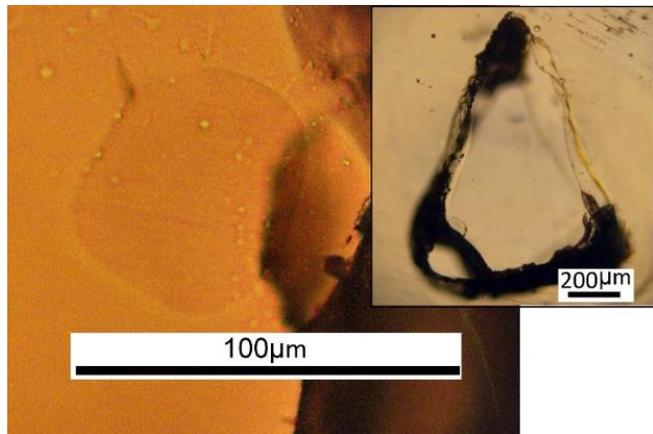


Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gases

Clave	F4
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Crucero: perfecto Maclado
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas y bifásicas.
Tamaño	$\sim 87\text{-}25 \mu\text{m}$
Forma	Rectangulares con bordes redondeados y cuadradas (cristal negativo)
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gases

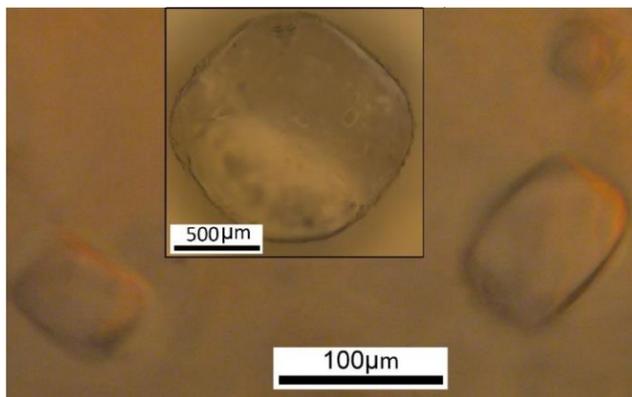


Clave	F5
Cristal	Cuarzo Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: prisma piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide, está roto y le da una forma triangular
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas.
Tamaño	$\sim 64 \mu\text{m}$
Forma	Cristales negativos
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas

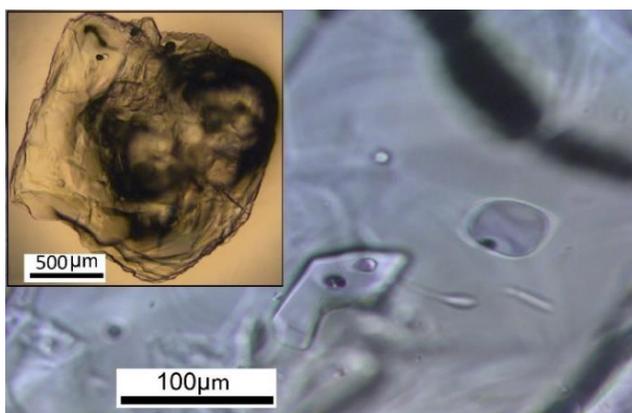


Muestra: LP16-01VM-D2

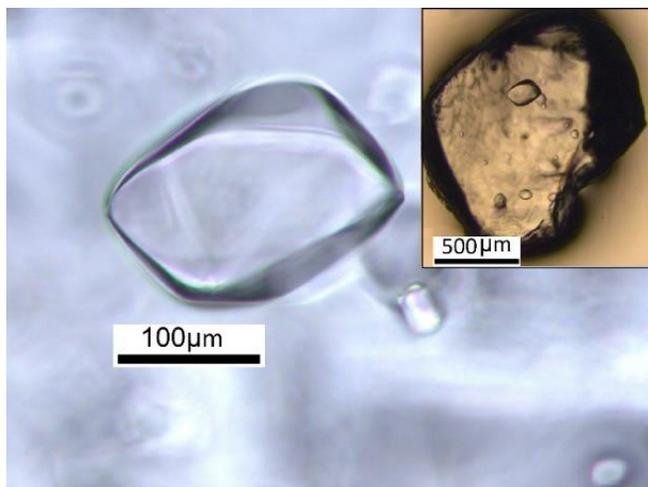
Clave	G1
Cristal	Cuarzo Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prisma bipiramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido a transparente
Carácter	Intracristalinas, primarias y monofásicas
Tamaño	$\sim 108\text{-}35 \mu\text{m}$
Forma	Cuadradas con bordes redondos (forma de cristal negativo)
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio



Clave	G2
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Crucero: perfecto
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas y monofásicas.
Tamaño	$\sim 83\text{-}13 \mu\text{m}$
Forma	Cuadradas, rectangulares, y algunas irregulares.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas

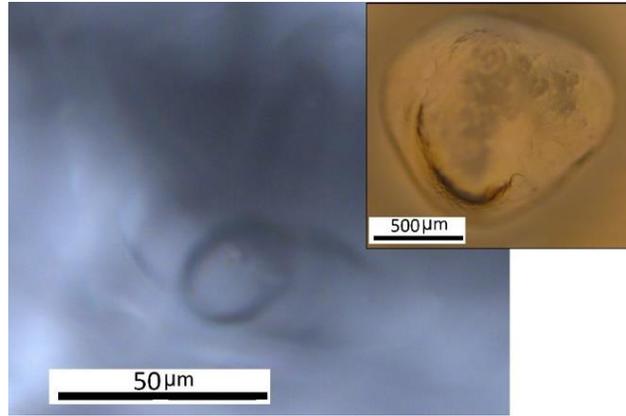


Clave	G3
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prisma piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas.
Tamaño	$\sim 173\text{-}23 \mu\text{m}$
Forma	Cuadradas con bordes redondeados (forma de cristal negativo).

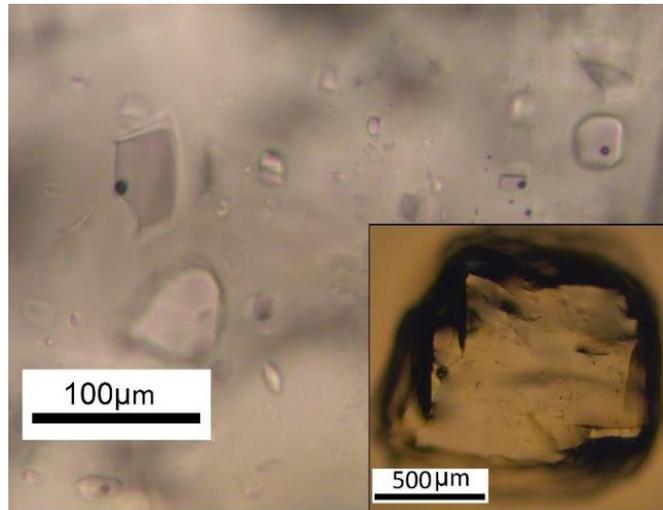


Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio

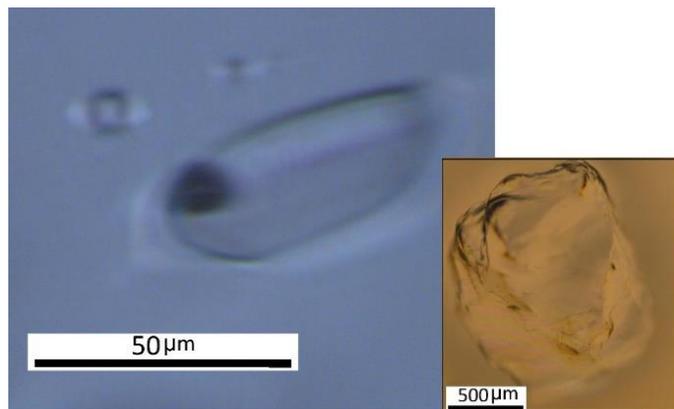
Clave	G4
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prisma bipiramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: sin fracturas
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas.
Tamaño	$\sim 30\text{-}5 \mu\text{m}$
Forma	Cuadradas con bordos redondeados (forma de cristal negativo).
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas



Clave	G5
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: tabular a prismático Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Crucero: perfecto
Carácter	Cristal negativo y algunas un poco irregulares.
Tamaño	$\sim 84\text{-}5 \mu\text{m}$
Forma	Redondeadas y algunas alargadas que son pequeñas
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas

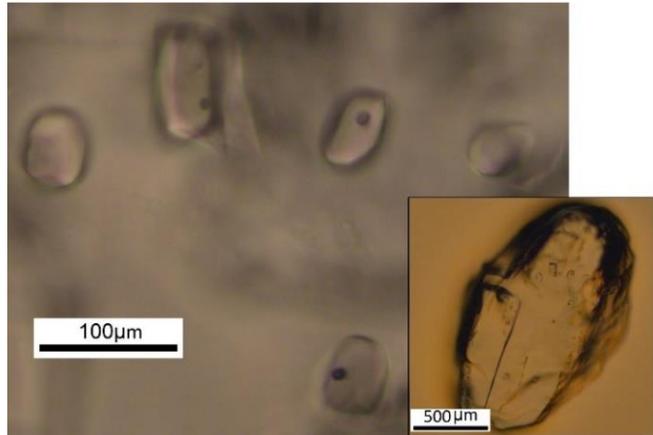


Clave	H1
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: tabular Color: incoloro con impurezas de color amarilllo Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Crucero: perfecto
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas y monofásicas
Tamaño	$\sim 53\text{-}5 \mu\text{m}$

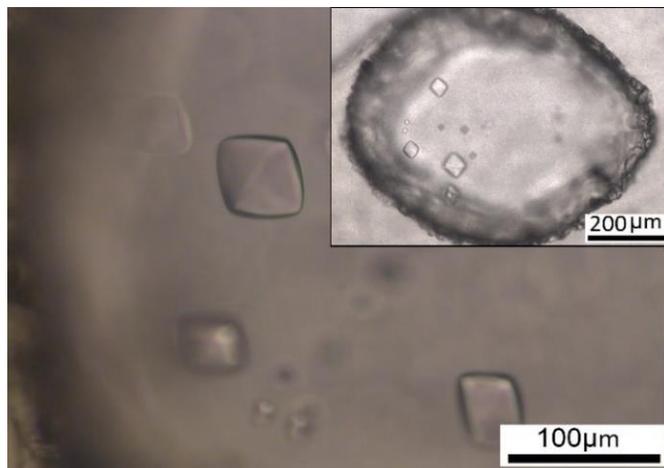


Forma	Alargadas con bordos redondeados tipo elípticas, y algunas cuadradas.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas

Clave	H2
Cristal	Sanidino Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: tabular Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: irregular Crucero: perfecto Maclado
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas y monofásicas.
Tamaño	$\sim 87\text{-}10\mu\text{m}$
Forma	Cuadradas y rectangulares con bordos redondeados, algunas un poco irregulares.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio gases y solido

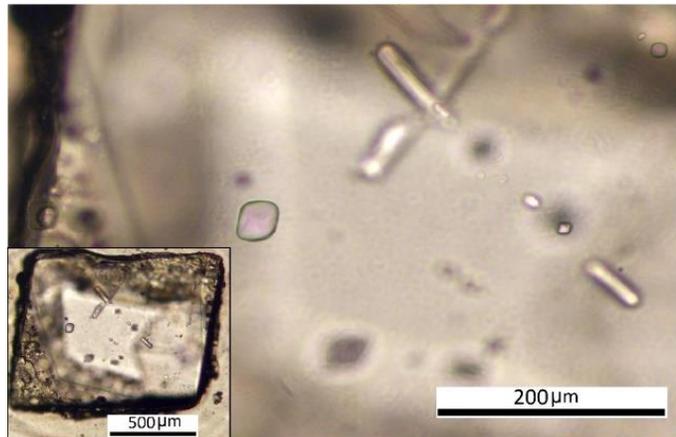


Clave	H3
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 710 \mu\text{m}$ Forma: prisma piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: sin fracturas
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas.
Tamaño	$\sim 52\text{-}10 \mu\text{m}$
Forma	Cristal negativo
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio

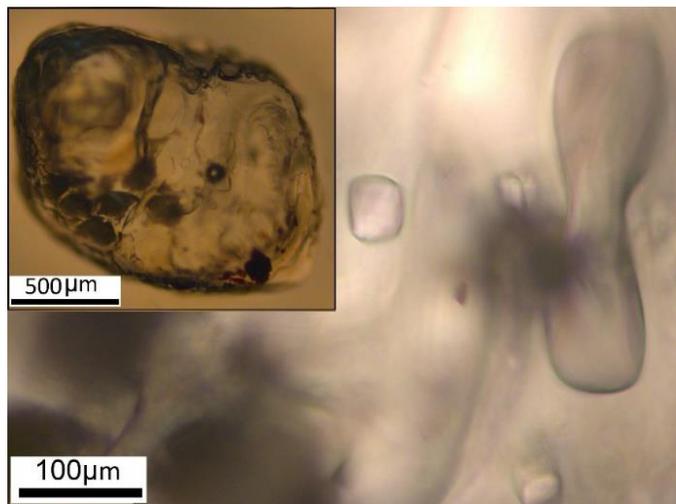


Muestra: LP16-02VM

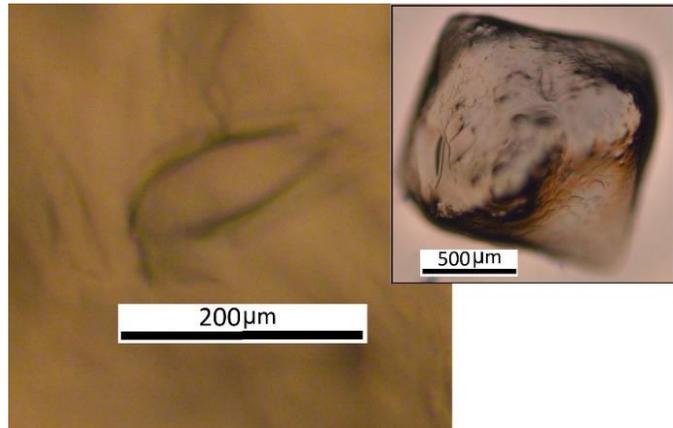
Clave	J1
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prisma piramidal Color: incoloro, con algunas manchas amarillas. Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: sin fracturas
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas y bifásicas.
Tamaño	$\sim 176-6 \mu\text{m}$
Forma	Cristales negativos, y hay algunas alargadas que están en línea recta.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas



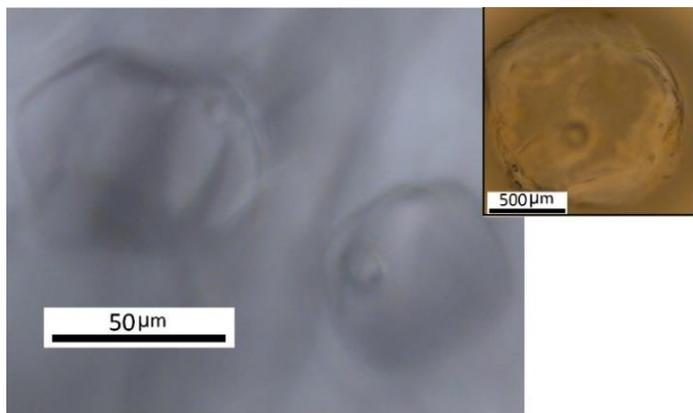
Clave	J2
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prisma piramidal Color: incoloro, con algunas impurezas color rojizo. Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas
Tamaño	$\sim 300-22 \mu\text{m}$
Forma	Algunas con forma de cristal negativo, otras algo deformadas y algunas pequeñas alargaditas
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y solidos



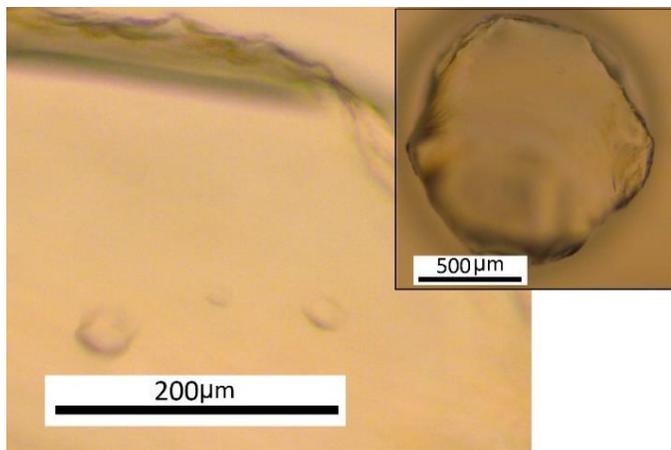
Clave	J3
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prisma bipiramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. monofásicas y bifásicas
Tamaño	$\sim 183\text{-}22 \mu\text{m}$
Forma	De cristal negativo, largas y algunas deformadas.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio, gas y solidos



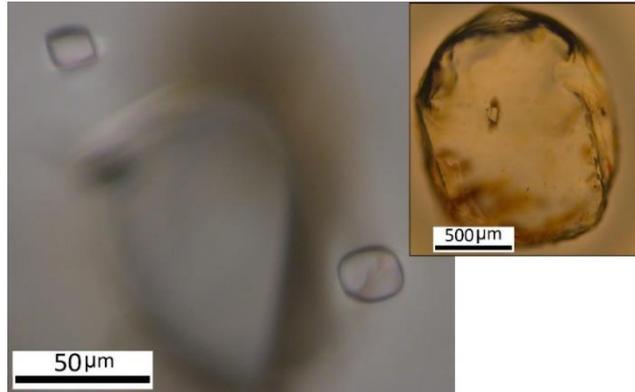
Clave	J4
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prisma bipiramidal Color: incoloro, con algunas impurezas de color rojizo. Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: sin fractura
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas
Tamaño	$\sim 75\text{-}50 \mu\text{m}$
Forma	Cristal negativo
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio



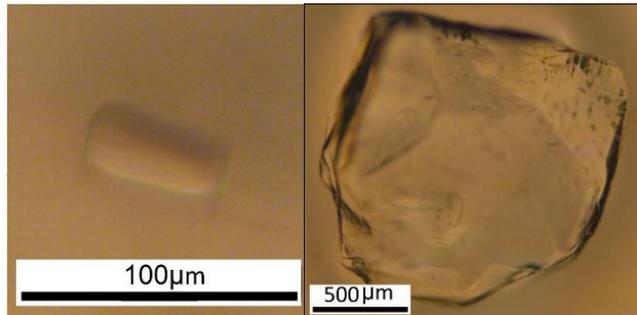
Clave	J5
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prisma piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas y bifásicas.
Tamaño	$\sim 41\text{-}14 \mu\text{m}$
Forma	Cristal negativo, alargada y poco deformes.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas.



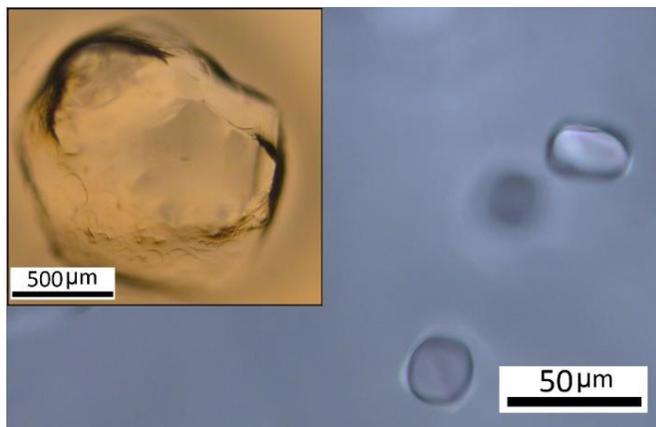
Clave	K1
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prismático Color: incoloro, cerca de los bordes presenta impurezas rojas. Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas y bifásicas.
Tamaño	$\sim 120\text{-}14 \mu\text{m}$
Forma	Cristales negativos, y en forma triangular
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio, gas y sólido



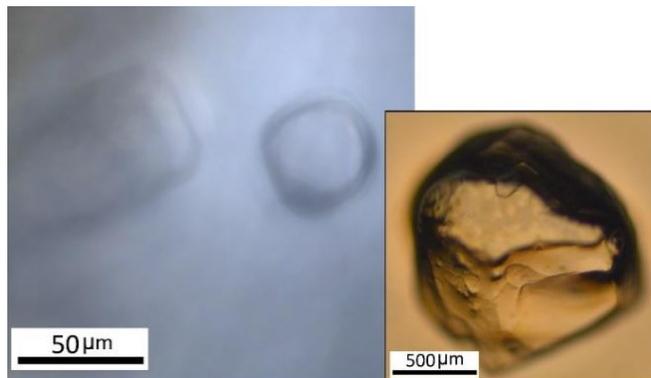
Clave	K2
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prisma hexagonal, y piramidal Color: incoloro, con impurezas de color amarillo. Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas y bifásicas.
Tamaño	$\sim 230\text{-}47 \mu\text{m}$
Forma	Rectangulares con bordes redondeados y alargadas.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas



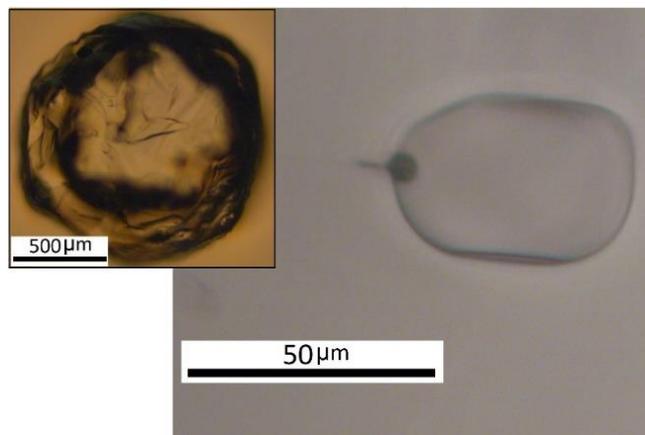
Clave	K3
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prismático Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas y bifásicas.
Tamaño	$\sim 30\text{-}16 \mu\text{m}$
Forma	Tienden a tener forma de cristal negativo, y algunas son redondeadas.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas



Clave	K4
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prisma hexagonal, piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Bifásicas y monofásicas.
Tamaño	$\sim 87\text{-}40 \mu\text{m}$
Forma	Cristales negativos, unas más alargadas.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio y gas.



Clave	K5
Cristal	Cuarzo cacarizo Tamaño $\geq 1000 \mu\text{m}$ Forma: prisma hexagonal y piramidal Color: incoloro Brillo: vítreo Transparencia: translucido Fractura: concoide
Carácter	Intracristalinas y primarias. Monofásicas y bifásicas.
Tamaño	$\sim 250\text{-}10 \mu\text{m}$
Forma	Rectangulares con bordos redondeados, otras son redondeadas e irregulares.
Color	Incoloras
Fases presentes	Vidrio, gas y solidos



Datos geoquímicos sin procesar de Inclusiones de fundido y cristales

Condiciones analíticas 07/08/2017

Measurement	Condition								
WDS elements									
Element	X-ray	Crystal	CH	Acc.v	Peak Pos. (nm)	BG_L	BG_U		
1 Ti	Ka	PETL	1	15	87.966	0.27485	5	5	
2 Ca	Ka	PETL	1	15	107.493	0.33584	5	5	
3 Fe	Ka	LIFL	1	15	134.563	0.1936	5	5	
4 Mn	Ka	LIFL	1	15	146.064	0.21018	5	5	
5 K	Ka	PETJ	2	15	119.74	0.37414	5	5	
6 Na	Ka	TAP	3	15	129.849	1.19101	5	5	
7 Si	Ka	TAP	5	15	77.378	0.71254	5	5	
8 Al	Ka	TAP	5	15	90.638	0.83393	5	5	
9 Mg	Ka	TAP	5	15	107.536	0.989	5	5	

Element	Peak	Back	Pksk	Gain	High.V	Base.L	Window.W	Mode
1 Ti		10 5.0 (s)		1	64	1678	0.7 0 (V)	Int
2 Ca		10 5.0 (s)		1	64	1678	0.7 0 (V)	Int
3 Fe		10 5.0 (s)		1	32	1675	0.7 0 (V)	Int
4 Mn		10 5.0 (s)		1	32	1675	0.7 0 (V)	Int
5 K		10 5.0 (s)		1	64	1655	0.7 0 (V)	Int
6 Na		2 1.0 (s)		1	8	1623	0.7 9.3 (V)	Dif
7 Si		10 5.0 (s)		1	8	1642	0.7 9.0 (V)	Dif
8 Al		10 5.0 (s)		1	8	1642	0.7 9.0 (V)	Dif
9 Mg		10 5.0 (s)		1	8	1642	0.7 9.0 (V)	Dif

Measurement	Order	of	WDS			
Order	Channel 1		2	3	4	5
1	Ti_CH1_P	K_CH2_PE	Na_CH3_		0	Si_CH5_T
2	Ca_CH1_P		0	0	0	Al_CH5_T
3	Fe_CH1_L		0	0	0	Mg_Ka
4	Mn_CH1_L		0	0	0	0

Calc. Elements : O (Anion)

Standard Data

Element	Standard	Mass(%)	ZAF Fac.	Z	A	F
1 TiO2	Rutile	98.37	0.5914	0.6065	0.9748	1.0004
2 CaO	Obsidian	0.86	0.84	0.9318	0.9013	1.0001
3 FeO	KE-12	8.36	0.1956	0.1992	0.9821	1
4 MnO	Garnet-Spessart	19.74	0.2633	0.2701	0.975	1
5 K2O	Obsidian	4.71	1.055	1.195	0.8821	1.0008
6 Na2O	Albita	11.52	5.3805	10.7226	0.4999	1.0038
7 SiO2	KE-12	70.3	3.2526	4.4223	0.7353	1.0003
8 Al2O3	Obsidian	13.4	4.2152	5.8308	0.7103	1.0178
9 MgO	A-99	5.08	4.3368	7.9649	0.5412	1.006

Standard Intensity of WDS

Element	Curr.(A)	Net(cps)	Bg-(cps)	Bg+(cps)	S.D.(%)	Date
1 Ti	9.992E-009	13581.9	49.6	29.1	0.16	2017/08/07 09:58:24
2 Ca	1.001E-008	109.9	11.9	10	1.91	2017/08/07 09:55:00
3 Fe	9.985E-009	216.5	3.7	3.9	1.26	2017/08/07 10:05:19
4 Mn	9.980E-009	458.1	4.8	4.4	0.86	2017/08/07 10:01:55
5 K	1.001E-008	328.3	5.1	4.3	1.02	2017/08/07 09:55:00
6 Na	9.999E-009	562.9	3.7	2.3	1.73	2017/08/07 09:51:37
7 Si	9.985E-009	6774.9	28.9	17.7	0.22	2017/08/07 10:05:19
8 Al	1.001E-008	1358.5	18.3	10.5	0.5	2017/08/07 09:55:00
9 Mg	1.001E-008	379.8	9.3	5.8	0.96	2017/08/07 10:08:42

UNK No. : 1 2 3 4 5 6
 7 8 9 10 11
 12 13 14 15 16
 17 18 19 20 21
 22 23 24

Estandarizacion inicial 07/08/2017

Weight percent											Group : 07082017-V	Sample : 07082	Page	1
No.	TiO2	CaO	FeO	MnO	K2O	Na2O	SiO2	Al2O3	MgO	Total	Comment			
1	0.083	0.446	1.123	0.027	4.841	3.654	76.108	12.264	0.021	98.567				
Minimum	0.083	0.446	1.123	0.027	4.841	3.654	76.108	12.264	0.021	98.567				
Maximum	0.083	0.446	1.123	0.027	4.841	3.654	76.108	12.264	0.021	98.567				
Average	0.083	0.446	1.123	0.027	4.841	3.654	76.108	12.264	0.021	98.567				
Sigma	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000				
No. of data 1														

Medidas

Weight percent											Group : 07082017-V	Sample : 07082	Page	1
No.	TiO2	CaO	FeO	MnO	K2O	Na2O	SiO2	Al2O3	MgO	Total	Comment			
1	0.115	0.219	1.598	0.000	4.196	3.904	72.712	11.251	0.000	93.995	B2-1.			
2	0.002	0.021	0.000	0.004	0.000	0.000	98.819	0.028	0.000	98.874	B2-Cristal claro			
3	0.116	0.209	1.528	0.089	4.259	3.746	72.824	11.320	0.000	94.091	B2-2. MI con imperfeccion			
4	0.134	0.201	1.528	0.000	4.140	3.689	73.001	11.551	0.000	94.244	B2-2. MI con imperfeccion 2			
5	0.000	0.003	0.019	0.004	0.009	0.075	98.614	0.012	0.007	98.743	B2-2. cristal obscuro			
6	0.138	0.203	1.849	0.067	4.063	3.926	73.271	10.767	0.000	94.284	B4-MI			
7	0.022	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	98.373	0.033	0.005	98.449	B4-Cristal			
8	0.107	0.197	1.648	0.111	4.239	3.443	72.658	10.973	0.000	93.376	B3-MI			
9	0.000	0.004	0.000	0.018	0.016	0.011	99.488	0.000	0.013	99.550	B3-Cristal			
10	0.129	0.206	1.644	0.027	4.310	3.558	72.730	11.177	0.000	93.781	B3-MI-2			
11	0.000	0.004	0.101	0.022	0.012	0.032	99.018	0.029	0.000	99.218	B3-X2			
12	0.138	0.187	1.582	0.000	4.133	1.325	70.774	11.133	0.028	89.300	A5-MI			
13	0.002	0.116	0.201	0.000	6.932	5.151	66.169	18.928	0.000	97.499	A5-X			
14	0.141	0.237	1.782	0.031	4.384	3.177	71.572	11.187	0.017	92.528	B1-MI-1			
15	0.006	0.136	0.204	0.000	6.815	5.506	66.037	19.116	0.000	97.820	B1-X			
16	0.000	0.114	0.181	0.062	6.930	5.750	65.791	18.797	0.000	97.625	B1-MI-2			
17	0.075	0.197	1.277	0.075	3.481	1.200	63.477	22.330	0.000	92.112	A4-MI alargada			
18	0.007	0.136	0.204	0.000	7.197	5.194	66.305	19.400	0.000	98.443	A4-X			
19	0.145	0.227	1.775	0.115	3.898	1.433	70.553	11.017	0.004	89.167	A3-MI. irreg			
20	0.022	0.128	0.239	0.000	6.831	5.473	67.195	19.212	0.000	99.100	A3-X			
21	0.025	0.121	0.127	0.000	6.897	4.726	66.561	19.024	0.000	97.481	A2-X			
22	0.049	0.236	1.714	0.066	4.815	2.964	70.355	11.900	0.000	92.099	A1-MI chica			
23	0.006	0.121	0.246	0.071	7.116	4.925	66.054	19.216	0.000	97.755	A1-X			
24	0.092	0.201	1.580	0.057	4.399	3.299	72.373	11.229	0.009	93.239	B2-MI-G			
Minimum	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	63.477	0.000	0.000	89.167				
Maximum	0.145	0.237	1.849	0.115	7.197	5.750	99.488	22.330	0.028	99.550				
Average	0.061	0.143	0.876	0.034	4.128	3.021	75.614	11.651	0.003	95.532				
Sigma	0.059	0.080	0.776	0.039	2.487	2.002	12.525	7.168	0.007	3.201				
No. of data 24														

Weight percent											Group : 07082017-V	Sample : 07082	Page	1
No.	TiO2	CaO	FeO	MnO	K2O	Na2O	SiO2	Al2O3	MgO	Total	Comment			
1	0.083	0.263	1.452	0.000	4.345	2.962	72.042	11.275	0.005	92.427	D4-MI-1			
2	0.015	0.019	0.000	0.040	0.010	0.032	98.903	0.030	0.026	99.075	D4-X			
3	0.119	0.249	1.635	0.106	4.312	3.247	72.040	11.630	0.002	93.340	D4-MI-2			
4	0.038	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	98.235	0.015	0.008	98.306	D2-X			
5	0.111	0.184	1.496	0.075	4.093	3.465	72.611	11.160	0.006	93.201	D2-MI			
6	0.187	0.273	1.936	0.066	4.724	3.057	70.738	10.921	0.000	91.902	D3-MI-Peq			
7	0.000	0.178	0.224	0.000	6.821	5.699	65.733	18.755	0.011	97.421	D3-X			
8	0.173	0.259	2.093	0.097	4.253	3.899	71.842	11.282	0.004	93.902	D3-MI-G			
9	0.059	0.279	1.681	0.058	4.349	3.555	67.878	11.240	0.006	89.105	D1-MI			
10	0.000	0.111	0.158	0.000	6.610	4.887	63.736	18.558	0.017	94.077	D1-X			
11	0.101	0.215	1.762	0.080	4.379	3.186	72.161	11.660	0.004	93.548	C4-MI			
12	0.002	0.143	0.255	0.000	6.754	5.792	67.124	19.292	0.000	99.362	C4-X			
13	0.014	0.157	0.212	0.000	6.854	5.682	67.020	19.373	0.000	99.312	C2-X			
14	0.020	0.077	0.392	0.049	1.281	0.409	79.144	0.524	0.035	81.931	D5-MI skan			
15	0.000	0.011	0.000	0.000	0.000	0.054	88.081	0.006	0.007	88.159	D5-X skan			
16	0.115	0.191	1.450	0.027	4.111	2.039	60.608	9.980	0.000	78.521	C5-MI-G(la de abajo)			

17	0.000	0.073	0.143	0.022	6.209	5.525	58.730	17.156	0.007	87.865	C5-X
18	0.116	0.200	1.788	0.084	4.217	3.979	75.001	11.169	0.012	96.566	M4-MI
19	0.000	0.000	0.000	0.009	0.000	0.000	98.167	0.024	0.010	98.210	M4-X
20	0.088	0.224	1.587	0.004	4.312	3.473	72.235	11.537	0.000	93.460	M1-MI
21	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.032	98.548	0.056	0.015	98.660	M1-X
22	0.114	0.221	1.645	0.066	4.187	3.529	73.763	11.505	0.000	95.030	M2-MI
23	0.047	0.007	0.012	0.013	0.000	0.032	99.665	0.027	0.000	99.803	M2-X
24	0.074	0.175	1.578	0.088	4.242	3.651	72.182	11.117	0.006	93.113	L1-MI
25	0.022	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000	99.231	0.003	0.008	99.277	L1-X
26	0.140	0.262	1.713	0.075	4.374	2.894	70.924	11.108	0.000	91.490	M3-MI
27	0.020	0.123	0.243	0.009	6.638	5.624	65.561	19.205	0.000	97.423	M3-X
28	0.162	0.299	2.047	0.137	4.060	3.573	72.555	11.087	0.007	93.927	L2-MI
29	0.013	0.126	0.200	0.053	6.588	5.810	66.641	19.186	0.000	98.617	L2-X
30	0.109	0.229	1.670	0.049	4.225	3.737	71.552	11.459	0.002	93.032	L4-MI-G
31	0.005	0.127	0.235	0.000	6.875	5.713	65.817	18.926	0.019	97.717	L4-X
32	0.078	0.281	2.051	0.057	4.139	3.740	70.425	11.069	0.000	91.840	L4-MI-2
Minimum	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	58.730	0.003	0.000	78.521	
Maximum	0.187	0.299	2.093	0.137	6.875	5.810	99.665	19.373	0.035	99.803	
Average	0.063	0.156	0.927	0.039	3.843	3.102	75.590	10.323	0.007	94.051	
Sigma	0.058	0.098	0.828	0.039	2.391	2.036	12.458	6.798	0.008	4.985	
No. of data	32										

agarra un poco de cristal

Estandarizacion final 07/08/2017

Weight percent	Group : 07082017-V Sample : 0708; Page 1										
No.	TiO2	CaO	FeO	MnO	K2O	Na2O	SiO2	Al2O3	MgO	Total	Comment
1	0.085	0.410	0.999	0.018	4.716	3.276	77.209	12.708	0.060	99.481	STD vic
Minimum	0.085	0.410	0.999	0.018	4.716	3.276	77.209	12.708	0.060	99.481	
Maximum	0.085	0.410	0.999	0.018	4.716	3.276	77.209	12.708	0.060	99.481	
Average	0.085	0.410	0.999	0.018	4.716	3.276	77.209	12.708	0.060	99.481	
Sigma	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
No. of data	1										

Reestandarizacion del Si 08/08/2017

Condiciones analiticas

Measurement Condition

WDS element

Element	X-ray	Crystal	CH	Acc.v	Peak Pos.	(nm)	BG_L	BG_U
1 Ti	Ka	PETL	1		15	87.966	0.27485	5
2 Ca	Ka	PETL	1		15	107.493	0.33584	5
3 Fe	Ka	LIFL	1		15	134.563	0.1936	5
4 Mn	Ka	LIFL	1		15	146.064	0.21018	5
5 K	Ka	PETJ	2		15	119.74	0.37414	5
6 Na	Ka	TAP	3		15	129.849	1.19101	5
7 Si	Ka	TAP	5		15	77.383	0.71254	5
8 Al	Ka	TAP	5		15	90.638	0.83393	5
9 Mg	Ka	TAP	5		15	107.536	0.989	5

Element	Peak	Back	Pksk	Gain	High.V	Base.L	Window.W	Mode
1 Ti		10 5.0 (s)		1	64	1678	0.7 0 (V)	Int
2 Ca		10 5.0 (s)		1	64	1678	0.7 0 (V)	Int
3 Fe		10 5.0 (s)		1	32	1675	0.7 0 (V)	Int
4 Mn		10 5.0 (s)		1	32	1675	0.7 0 (V)	Int
5 K		10 5.0 (s)		1	64	1655	0.7 0 (V)	Int
6 Na		2 1.0 (s)		1	8	1623	0.7 9.3 (V)	Dif
7 Si		10 5.0 (s)		1	8	1642	0.7 9.0 (V)	Dif
8 Al		10 5.0 (s)		1	8	1642	0.7 9.0 (V)	Dif
9 Mg		10 5.0 (s)		1	8	1642	0.7 9.0 (V)	Dif

Measurement Order	of	WDS				
Order	Channel 1	2	3	4	5	
1	Ti_CH1_P	K_CH2_PE	Na_CH3_T	0	Si_CH5_T	
2	Ca_CH1_P	0	0	0	Al_CH5_T	
3	Fe_CH1_L	0	0	0	Mg_Ka	
4	Mn_CH1_L	0	0	0	0	

Calc. Elements : O (Anion)

Standard Data

Element	Standard	Mass(%)	ZAF Fac.	Z	A	F
1 TiO2	Rutile	98.37	0.5914	0.6065	0.9748	1.0004
2 CaO	Obsidian	0.86	0.84	0.9318	0.9013	1.0001
3 FeO	KE-12	8.36	0.1956	0.1992	0.9821	1
4 MnO	Garnet-Spess	19.74	0.2633	0.2701	0.975	1
5 K2O	Obsidian	4.71	1.055	1.195	0.8821	1.0008
6 Na2O	Albita	11.52	5.3805	10.7226	0.4999	1.0038
7 SiO2	KE-12	70.3	3.2526	4.4223	0.7353	1.0003
8 Al2O3	Obsidian	13.4	4.2152	5.8308	0.7103	1.0178
9 MgO	A-99	5.08	4.3368	7.9649	0.5412	1.006

Standard Intensity of WDS

Element	Curr.(A)	Net(cps)	Bg-(cps)	Bg+(cps)	S.D.(%)	Date
1 Ti	9.992E-009	13581.9	49.6	29.1	0.16	2017/08/07 09:58:24
2 Ca	1.001E-008	109.9	11.9	10	1.91	2017/08/07 09:55:00
3 Fe	9.985E-009	216.5	3.7	3.9	1.26	2017/08/07 10:05:19
4 Mn	9.980E-009	458.1	4.8	4.4	0.86	2017/08/07 10:01:55
5 K	1.001E-008	328.3	5.1	4.3	1.02	2017/08/07 09:55:00
6 Na	9.999E-009	562.9	3.7	2.3	1.73	2017/08/07 09:51:37
7 Si	1.002E-008	6790	34.3	16.3	0.22	2017/08/08 08:33:44
8 Al	1.001E-008	1358.5	18.3	10.5	0.5	2017/08/07 09:55:00
9 Mg	1.001E-008	379.8	9.3	5.8	0.96	2017/08/07 10:08:42

UNK No. : 1 2 3 4 5 6

7 8 9 10 11
12 13 14 15 16
17 18 19 20 21
22 23 24 25

Estandarizacion inicial 08/08/2017

Weight percer Group : 07 Sample : 07C Page 1

No.	TiO2	CaO	FeO	MnO	K2O	Na2O	SiO2	Al2O3	MgO	Total	Comment
1	0.067	0.431	1.180	0.000	4.808	3.234	77.238	12.523	0.035	99.516	
Minimum	0.067	0.431	1.180	0.000	4.808	3.234	77.238	12.523	0.035	99.516	
Maximum	0.067	0.431	1.180	0.000	4.808	3.234	77.238	12.523	0.035	99.516	
Average	0.067	0.431	1.180	0.000	4.808	3.234	77.238	12.523	0.035	99.516	
Sigma	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
No. of data	1										

Medidas

Weight percer Group : 07 Sample : 07C Page 1

No.	TiO2	CaO	FeO	MnO	K2O	Na2O	SiO2	Al2O3	MgO	Total	Comment
1	0.057	0.152	1.453	0.058	4.489	3.650	73.395	11.331	0.000	94.585	G1-MI
2	0.092	0.158	1.373	0.049	4.333	3.886	74.159	10.812	0.000	94.862	G1-MI-2
3	0.002	0.017	0.000	0.000	0.025	0.011	100.380	0.050	0.014	100.499	G1-X
4	0.102	0.165	1.558	0.089	4.429	3.786	73.302	11.125	0.000	94.556	H3-MI
5	0.075	0.153	1.460	0.018	4.448	3.212	73.123	10.977	0.000	93.466	H3-MI2
6	0.016	0.000	0.031	0.022	0.000	0.000	98.727	0.019	0.007	98.822	H3-X
7	0.083	0.258	1.603	0.031	4.317	3.577	72.352	11.380	0.000	93.601	G4-MI
8	0.002	0.000	0.051	0.000	0.013	0.000	99.288	0.041	0.000	99.395	G4-X
9	0.043	0.154	1.562	0.062	4.583	2.052	72.715	11.383	0.004	92.558	G3-MI-1-1
10	0.090	0.166	1.393	0.027	4.203	1.653	72.397	11.382	0.011	91.322	G3-MI-1-2
11	0.049	0.151	1.519	0.054	4.178	1.851	72.556	11.500	0.000	91.858	G3-MI-1-3
12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	100.585	0.015	0.015	100.626	G3-X
13	0.053	0.155	1.436	0.049	4.588	2.121	71.868	11.233	0.000	91.503	G3-MI-2
14	0.147	0.284	1.647	0.097	4.282	3.633	73.011	11.766	0.000	94.867	G2-MI
15	0.017	0.114	0.220	0.057	7.036	5.680	68.144	19.906	0.000	101.174	G2-X
16	0.063	0.248	1.787	0.040	3.856	1.635	71.104	11.283	0.002	90.018	G5-MI
17	0.000	0.106	0.181	0.080	7.152	5.526	66.234	18.825	0.000	98.104	G5-X
18	0.066	0.292	1.908	0.146	4.401	3.748	71.222	11.495	0.000	93.278	G5-MI-2
19	0.063	0.232	1.930	0.080	4.392	3.697	71.461	11.625	0.000	93.480	H1-MI-1-1
20	0.097	0.257	1.980	0.013	4.296	3.612	71.390	11.646	0.007	93.298	H1-MI-1-2
21	0.000	0.100	0.239	0.000	7.334	5.058	65.999	18.795	0.002	97.527	H1-X
22	0.158	0.251	1.803	0.027	4.243	3.376	71.661	11.049	0.000	92.568	H2-1-1
23	0.157	0.242	1.787	0.053	3.964	3.450	69.777	10.897	0.010	90.337	H2-1-2
24	0.167	0.236	1.734	0.000	4.054	3.521	71.579	11.133	0.000	92.424	H2-1-3
25	0.026	0.097	0.166	0.000	6.870	5.515	65.036	18.570	0.004	96.284	H2-X
Minimum	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	65.036	0.015	0.000	90.018	
Maximum	0.167	0.292	1.980	0.146	7.334	5.680	100.585	19.906	0.015	101.174	
Average	0.065	0.160	1.153	0.042	4.059	2.970	75.659	10.730	0.003	94.840	
Sigma	0.053	0.090	0.749	0.037	2.084	1.723	10.990	5.555	0.005	3.320	
No. of data	25										

estandarizacion por cambio de muestras (tomese como la final) 08/08/2017

Weight percer Group : 07 Sample : 07C Page 1											
No.	TiO2	CaO	FeO	MnO	K2O	Na2O	SiO2	Al2O3	MgO	Total	Comment
1	0.048	0.420	1.224	0.000	4.786	3.105	76.311	12.413	0.055	98.362	
Minimum	0.048	0.420	1.224	0.000	4.786	3.105	76.311	12.413	0.055	98.362	
Maximum	0.048	0.420	1.224	0.000	4.786	3.105	76.311	12.413	0.055	98.362	
Average	0.048	0.420	1.224	0.000	4.786	3.105	76.311	12.413	0.055	98.362	
Sigma	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
No. of data	1										

Datos erroneos por mal enfoque

Weight percer Group : 07 Sample : 07C Page 1											
No.	TiO2	CaO	FeO	MnO	K2O	Na2O	SiO2	Al2O3	MgO	Total	Comment
1	0.082	0.205	1.480	0.000	4.453	2.823	50.895	9.465	0.000	69.403	N1-MI
2	0.000	0.023	0.000	0.000	0.005	0.000	69.722	0.006	0.009	69.765	N1-X
3	0.035	0.130	1.430	0.025	4.379	2.904	60.815	10.149	0.000	79.867	O4-MI
4	0.019	0.001	0.000	0.021	0.019	0.000	82.416	0.018	0.017	82.511	O4-X
5	0.025	0.143	1.482	0.115	4.520	3.577	72.393	10.924	0.027	93.206	O3-MI
6	0.000	0.000	0.014	0.000	0.000	0.000	97.156	0.027	0.000	97.197	O3-X
7	0.054	0.216	1.439	0.066	4.457	2.554	61.956	10.570	0.000	81.312	O2-MI-1.1
8	0.096	0.234	1.439	0.012	4.343	3.005	62.101	10.586	0.005	81.821	O2-MI-1.2
9	0.003	0.009	0.000	0.000	0.000	0.040	84.543	0.029	0.018	84.642	O2-X
10	0.088	0.171	1.413	0.000	4.370	3.522	60.825	10.634	0.047	81.070	N5-MI-1.1
11	0.082	0.177	1.557	0.008	4.384	3.077	61.199	10.585	0.000	81.069	N5-MI-1.2
12	0.000	0.021	0.000	0.000	0.000	0.069	82.582	0.028	0.003	82.703	N5-X
Minimum	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	50.895	0.006	0.000	69.403	
Maximum	0.096	0.234	1.557	0.115	4.520	3.577	97.156	10.924	0.047	97.197	
Average	0.040	0.111	0.854	0.021	2.577	1.798	70.550	6.085	0.010	82.047	
Sigma	0.038	0.093	0.753	0.035	2.271	1.591	13.490	5.364	0.015	7.859	
No. of data	12										

Datos con Correccion de enfoque

Weight percer Group : 07 Sample : 07C Page 1											
No.	TiO2	CaO	FeO	MnO	K2O	Na2O	SiO2	Al2O3	MgO	Total	Comment
1	0.057	0.178	1.578	0.008	4.482	3.204	72.250	11.527	0.002	93.286	N1-MI
2	0.000	0.023	0.079	0.053	0.012	0.030	98.894	0.019	0.000	99.110	N1-X
3	0.067	0.144	1.612	0.045	4.505	3.042	71.856	10.854	0.001	92.126	O4-MI
4	0.000	0.004	0.000	0.018	0.018	0.000	98.871	0.008	0.008	98.927	O4-X
5	0.043	0.195	1.471	0.022	4.413	2.929	72.217	11.104	0.000	92.394	O3-MI
6	0.000	0.022	0.024	0.022	0.026	0.000	97.345	0.000	0.006	97.445	O3-X
7	0.057	0.224	1.494	0.054	4.460	3.753	72.769	11.267	0.016	94.094	O2-MI-1.1
8	0.087	0.207	1.513	0.089	4.328	3.647	72.877	11.364	0.000	94.112	O2-MI-1.2
9	0.023	0.020	0.000	0.000	0.000	0.032	98.049	0.000	0.000	98.124	O2-X
10	0.054	0.165	1.464	0.022	4.357	3.968	72.521	11.029	0.020	93.600	N5-MI-1.1
11	0.041	0.135	1.502	0.062	4.399	4.126	72.239	11.414	0.020	93.938	N5-MI-1.2
12	0.000	0.015	0.008	0.045	0.006	0.011	99.012	0.010	0.002	99.109	N5-X
Minimum	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	71.856	0.000	0.000	92.126	
Maximum	0.087	0.224	1.612	0.089	4.505	4.126	99.012	11.414	0.020	99.109	
Average	0.037	0.113	0.909	0.038	2.651	2.151	82.776	6.705	0.007	95.387	
Sigma	0.031	0.088	0.776	0.026	2.272	1.878	13.388	5.769	0.008	2.714	
No. of data	10										

estandarizacion inicial 09/08/2017

Weight percer Group : 07 Sample : 07C Page 1											
No.	TiO2	CaO	FeO	MnO	K2O	Na2O	SiO2	Al2O3	MgO	Total	Comment
2	0.086	0.418	1.219	0.027	4.668	3.149	76.192	12.525	0.014	98.298	
Minimum	0.086	0.418	1.219	0.027	4.668	3.149	76.192	12.525	0.014	98.298	
Maximum	0.086	0.418	1.219	0.027	4.668	3.149	76.192	12.525	0.014	98.298	
Average	0.086	0.418	1.219	0.027	4.668	3.149	76.192	12.525	0.014	98.298	
Sigma	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
No. of data	1										

Weight percer Group : 0; Sample : 07(Page 1

No.	TiO2	CaO	FeO	MnO	K2O	Na2O	SiO2	Al2O3	MgO	Total	Comment
13	0.052	0.198	1.768	0.013	4.834	4.198	71.262	11.791	0.030	94.146	O5-MI
14	0.000	0.002	0.000	0.018	0.012	0.022	99.294	0.021	0.000	99.369	O5-X
15	0.130	0.409	1.838	0.018	4.076	3.411	75.514	8.908	0.000	94.304	N2-MI-1.1
16	0.127	0.377	1.861	0.103	4.138	3.133	75.498	9.100	0.009	94.346	N2-MI-1.2
17	0.002	0.157	0.180	0.027	7.060	5.419	66.505	19.008	0.000	98.358	N2-X
18	0.147	0.332	1.873	0.022	3.907	3.023	76.877	8.333	0.000	94.514	N3-MI
19	0.000	0.149	0.188	0.000	6.591	5.734	66.933	19.168	0.000	98.763	N3-X
20	0.162	0.339	1.792	0.000	3.945	3.242	74.662	9.301	0.000	93.443	N4-MI-1.1
21	0.176	0.381	1.999	0.090	3.786	3.228	74.830	8.977	0.000	93.467	N4-MI-1.2
22	0.000	0.144	0.098	0.000	7.137	5.011	66.085	18.692	0.000	97.167	N4-X
23	0.203	0.455	2.019	0.085	4.054	3.265	75.893	8.208	0.014	94.196	N4-MI-2
24	0.015	0.181	0.211	0.018	7.132	5.391	65.935	19.108	0.000	97.991	N4-X2
Minimum	0.000	0.002	0.000	0.000	0.012	0.022	65.935	0.021	0.000	93.443	
Maximum	0.203	0.455	2.019	0.103	7.137	5.734	99.294	19.168	0.030	99.369	
Average	0.084	0.260	1.152	0.033	4.723	3.756	74.107	11.718	0.004	95.839	
Sigma	0.080	0.139	0.902	0.037	2.048	1.564	9.038	6.035	0.009	2.277	

No. of data 12

Weight percer Group : 0; Sample : 07(Page 1

No.	TiO2	CaO	FeO	MnO	K2O	Na2O	SiO2	Al2O3	MgO	Total	Comment
25	0.152	0.201	1.840	0.000	4.381	3.475	75.166	11.382	0.000	96.597	O1-MI-1.1
26	0.124	0.231	1.854	0.085	4.462	3.732	76.021	11.584	0.014	98.107	O1-MI-1.2
27	0.000	0.011	0.023	0.000	0.007	0.000	98.670	0.024	0.000	98.735	O1-X
28	0.054	0.218	1.213	0.000	4.504	2.045	71.693	11.483	0.000	91.210	J1-MI-1.1
29	0.053	0.194	1.256	0.000	4.748	2.014	71.163	11.487	0.000	90.915	J1-MI-1.2
30	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000	0.032	99.726	0.012	0.006	99.784	J1-X
31	0.061	0.193	1.140	0.111	4.116	3.379	71.155	11.548	0.000	91.703	J1-MI-2
32	0.000	0.000	0.020	0.000	0.006	0.022	100.044	0.020	0.027	100.139	J1-X2
33	0.060	0.184	1.308	0.049	3.960	3.545	73.145	11.514	0.000	93.765	J2-MI-1
34	0.000	0.004	0.008	0.036	0.006	0.000	99.830	0.010	0.000	99.894	J2-X
35	0.073	0.225	1.306	0.000	4.346	2.931	71.546	11.848	0.000	92.275	J2-MI-2
36	0.013	0.023	0.000	0.031	0.000	0.011	100.384	0.035	0.000	100.497	J2-X2
Minimum	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	71.155	0.010	0.000	90.915	
Maximum	0.152	0.231	1.854	0.111	4.748	3.732	100.384	11.848	0.027	100.497	
Average	0.049	0.124	0.831	0.026	2.545	1.765	84.045	6.746	0.004	96.135	
Sigma	0.050	0.103	0.757	0.038	2.251	1.635	13.931	5.938	0.008	3.873	

No. of data 12

Weight percer Group : 0; Sample : 07(Page 1

No.	TiO2	CaO	FeO	MnO	K2O	Na2O	SiO2	Al2O3	MgO	Total	Comment
37	0.089	0.183	1.136	0.000	3.896	3.323	72.161	11.263	0.000	92.051	J3-MI-1.1
38	0.068	0.198	1.172	0.107	3.791	3.509	71.814	11.174	0.000	91.833	J3-MI-1.2
39	0.024	0.014	0.035	0.022	0.009	0.011	100.046	0.000	0.000	100.161	J3-X
40	0.074	0.192	1.292	0.000	3.766	3.837	72.621	11.365	0.009	93.156	J4-MI
41	0.015	0.005	0.000	0.013	0.000	0.000	99.878	0.021	0.000	99.932	J4-X
42	0.067	0.213	1.214	0.036	3.941	3.473	72.119	11.799	0.000	92.862	J5-MI
43	0.000	0.023	0.000	0.000	0.022	0.032	101.160	0.020	0.000	101.257	J5-X
44	0.054	0.177	1.302	0.045	4.029	3.217	72.059	11.937	0.014	92.834	K1-MI-1.1
45	0.066	0.210	1.205	0.000	3.967	3.098	71.239	11.717	0.000	91.502	K1-MI-1.2
46	0.000	0.026	0.000	0.058	0.001	0.000	100.253	0.011	0.017	100.366	K1-X
47	0.064	0.181	1.188	0.036	4.214	2.671	70.891	11.520	0.018	90.783	K2-MI
48	0.000	0.000	0.000	0.009	0.012	0.011	98.617	0.019	0.018	98.686	K2-X
49	0.077	0.172	1.246	0.093	4.299	2.589	70.752	11.264	0.016	90.508	K3-MI
50	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.065	99.020	0.000	0.007	99.096	K3-X
51	0.072	0.223	1.223	0.009	3.959	2.937	71.033	11.391	0.000	90.847	K4-MI-1.1
52	0.072	0.182	1.398	0.036	3.932	2.868	71.373	11.266	0.016	91.143	K4-MI-1.2
53	0.011	0.001	0.000	0.004	0.000	0.000	99.179	0.000	0.008	99.203	K4-X
54	0.066	0.224	1.227	0.058	3.837	2.747	71.010	11.293	0.000	90.462	K4-MI-2
55	0.062	0.211	1.270	0.093	3.801	3.109	72.824	11.511	0.001	92.882	K5-MI
56	0.000	0.031	0.000	0.000	0.000	0.000	99.715	0.002	0.000	99.748	K5-X
Minimum	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	70.752	0.000	0.000	90.462	
Maximum	0.089	0.224	1.398	0.107	4.299	3.837	101.160	11.937	0.018	101.257	
Average	0.044	0.123	0.746	0.031	2.374	1.875	82.888	6.879	0.006	94.966	
Sigma	0.033	0.094	0.623	0.035	1.988	1.584	14.130	5.758	0.008	4.156	

No. of data 20

Weight percer Group : 0i Sample : 07(Page 1

No.	TiO2	CaO	FeO	MnO	K2O	Na2O	SiO2	Al2O3	MgO	Total	Comment
57	0.088	0.184	1.418	0.000	4.714	2.980	70.653	11.144	0.000	91.181	F5-MI-1.1
58	0.050	0.196	1.531	0.000	4.364	3.120	70.798	11.156	0.000	91.215	F5-MI-1.2
59	0.005	0.029	0.000	0.000	0.000	0.032	98.079	0.047	0.000	98.192	F5-X
60	0.124	0.252	1.309	0.000	3.720	2.934	76.838	9.756	0.000	94.933	F3-MI
61	0.024	0.000	0.000	0.000	0.017	0.000	99.509	0.030	0.000	99.580	F3-X
62	0.119	0.220	1.542	0.027	4.255	3.026	72.699	11.410	0.000	93.298	F3-MI-GR
63	0.000	0.012	0.000	0.009	0.000	0.000	99.599	0.000	0.010	99.630	F3-X-GR
64	0.065	0.179	1.387	0.076	4.309	3.172	73.307	11.320	0.000	93.815	E2-MI
65	0.059	0.197	1.344	0.089	4.524	3.171	72.839	11.405	0.014	93.642	E2-MI.2
66	0.022	0.013	0.047	0.000	0.000	0.075	99.319	0.010	0.000	99.486	E2-X
67	0.045	0.155	1.457	0.044	4.298	3.470	75.068	11.290	0.012	95.839	E3-MI-1.1
68	0.032	0.167	1.428	0.000	4.257	3.475	74.533	11.238	0.000	95.130	E3-MI-1.2
69	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	101.219	0.006	0.015	101.244	E3-X
70	0.029	0.161	1.274	0.000	4.390	3.386	74.205	11.214	0.000	94.659	E4-MI-1.1
71	0.057	0.179	1.438	0.062	4.288	3.157	73.624	10.858	0.000	93.663	E4-MI-1.2
72	0.018	0.029	0.058	0.000	0.000	0.032	99.725	0.041	0.014	99.917	E4-X
73	0.051	0.163	1.283	0.040	4.267	2.810	73.768	10.996	0.011	93.389	E4-MI-2
Minimum	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	70.653	0.000	0.000	91.181	
Maximum	0.124	0.252	1.542	0.089	4.714	3.475	101.219	11.410	0.015	101.244	
Average	0.046	0.126	0.913	0.020	2.788	2.049	82.693	7.172	0.004	95.813	
Sigma	0.037	0.088	0.686	0.030	2.129	1.552	12.941	5.455	0.006	3.211	
No. of data	17										

Weight percer Group : 0i Sample : 07(Page 1

No.	TiO2	CaO	FeO	MnO	K2O	Na2O	SiO2	Al2O3	MgO	Total	Comment
74	0.161	0.243	1.784	0.076	4.124	1.569	71.367	11.528	0.005	90.857	E1-MI-1.1
75	0.142	0.269	1.858	0.000	3.955	1.181	71.727	11.247	0.000	90.379	E1-MI-1.2
76	0.010	0.108	0.167	0.013	6.920	4.927	66.839	19.145	0.005	98.134	E1-X
77	0.169	0.209	1.774	0.000	4.869	1.943	70.181	11.672	0.000	90.817	E5-MI
78	0.004	0.110	0.132	0.009	7.211	5.264	67.046	19.201	0.000	98.977	E5-X
79	0.090	0.211	1.652	0.067	5.033	2.530	69.590	10.829	0.000	90.002	F1-MI-1.1
80	0.107	0.189	1.540	0.053	4.926	2.142	70.543	11.158	0.000	90.658	F1-MI-1.2
81	0.029	0.135	0.182	0.004	7.017	5.477	65.572	18.817	0.000	97.233	F1-X
82	0.144	0.266	1.764	0.027	4.470	3.731	73.460	11.510	0.000	95.372	F2-MI-1.1
83	0.178	0.253	1.874	0.066	4.316	3.954	73.129	11.522	0.000	95.292	F2-MI-1.2
84	0.032	0.136	0.224	0.009	6.573	5.878	67.526	19.455	0.006	99.839	F2-X
85	0.137	0.215	1.974	0.044	4.658	3.267	71.713	11.670	0.000	93.678	F4-MI
86	0.000	0.134	0.185	0.000	7.013	5.605	67.061	19.454	0.000	99.452	F4-X
Minimum	0.000	0.108	0.132	0.000	3.955	1.181	65.572	10.829	0.000	90.002	
Maximum	0.178	0.269	1.974	0.076	7.211	5.878	73.460	19.455	0.006	99.839	
Average	0.093	0.191	1.162	0.028	5.468	3.651	69.673	14.401	0.001	94.668	
Sigma	0.068	0.059	0.817	0.029	1.261	1.670	2.610	3.970	0.002	3.811	
No. of data	13										

Estandarizacion final 09/08/2017

Weight percer Group : 0i Sample : 07(Page 1

No.	TiO2	CaO	FeO	MnO	K2O	Na2O	SiO2	Al2O3	MgO	Total	Comment
3	0.037	0.459	1.142	0.018	4.699	3.245	76.981	12.605	0.028	99.214	
Minimum	0.037	0.459	1.142	0.018	4.699	3.245	76.981	12.605	0.028	99.214	
Maximum	0.037	0.459	1.142	0.018	4.699	3.245	76.981	12.605	0.028	99.214	
Average	0.037	0.459	1.142	0.018	4.699	3.245	76.981	12.605	0.028	99.214	
Sigma	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
No. of data	1										