



**Universidad Michoacana de San
Nicolás de Hidalgo**



Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra

**“Estratigrafía, Petrografía y Geoquímica de las Secuencias
Valentín y Cuauhtémoc del Volcán Tlaloc”**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS, CON ESPECIALIDAD
EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO.

PRESENTA

Ing. Geol. Gabriela Reyes Agustin

Asesor: **Dr. en Geología José Luis Macías Vázquez**

Co-Asesor: **Dr. en Geología Estructural Víctor Hugo Garduño Monroy**

Agosto 2015

Morelia, Mich., Agosto, 2015

Dedico esta tesis a:

Mis padres, Emilia Agustin, Patricio Reyes y a mis hermanos, le agradezco el apoyo y confianza que me brindaron, que sin ella no hubiera podido lograr este objetivo. Los quiero mucha familia y gracias por todo!!!

Agradecimientos

A mi tutor el Dr. José Luis Macías Vázquez, por sus enseñanzas y amistad, ya que sin su ayuda no hubiera sido posible concretar este trabajo.

A mi coasesor Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy por su colaboración académica.

Gracias a mis sinodales, la Dra. Isabel Israde, el Dr. Giovanni Sosa, al Mc. Felipe García, el Dr. Víctor Hugo Garduño y el Dr. Mikhail Ostrooumov, por tomarse el tiempo de revisar este trabajo y darme su opinión para mejorar el escrito final.

Muchas gracias a mis amigos de vulcanología, Elizabeth, Laura, Susana, Fabiola, Silvestre, Denis, Guillermo, Antonio, Giovanni, Felipe, por la colaboración y por todos los consejos que recibí, para realizar esta tesis.

Agradezco nuevamente a los Drs. José Luis Macías, Giovanni Sosa, a Felipe García, Fabiola Mendiola, Guillermo Cisneros, Laura García, Susana Osorio, José Antonio Núñez, Mario Boijseauneau y al grupo de la clase de vulcanología de la UMSNH, por su compañía durante el campo.

Gracias a la geog. Fabiola Mendiola, MC. Felipe García y al Ing. Carlos Linares, por su apoyo en el uso de los distintos laboratorios que necesite para la realización de esta investigación.

También quiero agradecer al geog. Guillermo Cisneros por su ayuda y paciencia por facilitarme las herramientas de SIG para la elaboración del mapa geológico.

Agradezco al Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra de la UMSNH por abrirme sus puertas y brindarme el apoyo profesional para realizar la maestría en Geociencias y planificación de Territorio. Así como a la Coordinadora del Posgrado la Dra. Erna Martha López. También le doy las gracias al Instituto de Geofísica de la UNAM-Unidad Michoacán, por darme acceso a un área de trabajo y por brindarme el material para realizar esta tesis.

Gracias a CONACYT por la beca que me fue proporcionada durante mi estancia en la maestría.

Muchas gracias a mis amigos Fabiola Pizaña, Deyanira Monzón, Cesar Rincón, Sergio Martínez y Adrián Ramírez, por brindarme el apoyo moral durante la tesis.

Agradezco con mucho cariño y afecto a Jorge Guerra por su ayuda técnica y moral durante todo este tiempo.

Contenido

Lista de figuras

Lista de tablas

Resumen

Abstract

Capítulo I

1. Introducción.....	1
1.1 Localización del área de estudios.....	1
1.2 Estudios previos.....	3
1.3 Importancia del estudio.....	5
1.4 Objetivos.....	5
1.5 Metodología.....	6
1.5.1 Trabajo de Gabinete.....	6
1.5.1.1 Modelo Digital de Elevación (MDE) y modelo de análogo.....	6
1.5.1.2 Mapa geológico.....	7
1.5.2 Trabajo de Campo.....	7
1.5.3 Trabajo de Laboratorio.....	7

Capítulo II

2. Marco Geológico.....	10
2.1 La Faja Volcánica TransMexicana (FVTM).....	10
2.2 La Sierra Nevada.....	10
2.3 Geología y evolución del volcán Tlaloc.....	11

Capítulo III

3. Estratigrafía y distribución de los depósitos	14
3. Distribución de las Secuencias.....	14
3.1 Secuencia Valentín.....	14
3.1.1 Unidad Inferior (UI).....	18
3.1.2 Unidad Intermedia (UInt).....	20
3.1.3 Unidad Superior (US).....	24
3.2 Secuencia Multicapa (SM).....	30
3.3 Secuencia Cuauhtémoc.....	35
3.3.1 Unidad Inferior (UI).....	36
3.3.2 Unidad Intermedia (UInt).....	39
3.3.3 Unidad Superior (US).....	40

Capítulo IV

4. Granulometría y análisis de componentes	45
4.1 Secuencia Valentín.....	45
4.2 Secuencia Cuauhtémoc.....	50

Capítulo V

5. Petrografía y Geoquímica	54
5.1 Petrografía.....	54
5.1.1 Secuencia Valentín.....	54
5.1.2 Secuencia Cuauhtémoc.....	58
5.2 Geoquímica.....	60
5.2.1 Elementos mayores.....	60
5.2.2 Elementos traza y Tierras raras.....	62

Capítulo VI

6. Discusión	67
6.1 Erupción Valentín (44,195±2020/-161 ka).....	68
6.2 Erupción Cuauhtémoc.....	72

Capítulo VII

Conclusiones	75
Referencias	76
Anexos A	81
Anexos B	83

Lista de Figuras

Figura 1. Mapa de localización del volcán Tlaloc, dentro de la Sierra Nevada (SN) y Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM).

Figura 2. Mapa de vías de acceso al volcán Tlaloc.

Figura 3: Mapa geológico simplificado de los volcanes Tlaloc y Telapón que muestra las principales unidades geológicas, algunas unidades son similares a los contactos principales (Macías et al., 2012).

Figura 4: Mapa simplificado de las secciones estratigráficas de la Secuencia Valentín, tiene una distribución hacia el sureste del volcán Tlaloc, hacia los poblados de San Juan Cuauhtémoc, Santa Cruz Otlatla.

Figura 5. Columna compuesta de la Secuencia Valentín.

Figura 6. Imagen de la Unidad Inferior (UI) secuencia Valentín.

Figura 7. Imagen de la Unidad Inferior (UI) secuencia Valentín, sección TL1568.

Figura 8. Imágenes de la Unidad Intermedia (Int), FP1, secuencia Valentín.

Figura 9. Imagen panorámica de la UInt (FP1, FP2, FP3, FP4), secuencia Valentín.

Figura 10. Imágenes de la UInt, secuencia Valentín.

Figura 11. Imagen de la Unidad Superior (US), secuencia Valentín.

Figura 12. Imagen de la US, sección TL1520, secuencia Valentín.

Figura 13. Correlación de columna estratigráficas sector SE, Secuencia Valentín.

Figura 14. Correlación de columna estratigráficas sector E, Secuencia Valentín.

Figura 15. Imágenes de la Secuencia Multicapa, en Santa Cruz Otlatla.

Figura 16. Imágenes de la Secuencia Multicapa, en las cercanías de Río Frio.

Figura 17. Columna compuesta de la Secuencia Multicapa.

Figura 18. Correlación de columnas de la Secuencia Multicapa.

Figura 19: Mapa simplificado de las secciones estratigráficas de la Secuencia Valentín, tiene una distribución hacia el sur-sureste y sureste del volcán Tlaloc, hacia los poblados de San Juan Cuauhtémoc, Santa Cruz Otlatla y Río Frio

Figura 20. Columna compuesta de la Secuencia Cuauhtémoc.

Figura 21. Imagen de la Unidad Inferior (UI), Secuencia Cuauhtémoc.

Figura 22. Imágenes de la Unidad Intermedia (UInt), Secuencia Cuauhtémoc.

- Figura 23. Imagen de la Unidad Superior (US), Secuencia Cuauhtémoc.
- Figura 24. Correlación de columnas Secuencia Cuauhtémoc.
- Figura 25. Mapa Geológico de distribución de la Secuencia Valentín y Cuauhtémoc.
- Figura 26. Histograma de distribución granulométrica (% en peso & el diámetro de grano (Φ) de la Secuencia Valentín.
- Figura 27. Diagrama de Walker (1971), para la Secuencia Valentín.
- Figura 28. Histograma de componentes de la Secuencia Valentín.
- Figura 29. Diagrama de Walker (1971), para la Secuencia Cuauhtémoc.
- Figura 30. Histograma de distribución granulométrica (% en peso & el diámetro de grano (Φ) de la Secuencia Cuauhtémoc.
- Figura 31. Histograma de componentes de la Secuencia Cuauhtémoc.
- Figura 32. Microfotografías de la pómez blanca, Secuencia Valentín.
- Figura 33. Microfotografías de la pómez blanca, Secuencia Valentín.
- Figura 34. Microfotografías de la Secuencia Cuauhtémoc.
- Figura 35. Diagrama de Alcalis Total ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) vs Sílice (SiO_2) de Le Bas et al. (1986) para la composición química de la roca total de fragmentos de pómez de la Secuencia Valentín y Secuencia Cuauhtémoc.
- Figura 36. A) Diagrama de SiO_2 vs K_2O (Peccherillo y Taylor et al., 1976), B) Diagrama AFM (Le Bas et al., 1986) y C) Diagrama de $\text{Al}/(\text{Na}+\text{K})$ vs $\text{Al}/(\text{Ca}+\text{Na}+\text{K})$ de (Shand, 1951). De las Secuencia Valentín y Cuauhtémoc.
- Figura 37. Diagramas binarios de elementos mayores (wt% y base anhidra) MgO , CaO , Fe_2O_3 , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 , Na_2O_4 , MnO y Al_2O_3 .
- Figura 38. Diagramas binarios de elementos traza (ppm) Sr, Zr, Ba, Rb y Y.
- Figura 39. A) Diagramas de distribución multi-elementos normalizados a valores del manto primitivo (Sun y McDonough, 1989). B) Diagramas de REE normalizados con los valores de condrita (Nakamura, 1974), para la Secuencia Valentín y Secuencia Cuauhtémoc.
- Figura 40. Fases eruptivas de la Secuencia Valentín.
- Figura 41. Fases eruptivas de la Secuencia Cuauhtémoc.

Lista de Tablas

- Tabla 1. Edades radiométricas de la secuencia Valentín, Cuauhtémoc y otras erupciones.
- Tabla 2. Análisis químico de las rocas de la Secuencia Valentín.
- Tabla 3. Análisis químico de las rocas de la Secuencia Cuauhtémoc

Tabla 4. Síntesis petrográfica de todas las secciones delgadas realizadas, correspondientes a distintas unidades de la Secuencia Valentín y Cuauhtémoc.

Resumen

La Sierra Nevada se localiza en la parte central de México, esta sierra incluye de sur a norte, los volcanes Popocatepetl (5452 m), Iztaccíhuatl (5272 m), Telapón (4.000 m) y Tlaloc (4150 m). El volcán Tlaloc ubicado en la parte norte de la sierra tuvo actividad durante el Pleistoceno contemporáneamente con el Volcán Popocatepetl. Durante los últimos 45,000 años Tlaloc ha presentado al menos cinco erupciones explosivas de las cuales sólo una de ellas ha sido estudiada detalladamente. En este trabajo se describieron los depósitos de dos de estas erupciones denominadas Valentín y Cuauhtémoc cuyos depósitos se encuentran expuestos al sureste del volcán.

La erupción Valentín ocurrió hace 44,000 mil años y tuvo una dispersión principal hacia el SE del volcán a través de tres fases eruptivas que emplazaron depósitos de oleada, flujo y caídas de piroclastos. El depósito es rico en pómez que consiste de fenocristales de cuarzo, plagioclasa, sanidino, biotita, anfíboles y escasos óxidos de Fe-Ti. La pómez tiene una composición riolítica (70.3-74.68 % en peso de SiO₂). La erupción Cuauhtémoc ocurrió entre 21,000 y 25,000 años con una dispersión hacia el SE y S-SE del volcán. Sus depósitos piroclásticos (flujos de pómez y caída) consisten de abundante pómez beige a rosa compuesta por plagioclasa, cuarzo sanidino, biotita, anfíboles, piroxenos y raros óxidos de Fe-Ti. La pómez tiene una composición riolítica de 71.7 a 74.2 % en peso de SiO₂.

Los magmas de estas erupciones tienen afinidad calcoalcalina relacionada con procesos de subducción. Su composición química ácida al igual que la Pómez Multicapa de 31,000 años es de los productos más evolucionados de la Sierra Nevada.

Palabras clave: Volcán Tlaloc, Secuencias, estratigrafía, petrografía y geoquímica

Abstract

La Sierra Nevada is located in central Mexico, from south to north includes the Popocatepetl (5452 m), Iztaccíhuatl (5272 m), Telapón (4.000 m) and Tlaloc (4150 m) volcanoes. Tlaloc is at the central part of Sierra Nevada and had contemporary volcanic activity with Popocatepetl during Pleistocene. The last 45,000 years Tlaloc has made at least five explosive eruptions and just one has been studied at detail. This work describes two of this sequences named Valentin and Cuauhtémoc and its deposits are exposed at southwest of Tlaloc.

Valentin eruption occurred 44,000 years ago, it has a dispersion to the SE showing piroclastic surges, piroclastic flows and fall deposits. Valentin sequence is pumice rich with crystals of quartz, plagioclase, sanidine, biotite, amphibole and few Fe-Ti oxides, the whole pumice has rhyolitic composition (70.3-74.68 % w). Cuauhtémoc eruption occurred during 21,000 and 25,000 years ago, it has a dispersion to SE-SSE, its deposits have beige and light pink pumice of rhyolitic composition (71.7 to 74.2 % w) and is composed by plagioclase, quartz, sanidine, biotite, amphibole, pyroxene and rarely Fe-Ti oxides.

Both pyroclastic sequences are calcalkaline associated to subduction process. Its chemistry composition is the same as the 31,000 years Multicapa pumice that belongs to the most evolved products of Sierra Nevada.

Keywords: Tlaloc volcano, sequences, stratigraphy, petrography and geochemistry.

1 Introducción

1.1 Localización del área de estudio

El volcán Tlaloc (4150 m.s.n.m.) se localiza en la parte centro oriental del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM) y en la porción norte de la Sierra Nevada (Figura 1). Regionalmente, la Sierra Nevada está circundada por la Sierra de las Cruces al occidente, la Sierra de Chichinautzin al sur, el Campo Volcánico de Apan-Tezontepac al norte y volcanes miocénicos al oriente (Schlaepfer, 1968; Vázquez-Sánchez y Jaime-Palomera (1989); Encino-De Vega, 1992; García-Palomo et al., 2002; Macías et al., 2012). En este contexto, la Sierra Nevada es una cadena volcánica que constituye el parte aguas entre la cuenca de México al occidente y la de Puebla al oriente.

El volcán Tlaloc se encuentra a una distancia de 45 km de la Ciudad de México y a 67 km de la Ciudad de Puebla. El volcán está comunicado por las carreteras de cuota México-Puebla (150), por la carretera federal México-Texcoco (136), por la carretera libre Texcoco-Calpulalpan y la carretera Calpulalpan-Tlaxcala. El acceso principal a la zona de estudio se realizó por la carretera de cuota (150) y por la federal México-Puebla (190) y por los caminos secundarios que conducen a los poblados de Guadalupe Zaragoza y San Juan Cuauhtémoc. Y por otros caminos de terracería que comunica hacia los poblados de Santa Cruz Otlatla, San Juan Cuauhtémoc y las laderas altas de volcán (Figura 2).

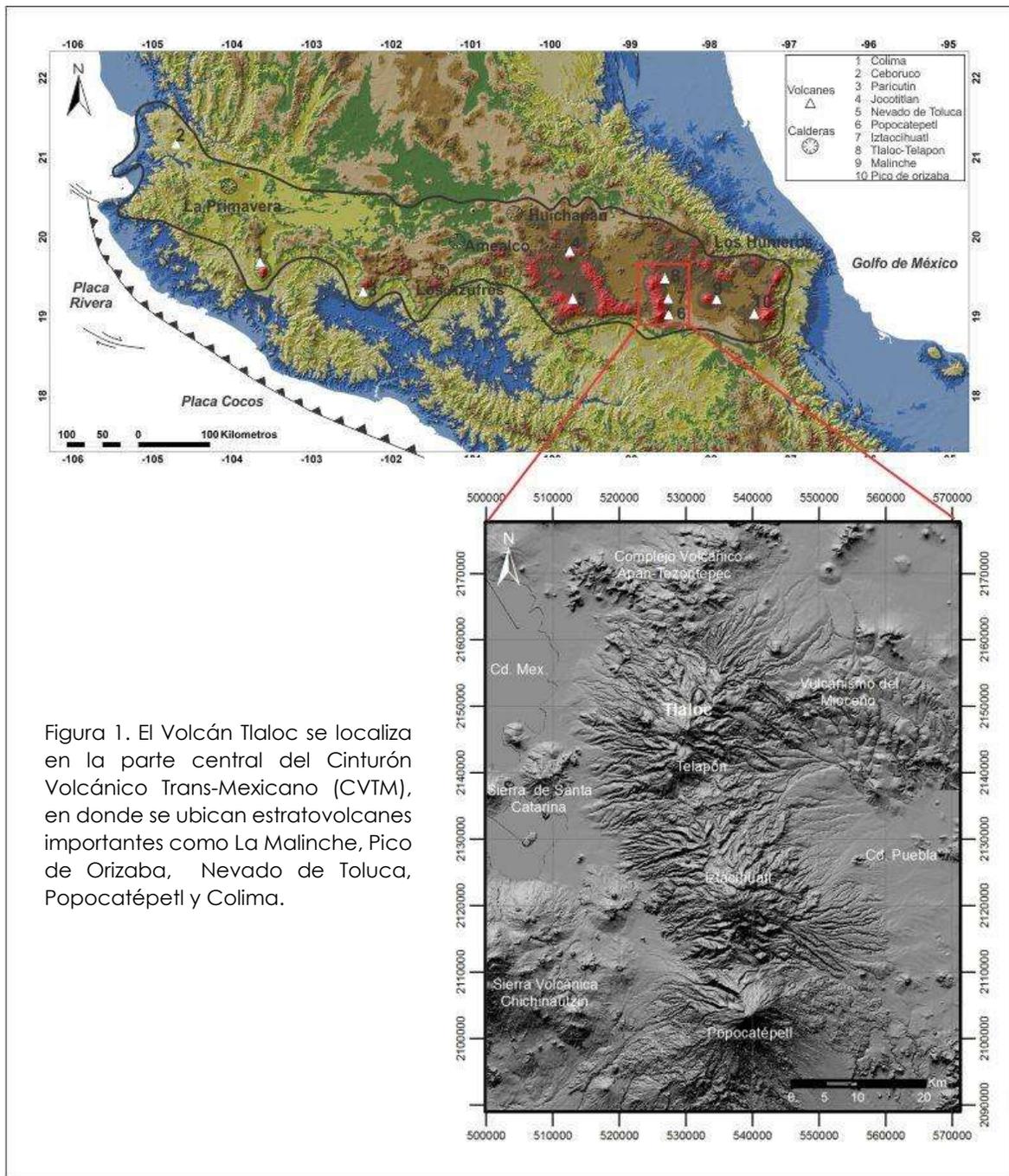


Figura 1. El Volcán Tlaloc se localiza en la parte central del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), en donde se ubican estratovolcanes importantes como La Malinche, Pico de Orizaba, Nevado de Toluca, Popocatepetl y Colima.

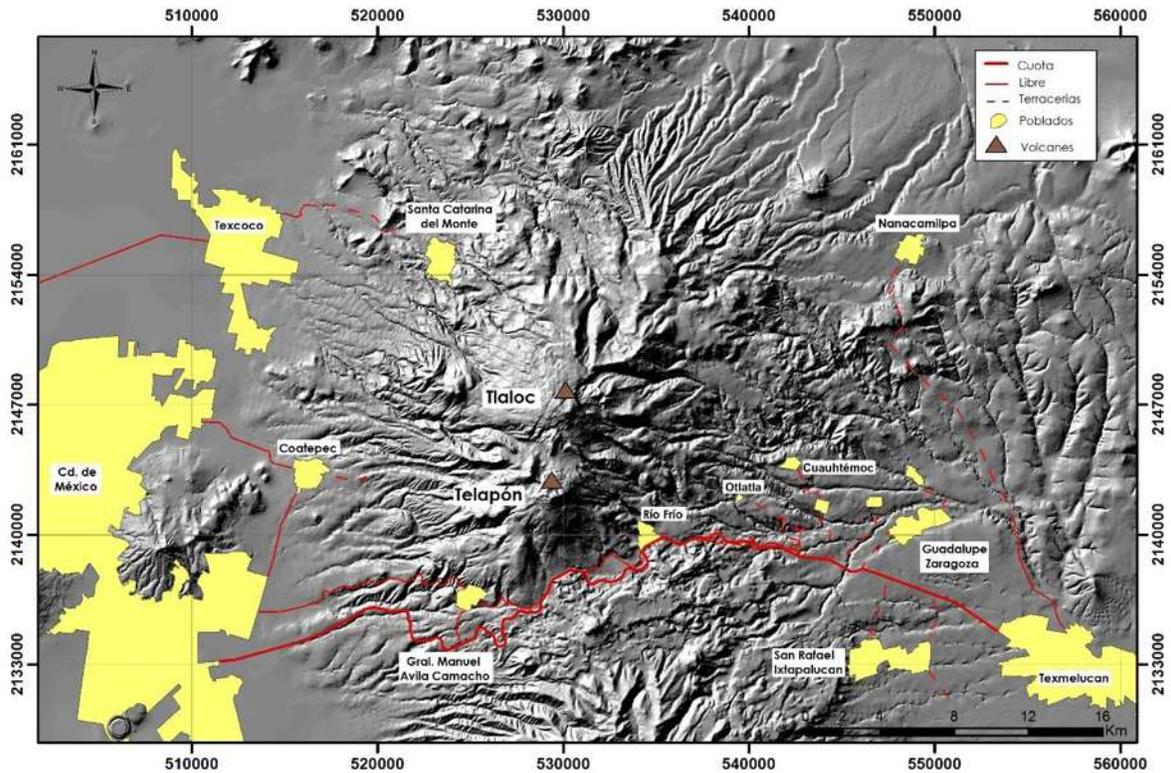


Figura 2. Modelo digital de elevación que muestra a la Sierra Nevada entre las cuencas de México y Puebla. En amarillo se muestran las ciudades principales y pueblos y con líneas rojas las principales vías de acceso a la zona de estudio. Este modelo fue construido a partir de curvas topográficas digitales del INEGI las cuales fueron importadas al programa ArcMap 10.3.

1.2 Estudios previos

La Sierra Nevada está conformada por una alineación de estratovolcanes en dirección casi Norte-Sur. Estos volcanes son de norte a sur, Tlaloc (4,150 m), Telapón (4,060 m), Iztaccíhuatl (5,286 m) y el volcán activo Popocatepetl. Estos dos últimos volcanes han sido los más estudiados de la sierra debido a su majestuosidad, actividad histórica y reciente. Por el contrario, los volcanes de la parte norte (Tlaloc y Telapón) habían recibido poca atención principalmente porque se les consideraba como volcanes antiguos o extintos. Los primeros reportes sobre las rocas volcánicas de la región fueron presentadas por Schlaepfer (1968) quien propuso el término de Formación Tlaloc para describir los derrames de lavas de Río Frío de composición andesítica y dacítica los cuales según el autor estaban interdigitados con depósitos piroclastos y aluvión en el pozo Texcoco 1 con edades entre (22.5 - 25.7 Ma y 13.4 -18.1 Ma, K/Ar). Mooser (1974), basado en fechamientos

K-Ar efectuados por Steele, proponen una edad de la Sierra Nevada, indicando que las rocas más antiguas tienen edades del Mioceno. Posteriormente, Vázquez-Sánchez y Jaime-Palomera (1989) por relaciones estratigráficas y paleomagnetismo de algunos derrames de las lavas de la Sierra de Río Frío, apoyados por edades radiométricas antiguas de formaciones sobreyacentes, a la Formación Tlaloc, se propone una edad pliocénica de 0.6 y 0.7 Ma. Después de estos estudios generales se realizaron otros con diferentes fines como geohidrológicos (Cardona-Contreras, 1975; Cruickshank-García; CNA, 1996; Urbina-Rugiero, 2006), geomorfológicos (Vázquez-Selem, 1985, 1986; Tapia-Varela et al., 2002), pedológicos (Werner et al., 1978; Heine, 2003), geoquímicos (Schlaepfer, 1968; Gunn y Mooser, 1971; Negendank, 1972, 1973; Huddart y González, 2004; Valadez-Cabrera, 2009; Juárez-López, 2009), isotópicos (Valadez-Cabrera, 2009 y Caudox et al. 2011) y cartográficos y estructurales (Schlaepfer y Mooser, 1975, 1990, 1996; Nixón, 1989; Vázquez-Jaimes, 1989, Ledezma-Guerrero, 1985; Mooser et al., 1996). Durante los últimos diez años se realizaron nuevos estudios cartográficos que pretendían obtener el mapa geológico actualizado de la Cuenca de México (García-Palomo et al., 2002) y vulcanológicos (Huddart and González, 2004; Meyer et al, 2005; Rueda, et al., 2007; Reyes-Agustin, 2011; García-Tovar et al., 2011; López-Pizaña, 2011 Macías et al., 2012; Rueda et al., 2013; Ávila-Huerta, 2015; Razo-Cruz, 2015; Boijseauneau-López, 2015) que pretendían determinar la evolución espacio temporal de los volcanes Tlaloc y Telapón. En estos trabajos se han conseguido avances importantes en la cartografía geológica de Telapón (García-Tovar et al., 2011) y Tlaloc (Macías et al., 2012) lo que ha permitido comprender la evolución geológica de la sierra. Así mismo, se descubrió que existían secuencias volcánicas del Pleistoceno tardío emplazadas por erupciones de tipo explosivo que han tenido como foco eruptivo el Volcán Tlaloc (Huddart and González, 2004; Meyer et al, 2005; Rueda et al., 2007; Reyes-Agustin, 2011; Macías et al., 2012, Rueda et al., 2013). En efecto, durante los últimos 50,000 años se han reportado hasta la fecha cuatro eventos volcánicos (Macías et al., 2012; Rueda et al., 2013). El descubrimiento de estas secuencias sitúa a Tlaloc como un volcán potencialmente peligroso.

1.3 Importancia del estudio

Debido a que el Volcán Tlaloc había sido poco estudiado se había dado poca o ninguna importancia al estudio de su evolución e historia eruptiva. Sin embargo, los estudios recientes sugieren que los volcanes Tlaloc y Popocatepetl tuvieron actividad contemporánea durante el Pleistoceno tardío (Macías et al., 2012; Rueda et al., 2013). En efecto, durante los últimos 45,000 años Tlaloc ha presentado cuatro erupciones de tipo explosivo de las cuales solo una ocurrida hace 31,000 años (pómez multicapa, Rueda et al., 2013) ha sido estudiada con detenimiento. Estas erupciones son muy importantes porque representan un pulso de magmatismo dacítico-riolítico ocurrido durante el Pleistoceno tardío al norte de la Sierra Nevada, zona que se consideraba como extinta (volcán Tlaloc). Sorprendentemente, este magmatismo félsico ha tenido como sede solo la porción norte de la sierra y no al sur en el volcán Popocatepetl en donde el vulcanismo ha sido de composición andesítico a dacítico. Por lo tanto en este trabajo se describirán los depósitos de dos de estas erupciones que están expuestos en el flanco sureste del volcán Tlaloc. Estos depósitos fueron descritos de manera general por Rueda et al. (2007) y denominados como secuencia Valentín y Cuauhtémoc. Por las razones antes expuestas es de suma importancia definir con precisión la edad de estas erupciones, los procesos eruptivos que las originaron para mejorar el conocimiento de la evolución del volcán Tlaloc.

1.4 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es realizar el estudio vulcanológico y petrográfico y geoquímico de las secuencias volcánicas Valentín y Cuauhtémoc del Volcán Tlaloc. Para lo cual se deben cumplir los siguientes objetivos.

- Definir las dos secuencias estratigráficas y su distribución espacial.
- Analizar sus características granulométricas y de componentes.
- Determinar la edad de la erupción mediante fechamientos radiométricos.

- Caracterizar la asociación mineralógica y la composición química de los productos juveniles.
- Definir la evolución de los magmas que originaron la erupción.
- Proponer un modelo eruptivo de las dos erupciones explosivas.

1.5 Metodología

La metodología consistió de cinco etapas, que son trabajo de gabinete, trabajo de campo, trabajo de laboratorio, análisis e interpretación de resultados y redacción de tesis.

1.5.1 Trabajo de Gabinete

Esta etapa, consistió en la búsqueda y recopilación de información bibliográfica disponible como publicaciones relacionadas con la cartografía vulcanológica, estratigrafía y geoquímica de la zona de estudio. Además, se obtuvieron dos cartas topográficas San Martín Texmelucan (E14B32) y Chalco (E14B31) escala 1: 50 000 del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) en formato digital para generar un Modelo Digital de Elevación del terreno y un modelo de anáglifo, como se describe a continuación.

1.5.1.1 Modelo Digital de Elevación (MDE) y modelo de anáglifo

El modelo digital de elevación (Fig. 3) fue generado a partir de curvas topográficas digitales (raster y vectorial) con una equidistancia entre curvas de 20 m, las cuales fueron importadas al programa ArcMap 10.3. El MDE es importante porque nos proporciona información altitudinal del terreno. El MDE fue importado de ArcMap 10.3 a ERDAS para generar un modelo de anáglifo que sirve para apreciar la zona de estudio en 3D. La resolución obtenida con estos modelos es de 5,5 (celdas) por lo que las imágenes obtenidas son muy nítidas y nos proporcionan a detalle rasgos superficiales del terreno. Ambos modelos (MDE y modelo de anáglifo) son muy prácticos ya que se pueden utilizar para trazar los contactos entre las diferentes unidades volcánicas tanto en gabinete como en campo.

1.5.1.2 Mapa geológico

Se obtuvo un mapa geológico preliminar empleado durante el trabajo de campo. Para tal fin se empleó el MDE, las curvas topográficas y el modelo de anáglifo sobre los cuales se trazaron los polígonos de las secuencias volcánicas y depósitos cercanos. Toda esta información se procesó en el software comercial ArcMap. Con estas herramientas se delimitó la distribución y dispersión de los depósitos piroclásticos, para ellos se utilizó rasgos geomorfológicos, pendientes y drenaje (mapas temáticos). El producto más importante fue el mapa fotogeológico, el cual es de ayuda en el trabajo de campo, ya que nos permitió la ubicación exacta de las unidades y la corroboración del contacto geológico (polígonos).

1.5.2 Trabajo de Campo

El trabajo de campo consistió de tres salidas al área de estudio, en las cuales se verificó el mapa geológico realizado anteriormente. Durante las salidas se modificaron los contactos y la distribución de los depósitos. Estos depósitos fueron observados y descritos detalladamente en 123 secciones estratigráficas. En cada sección estratigráfica se describió el color del depósito, espesor, estructura, textura, gradación, tamaño de las partículas y proporciones de las mismas (porcentaje de pómez, líticos y bloques más grandes) y contenido mineralógico.

Se colectaron 150 muestras deleznable para realizarles los distintos tipos de análisis de laboratorio (p.e. granulometría, componentes, petrografía, química de roca total, química de minerales y fechamientos por el método radiométrico de ^{14}C y/o circones (U/Th). Para los análisis petrográficos, petrológicos y químicos se tomaron las muestras más frescas (sin alteración) para obtener resultados confiables.

1.5.3 Trabajo de laboratorio

Esta etapa consistió en la preparación de las muestras para los análisis de laboratorio como se describe a continuación.

Análisis granulométrico: Se prepararon 100 muestras de material deleznable de depósitos piroclásticos encontrados en los flancos este y sureste del volcán. Estos análisis se realizaron en el Laboratorio de partículas gruesas del Instituto de

Geofísica de la UNAM, campus Morelia. El primer paso consistió en secar cada muestra en el horno a una temperatura de 60 °C por 24 horas, después de que estén secas se vacía la muestra a una bolsa y se pesa cada una de las muestras en la balanza analítica y posteriormente se hace un tamizado en seco y a mano, utilizando una serie de tamices que van de la malla > 4 Φ (0.032 mm) hasta -6 Φ (63 mm) a intervalos de 1 Φ . El material atrapado en cada tamiz se pesó nuevamente y el total de los pesos se normalizo al 100% para obtener el porcentaje en peso de cada fracción. Estos datos fueron graficados en histogramas de frecuencia (% en peso individual vs. Φ), se calcularon las medianas del diámetro de grano ($Md \Phi$; parámetros propuestos por Inman, 1952), para después graficarlo su clasificación ($\sigma\Phi$) en el diagrama de Walker (1971), para determinar el campo de clasificación donde caen los depósitos piroclásticos. Este análisis se realizó con la supervisión de la Geog. Irma Fabiola Mendiola.

Análisis de componentes: De cada muestra tamizada se tomaron las fracciones 0 Φ y 1 Φ , para realizar el análisis de componentes. Las muestras fueron lavadas con agua destilada tipo 2-grado analítica producida con un sistema de purificación de agua "MILL-RO-PLUS10", después se secaron en el horno a 60 °C. Una vez secas, se contaron 1000 partículas de las dos fracciones mencionadas anteriormente. El conteo de las fracciones se hizo con el microscopio estereoscópico "LEICA MZ 12s". Para poder analizar los componentes las partículas se colocaron en vidrio de reloj y se separaron de acuerdo con sus características en diferentes tipos. El total de las partículas separadas representó el 100% de la muestra y la cantidad de cada tipo de la partícula fue multiplicada por 100 y dividida entre el total de las partículas para obtener el porcentaje de cada tipo de partícula.

Análisis petrográfico: Para este análisis se elaboraron 32 secciones delgadas de roca (pómez) en el Laboratorio de Petrografía del Instituto de Geofísica de la UNAM, campus Morelia. Para realizarlas fue necesario cortar un cubo de 2.6 x 4.6 cm con la cortadora "BUEHLER Powerfeed Trim Saw 10 in". Una vez obtenido el cubo se ocupó una de las caras (más apropiada) para impregnar con resina UV, después se desbastó la cara impregnada con los abrasivos de carburo de silicio que van del tamaño de grano de 250, 400, 600 y 1000 μ m, luego se pegan en el

portaobjetos de vidrio y se cortan en la cortadora de precisión "Struers Accutom 50", dejando una lámina de mm. Por último, las láminas delgadas fueron desbastadas con los mismos abrasivos de carburo de silicio y alúmina hasta que quedaran las secciones delgadas listas para su observación en el microscopio petrográfico "OLYMPUS BX60" y "ZEISS Axio Scope. A1". Entre los elementos más importantes para una descripción petrográfica, se encuentran la textura de la matriz y cristales, así como el tamaño y forma de los cristales presentes, vesicularidad, alteración secundaria, cantidad de vidrio en la matriz.

Análisis geoquímico: Para realizar el análisis químico de los elementos mayores y traza, se seleccionaron 15 muestras de pómez (sin alteración) representativas de los diferentes depósitos estudiados. Las muestras fueron trituradas, lavadas y puestas a secar a 60 °C en un horno "SHEL LAB" durante 24 horas. De cada muestra se obtuvieron fragmentos pequeños y se pulverizaron con un mortero de acero "HERZOG", el cual está conformado por varios anillos concéntricos que ejercen presión sobre la roca pulverizándola. Este procedimiento se realizó en el Taller de sedimentología del Instituto de Geofísica del UNAM, campus Morelia.

Una parte de las muestras pulverizadas fueron enviadas a los laboratorios de "XRF Laboratory de la Universidad de Michigan State, EEUU" y otra parte a los laboratorios de ACTLABS en Ontario, Canadá (www.actlabs.com), para análisis cuantitativos de elementos mayores y traza mediante los métodos de Activación de Neutrones (IINA, Instrumental Activación Analysis, por sus siglas en inglés) y tierras raras mediante Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inducido (ICP-MS).

2. Marco Geológico

2.1 La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM)

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) es la provincia geológica con la mayor concentración de volcanes del Cuaternario en México, se extiende desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México (Demant, 1982; Siebe y Macías, 2006; Gómez-Tuena et al., 2005).

Esta provincia tiene una longitud de ~1,000 km y un ancho que varía entre 80 y 230 km (Gómez-Tuena et al 2005). La FVTM está constituida por más de 8000 estructuras volcánicas, como son los grandes estratovolcanes, calderas, domos, conos monogenéticos y algunos cuerpos intrusivos (Demant, 1978; Gómez-Tuena et al. 2005) de composición calcoalcalina principalmente. Algunos de los principales estratovolcanes están alineados en dirección norte-sur, perpendicular a la tendencia general de la Faja Volcánica Transmexicana (Mooser et al., 1974; Luhr y Carmichael, 1980; Nixon et al., 1987; Siebe y Macías, 2006). Dos de estas cadenas volcánicas norte-sur dominan la parte central de la FVTM que son la Sierra de las Cruces y la Sierra Nevada. Estas sierras delimitan actualmente a zona metropolitana de la Ciudad de México.

2.2 La Sierra Nevada

La Sierra Nevada se extiende por una longitud de 45 km con un espesor aproximado de ~2235 m (Reyes-Agustin, 2015). La sierra cubre un área de ~2126.8 km² y comprende de norte a sur a los volcanes Tlaloc, Telapón, Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Esta sierra delimita a las cuencas de México y Puebla. Mooser et al. (1974) incluyeron a los volcanes Tlaloc y Telapón en la Sierra de Rio Frio, y a los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl en la Sierra Nevada. Otros autores la han denominado como Cordillera Volcánica Sierra Nevada (CVSN) (Meier et al, 2007; Cadoux et al, 2011). La Sierra Nevada (SN) se compone de cuatro edificios que de norte a sur son los Volcanes Tlaloc, Telapón, Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Los

volcanes del lado sur de la cordillera están alineados NS (Popocatepetl - Iztaccíhuatl), mientras que lo de la zona norte (Tlaloc -Telapón) están alineados en dirección NE-SW siguiendo la falla Apan-Tlaloc (García-Palomo et al., 2002). Estas dos partes de la sierra están separadas por una depresión NE-SW dentro de la cual se emplazaron los volcanes Papayo e Iztaltetlac hace aproximadamente ~118 años (Siebert et al., 2010). Los volcanes al norte (Tlaloc y Telapón) tiene formas extendidas y elevaciones menores a <4100 m. Están compuestos por rocas de composición dacítica y riolítica con cantidades menores de andesitas. En cambio los volcanes al sur (Iztaccíhuatl y Popocatepetl) han formado estratovolcanes más elevados con formas cónicas más pronunciadas. Entre sus productos predominan las andesitas y las dacitas con menores cantidades de magmas riolíticos o están ausentes (Nixon, 1989, García-Tenorio, 2002).

2.3 Geología y evolución del volcán Tlaloc

El volcán Tlaloc (4120 m) es un complejo volcánico que está formado por un edificio principal que se eleva desde los 2200 m, por lo tanto el volcán tiene una altura mayor a 2000 m con respecto al terreno circundante. Esta estructura tiene flancos suaves con pendientes que varían de 4° a 16° (Tapia-Varela y López-Blanco, 2001). Su cima está ocupada por un domo central y por una serie de lavas dacíticas. Estas rocas presentan una morfología suave debida a la erosión glacial ocurrida hace 21,000 y 12,000 años (Vázquez-Selem and Heine 2000 y 2004). La cima del volcán está afectada por una estructura en herradura abierta hacia el este con un diámetro de 2.5 km de ancho. EL volcán Tlaloc está rodeado por la Sierra Quetzaltepec al oeste, el domo Yahualica al noreste por los domos Puico y Cerro Mirador Grande al sur y por la Sierra San Dieguito al norte (fig. 3).

De acuerdo con Mooser (1975) el volcán Tlaloc se formó durante el Terciario. Vázquez-Sánchez y Jaime Palomera (1989) lo incluyeron dentro de la formación Tlaloc a la cual le asignaron una edad de 0.6-0.7 ka. Después de estos estudios se inició de manera más formal el estudio de estos volcanes y sus secuencias volcanoclásticas del entorno con la obtención de diversas edades radiométricas

(González y Huddart, 2004; Rueda et al., 2007; Cadoux et al., 2011; García-Tovar y Martínez-Serrano, 2011; Macías et al., 2012; Rueda et al., 2013). En estos trabajos se ha realizado el estudio de la geología general y la reconstrucción evolutiva de los volcanes que se resume a continuación (fig. 3).

Los productos más antiguos reportados para el volcán Tlaloc tienen una edad que varía entre 1.82 ± 0.04 y 1.58 ± 0.03 Ma (Cadoux et al., 2011), edades que fueron obtenidas bloques de lavas de un depósito de flujo piroclástico localizado al NNE del volcán. Estos bloques representan líticos accidentales de rocas antiguas (Paleo-Tlaloc, Cadoux et al., 2011). El afloramiento de rocas más antiguas localizadas "in situ" alrededor de Tlaloc-Telapón aflora al sureste del volcán Telapón; se trata de una lava dacítica alterada que dio una edad de 1.4 Ma ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) y 0.946 ± 0.02 Ma con el método K-Ar (García-Tovar y Martínez – Serrano (2011) (fig. 3). Otras edades también reportadas recientemente varían entre 1.8 Ma y 1.02 Ma (Razo-Cruz, 2015 y Ávila-Huerta, 2015)

Posteriormente, la actividad continuó con la emisión de domos y flujos de lava dacíticas y depósitos piroclásticos. Estos domos rodean la cima del Tlaloc y tienen edades de alrededor de 1 Ma, como son el Tearco (1.04 Ma), Puico (1.02 Ma), Mirador Grande (0.97 Ma) y Yahualica (0.96 Ma) (Macías et al., 2012). Otros domos expuestos al suroeste del volcán Tlaloc, noroeste y oeste del volcán Telapón tienen edades cercanas a las anteriores como Yeloxochitl (1.07 Ma), Torrecillas (1.03 Ma) (García-Tovar y Martínez –Serrano, 2011; Macías et al., 2012).

Después de este periodo de actividad dómica, comenzó la construcción del volcán moderno a través de flujos de lava dacítico hacia el norte. Varios de estos flujos de lava fueron fechados por Cadoux et al. (2011) como la Mesa Xalitemi (0.9 Ma), Cuapayo (0.89 Ma) y Papalotepec (0.94 Ma).

La actividad siguió al oeste de la Sierra Quetzaltepec con flujos de lava del cerro Tlapanco fechado en 0.68 Ma (Cadoux et al., 2011) y continuo con el emplazamiento de domos y lavas riolíticas al interior de la estructura de colapso hace 129 ka. Las lavas del domo central de Tlaloc están afectadas por fallas normales NW-SE asociadas a la falla Apan-Tezontepec (García-Palomo et al., 2002).

La actividad explosiva de composición dacítica y riolítica del volcán Tlaloc comenzó desde hace por lo menos 129 ka (Macías et al., 2012). Huddart y González (2004; 2006) describieron depósitos de flujos piroclásticos ricos en pómez ubicados al NW del volcán en la Mina la Joya que fueron fechados con el método de C-14 en $34,380 \pm 890$ AP. Posteriormente, Rueda et al (2006) describieron y fecharon otras tres secuencias piroclásticas expuestas al noreste, este y sureste del volcán que denominaron Secuencia Multicapa ($31,490 + 1995 / -1595$ AP), Secuencia Valentín ($44,195 + 2020 / 1615$ AP) y la más joven Secuencia Cuauhtémoc ($25,640 + 275 / -265$ AP). Meier et al., (2007) trabajaron la vertiente norte del Tlaloc e identificaron un depósito de flujo bloques y cenizas que denominaron (P-Mex) que arrojó edades contrastantes ($33,180 \pm 550$; $23,170 \pm 270$ y $16,620 \pm 110$ AP). Estos mismos autores fecharon un depósito de oleada piroclástica en $25,670 \pm 220$ AP perteneciente a la Secuencia Cuauhtémoc en el basurero de Río Frío. Adicionalmente, Reyes-Agustin (2011) fechó dos paleosuelos que subyacen a la secuencia Cuauhtémoc que arrojaron edades más jóvenes de $21,630 \pm 765$ y $17,355 \pm 530$ AP (fig. 3).

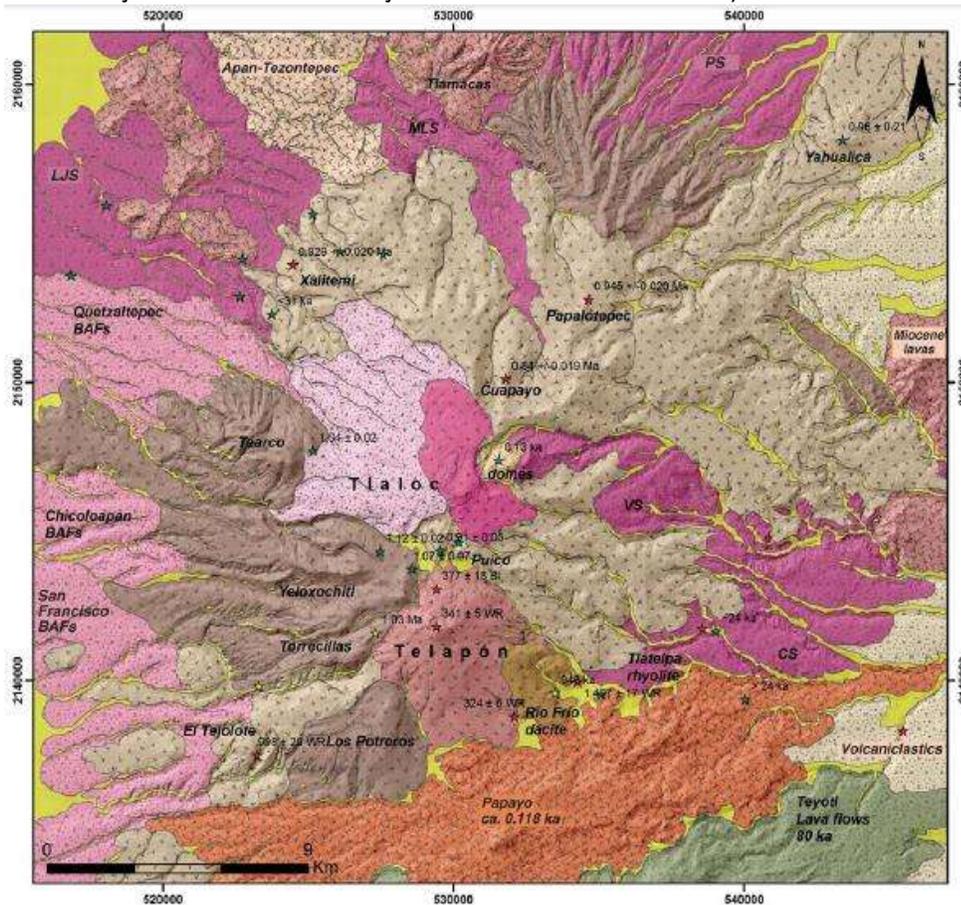


Figura 3: Mapa geológico simplificado de los volcanes Tlaloc y Telapón que muestra las principales unidades geológicas, algunas unidades son similares a los contactos principales (Macías et al., 2012).

3. Estratigrafía y distribución de los depósitos

Se realizaron 123 secciones estratigráficas de los depósitos de las secuencias Valentín (44 AP), Multicapa (31 AP) y Cuauhtémoc (21 AP) que están asociadas a tres erupciones diferentes del volcán Tlaloc. Estas secciones incluyen nuevos afloramientos y la visita y revisión de afloramientos descritos por otros autores (Tabla 1). Las secuencias estudiadas afloran sobretodo en la porción sureste del volcán Tlaloc a. 11-17.4 km de la cima. Las secuencias Valentín y Cuauhtémoc afloran en las cercanías de los poblados de San Juan Cuauhtémoc y Otlatla entre otros en donde se realizó trabajo de campo para definir sus características estratigráficas, correlación entre ellas y su edad absoluta mediante fechamientos radiométricos. De esta forma se definieron sus características, espesor, litología, composición de los fragmentos líticos juveniles y posición estratigráfica. A continuación se describen estas secuencias.

3.1 Secuencia Valentín

La Secuencia Valentín está distribuida hacia el sector sureste del volcán Tlaloc entre los poblados de San Juan Cuauhtémoc y en las cercanías del cementerio al S-W de Santa Cruz Otlatla (figura 4) y Mapa Geológico general (fig.25). Aparece expuesta en las laderas del domo Cerros Blancos y Tiopa, así como, en las cañadas Huacahuasco, Candotitla, La Cruz, Tlapacoya y en la barrancas Ojito de Agua y Honda. Se levantaron 50 columnas estratigráficas las cuales se correlacionaron y se construyó una columna estratigráfica compuesta (figs. 5, 13 y 14). La columna está formada de la base a la cima de tres unidades: 1) Unidad Inferior (UI); 2) Unidad Intermedia (UInt); 3) Unidad Superior (US)

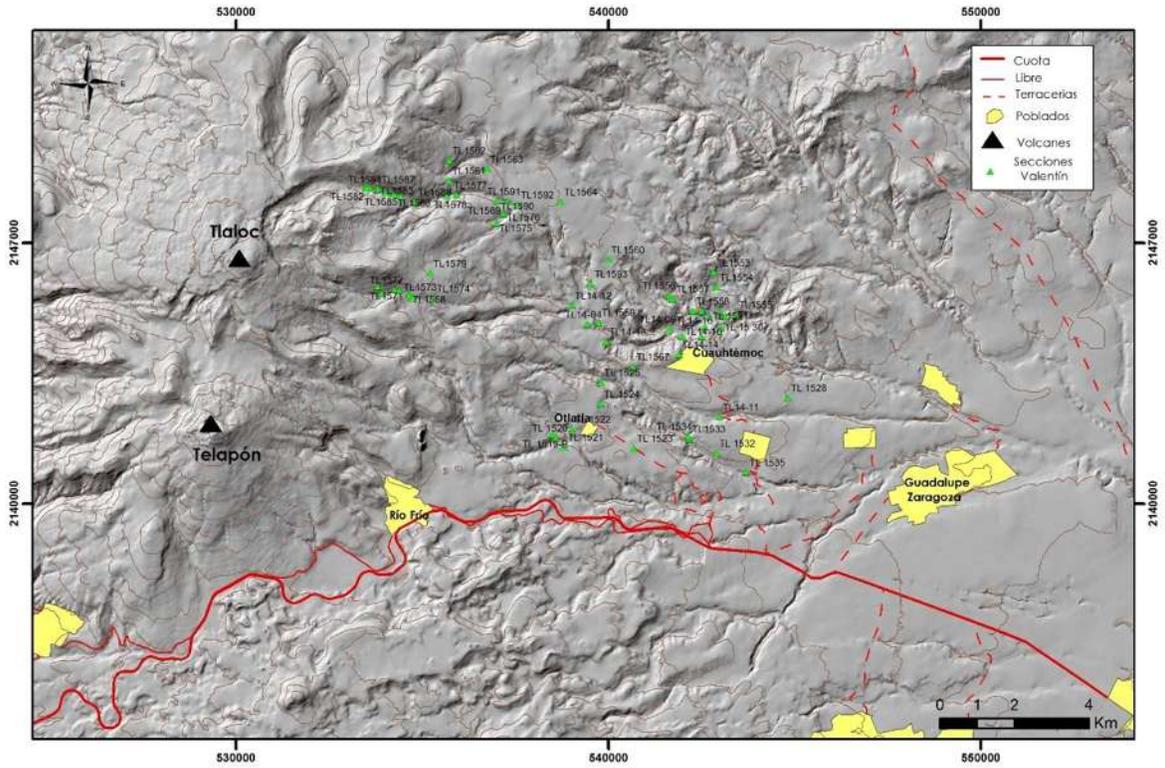


Figura 4. Mapa simplificado de secciones estratigráficas de la Secuencia Valentín, tiene una distribución hacia el sureste del volcán Tlaloc (San Juan Cuauhtémoc y Santa Cruz Otlatla).

Tabla 1: Edades radiométricas reportadas para las Secuencias Valentín, Cuauhtemoc y otras erupciones .								
Secuencia	Codigo de lab	Muestra	Localidad		Localidad	Edad Convencional	Descripción	Ref.
			Norte	Este				
Valentin	A-14340	TLA-26B-6*	19° 23' 47.6"	98° 37' 29.5"	San Juan Cuauhtémoc	44,195±2020/-1615	Carbón de un depósito de flujo piroclástico	4
	402774	TL 1520	538594	2141768	Santa Cruz Otlatia (panteon)	> 43500 BP	Carbón de un depósito de flujo piroclástico	9
	407824	TL 1576-F1 (carbon 2)	537188	2147785	Cañada Santa Cruz	> 43500 BP	Carbón de un depósito de flujo piroclástico	9
	402772	TL1407	542509	2144491	Mina las truchas Arcoiris	36010 +/- 300 BP	Carbón de un depósito de flujo piroclástico	9
Multicapa	A-14283	TLA-51B	19° 29' 46.6"	98° 42' 54.6"	Guadalupe Amanalco	31,490 +1995/-1595 AP	Carbón de un depósito de flujo piroclástico	3, 8
	Beta-103569	Base de la Tefra, U. IV	nd	nd	TB 2.24 - 2.27	31,000 ± 220	Sedimento con materia organica	2
	AA-57123	Ot-36	19° 41' 44"	98° 37' 27"	Cerro Ixtepec	34,320 ± 640	Paleosuelo	6
	AA-56626	Ot-83	19° 42' 04"	98° 37' 53"	Cerro Ixtepec	30,460 ± 390	Depósito de lahar con carbon	6
	407828	TL 15 96 (suelo)	535962	2142154	Faldas del Cerro Cuescomate	33470 +/- 230 BP	Paleosuelo	9
	407823	TL1519-B (suelo)	538505	2141854	Santa Cruz Otlatia (panteon)	30830 +/- 170 BP	Paleosuelo	9
Cuauhtemoc	A-14339	TLA-30A	19° 24' 6.9"	98° 37' 31.2"	San Juan Cuauhtémoc- Río Tenerife	25,640±275/-265	Carbón	4
	A-14282	TLA-17B	nd	nd	Deposito de basura Río Frio	25,670±220	Carbón de un depósito de oleada	5
	A-14941	TL-MSO	539037	2141668	Santa Cruz Otlatia	21,630 ±765	Paleosuelo	7
	A-14942	TL-MS4	545473	2143350	San Juan Cuauhtémoc	17,355 ± 530	Paleosuelo	7
	402775	TL 1530	543036	2144715	Río abajo de la mina las Truchas	20930 +/- 80 BP	Suelo	9
	nd	nd	nd	nd	Pasando Río Frio	40,000-35,000	Carbón de un depósito de flujo piroclástico	1
	407825	TL 15-118 (carbon)	543445	2140937	Tuchero Tierra Blanca	1150 +/- 30 BP	Carbón de un depósito de caída	9
Nevado de Toluca	402772	TL1519-C (J)	538505	2141854	Santa Cruz Otlatia (panteon)	10490 +/- 40 BP	Suelo	9

Nota: nd- no datos. Referencia (Ref.): 1- Cornwall (1971); 2- Caballero et al., (1999); 3- Rueda et al. (2006) 4- Rueda et al., (2007); 5- Meier et al., (2007); 6- Hernández-Javier (2008); 7- Reyes-Agustín (2011); 8- Macías et al., (2012); 9 - Reyes-Agustín (2015)

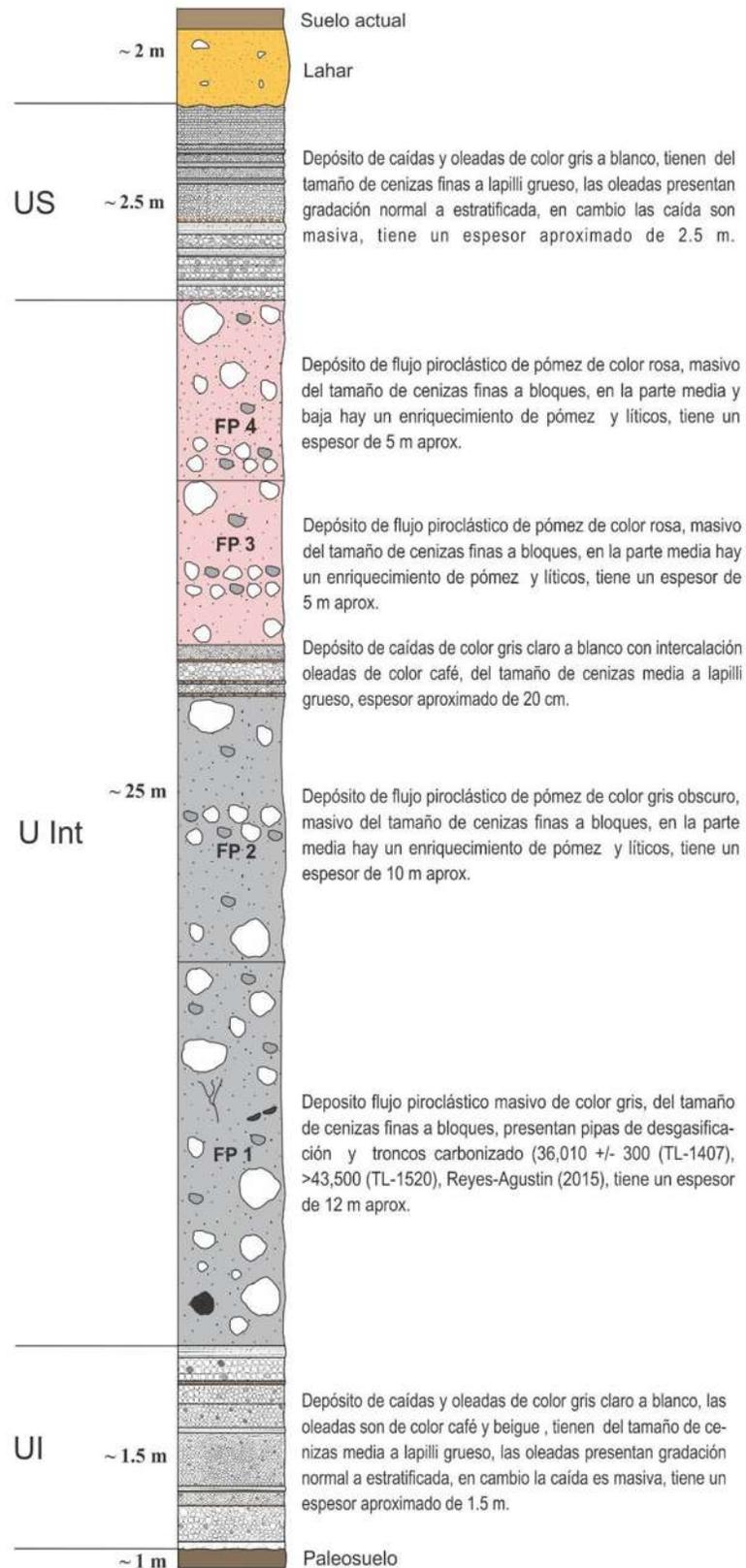


Figura 5. Columna estratigráfica compuesta de la Secuencia Valentín con sus diferentes unidades y características.

3.1.1. Unidad Inferior (UI)

Esta unidad en la mayoría de las columnas observadas consisten de ocho capas bien definidas (fig. 3). Los afloramientos más completos están situados en la mina los trucheros en las cercanías del poblado Cuauhtémoc y en las laderas del domo Tiopa (figs. 6 y 7), de la base a la cima consiste de:

UI-a: oleada piroclástica masivas de color beige a café oscuro, de ceniza media a fina, compuesto de pómez blanca, pómez gris, líticos y cristales. La UI-a presenta gradación normal, con un espesor aproximado de 19 cm. En la parte superior del depósito el tamaño de grano es de ceniza fina.

UI-b: Depósito de caída pómez, masivo de color blanco a beige de lapilli gruesa a ceniza fina, con soporte grano a grano, compuesto de pómez blanca, pómez gris, líticos accesorios y accidentales y cristales, con un espesor aproximado de 20 cm. En la parte media del depósito hay un enriquecimiento de pómez de tamaño de lapilli gruesa.

UI-c: Depósito de caída pómez masivo de color blanco a gris con fragmentos de ceniza gruesa a fina, contacto grano a grano, compuesto de pómez blanca, pómez gris, líticos accesorios, accidentales y cristales, con un espesor aproximado de 5 cm.

UI-d: Intercalaciones depósitos de caída y oleadas piroclásticas, de color blanco a beige con partículas de lapilli fino a ceniza fina, contacto grano a grano, compuesto de pómez blanca, pómez gris, líticos accesorios y accidentales, y cristales, con un espesor aproximado de 24 cm.

UI-e: Depósito de caída de pomez masivo de color blanco a gris con fragmentos de ceniza mediana a gruesa, contacto grano a grano, compuesto de pómez blanca, pómez gris, líticos accesorios y accidentales y cristales, con un espesor aproximado de 10 cm.

UI-f: Depósito de caída de pomez masivo de color blanco a gris del tamaño de ceniza gruesa a media, contacto grano a grano, compuesto de pómez blanca, pómez gris, líticos accesorios y accidentales y cristales, con un espesor aproximado de 7 cm.

UI-g: Depósito de caída de pómez masivo de color gris a blanco con partículas de lapilli medio a fino contacto grano a grano, compuesto de pómez blanca, pómez gris, líticos accesorios, accidentales y cristales, con un espesor aproximado del 20 cm. En la parte inferior del depósito en contacto con las capas UI-f y UI-d se observa una línea de alteración de color anaranjado con un espesor de 1 cm compuesta por pómez y líticos alterados de ~1 cm de diámetro.

UI-h: Oleadas piroclásticas de color café de ceniza fina a media, compuesto de pómez blanca, líticos y cristales con un espesor de 8 cm. Esta capa presenta laminación y/o capas finas.

En general la secuencia en la mayoría de las columnas estratigráficas descansa discordantemente en contacto erosivo sobre un paleosuelo. El paleosuelo varía en color de café claro a oscuro, es arcilloso y contiene materia orgánica carbonizada.

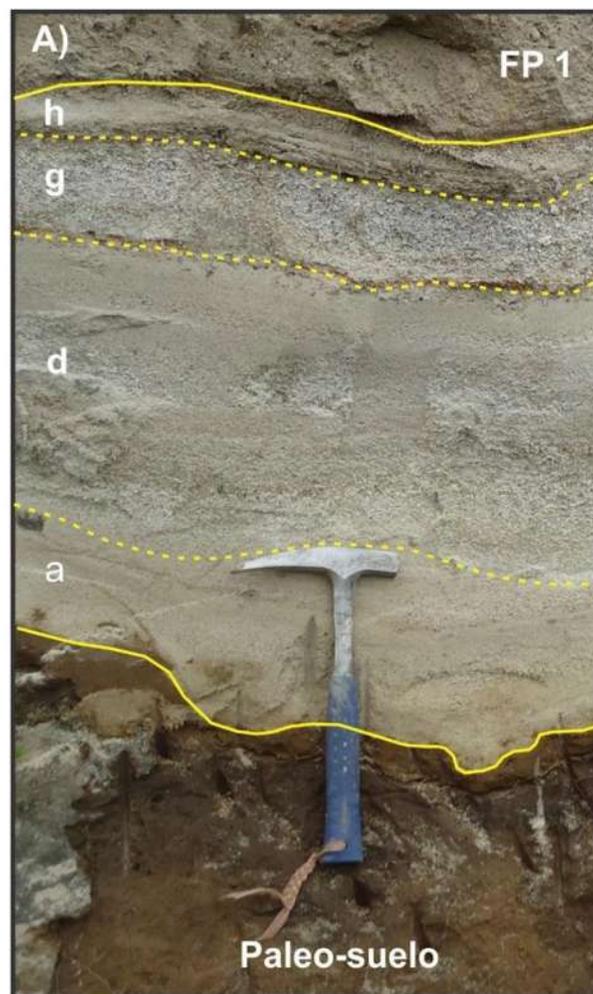


Figura 6. En la fotografía (A) se observan algunas capas de la unidad inferior (UI) de la Secuencia Valentín, como oleadas piroclásticas y depósitos de caída, que sobreyacen a un paleosuelo.

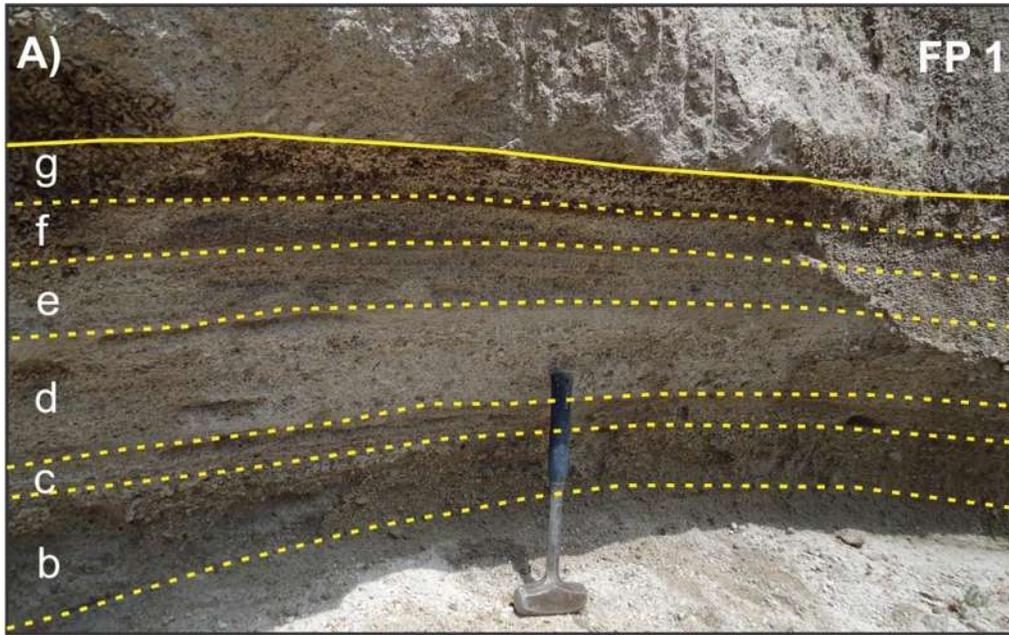


Figura 7. Detalle de la parte inferior de la sección TL1568, donde aparecen algunas capas de la UI, Secuencia Valentín.

3.1.2 Unidad Intermedia (UInf)

La unidad de flujos piroclásticos Valentín, yace discordante a los depósitos de caídas y oleadas (UI), ver figura 3. La unidad de flujos piroclásticos Valentín en la mayoría de las columnas levantadas consisten de cuatro unidades de flujo bien definida (figuras 8 y 9), separados por depósitos de caída. A continuación se describen de la base a la cima, las características de uno de los mejores afloramientos (secciones TL1404 y TL1407) situado en las cercanías del poblado Cuauhtémoc en la mina las truchas Arcoíris.

Unit-Flujo Pómez 1 (FP1)

Es un depósito masivo de color gris, con soporte de matriz de ceniza mediana, lapilli y bloques. FP1 está compuesto de clastos de pómez blanca y gris, líticos accesorios y cristales. Los clastos de pómez tienen de 6 a 30 cm de diámetro. El espesor del depósito es ~12 m y se caracteriza por tener chimeneas de desgasificación y presentar troncos carbonizados (fig. 8). Un tronco dentro del depósito (FP1) fue fechado en el presente trabajo con el método de C14 dando una edad de $44,195 \pm 2020 / -1615$ (Tabla 1).

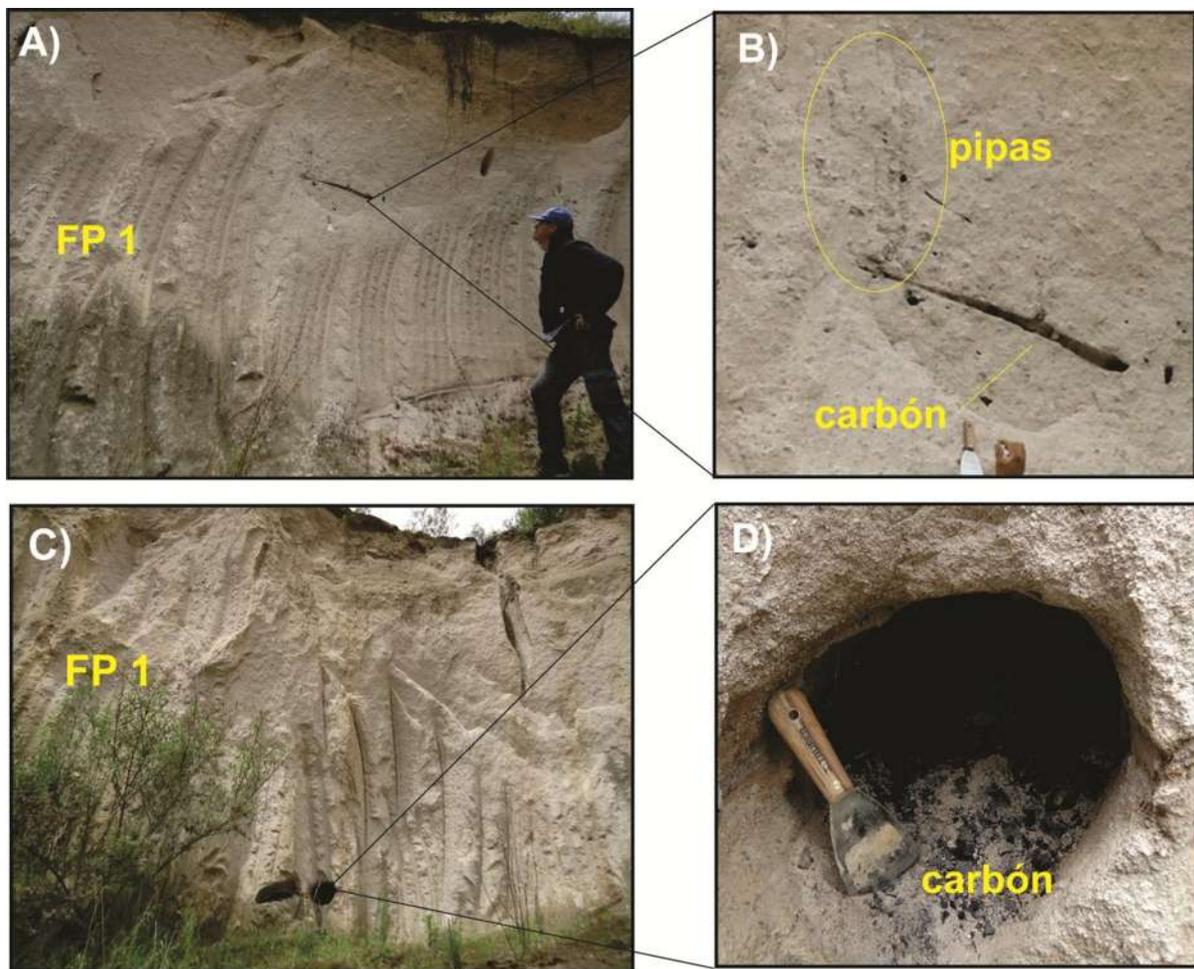


Figura 8. En esta imagen se puede observar en (A y C) la unidad de flujo 1 que se caracteriza por tener pipas de desgasificación (B) y materia orgánica carbonizada (D).

UInf-Flujo de Pómez 2 (FP2)

Es un depósito masivo de color gris, con soporte de matriz de ceniza media, lapilli y bloques. La UFP2 está compuesta de clastos de pómez gris claro, líticos accesorios y cristales. Los clastos de pómez tienen un tamaño de 10 a 30 cm de diámetro. El espesor del depósito es cercano a 10 m y se caracteriza por tener líticos dacíticos con abundante biotita (figura 9). Esta unidad de flujo, está separada de la unidad UFP 3 por un depósito de caída de color blanco a gris, compuesto de pómez blanca, líticos y cristales del tamaño de ceniza gruesa a ceniza fina, con un espesor de 20 cm (figura 10C').

UInf-Flujo de Pómez 3 (FP3).

Es un depósito masivo de color rosa, con soporte de matriz de ceniza media, lapilli y bloques. La UFP3 está compuesta de clastos de pómez gris y blanca, líticos accesorios, accidentales y cristales. Los clastos de pómez tienen un tamaño de 30 cm de diámetro. El espesor del depósito es cercano a 5 m y presenta una concentración de líticos en su parte media (fig. 9).

UInf-Flujo de Pómez 4 (FP4).

Es un depósito masivo de color rosa, con soporte de matriz de ceniza media, lapilli y bloques. La UFP4 está compuesto de pómez blanca, líticos accesorios, accidentales y cristales. Los clastos de pómez tienen un tamaño de 25 cm de diámetro. El espesor del depósito es de ~5 m y presenta una concentración de líticos en su parte inferior (fig. 9).



Figura 9. En esta panorámica se observan las cuatro unidades de flujo de la Unidad Intermedia con un espesor total aproximado de 22 m.

La UInt aflora al Oeste del poblado de san Juan Cuauhtémoc en la Mina Tenerife (sección TL1404). Aquí aparecen los cuatro depósitos de flujo de pómez (FP1-FP4), en general son depósitos masivos de color gris a rosa. FP3 y FP4 presentan un enriquecimiento en líticos en su parte media y tienen un espesor total de ~20 m. A esta unidad le sobreyace la Unidad Superior con espesor cercano a 1.5 m (figura 10A).

En cambio, en el poblado de Santa Cruz Otlatla en las cercanías del cementerio, solo se encontró la unidad FP1 que aparece como un depósito masivo gris, con un espesor de ~10 m con troncos carbonizados que fueron fechados (en el presente trabajo) con el método de C14 en >43,500 AP. A esta unidad de flujo le sobreyace la Unidad Superior (figura 10B).

Esta unidad también se encontró en las laderas del domo Tiopa (sección TL1568, fig. 10). Aquí afloran FP1 y FP2 separados por un depósito de caída de color blanco (fig. 10C'), con un espesor de 20 cm. El FP1 presenta trozos de madera carbonizada, que fueron fechados con el método de C14 en >43,500 AP (Tabla 1).

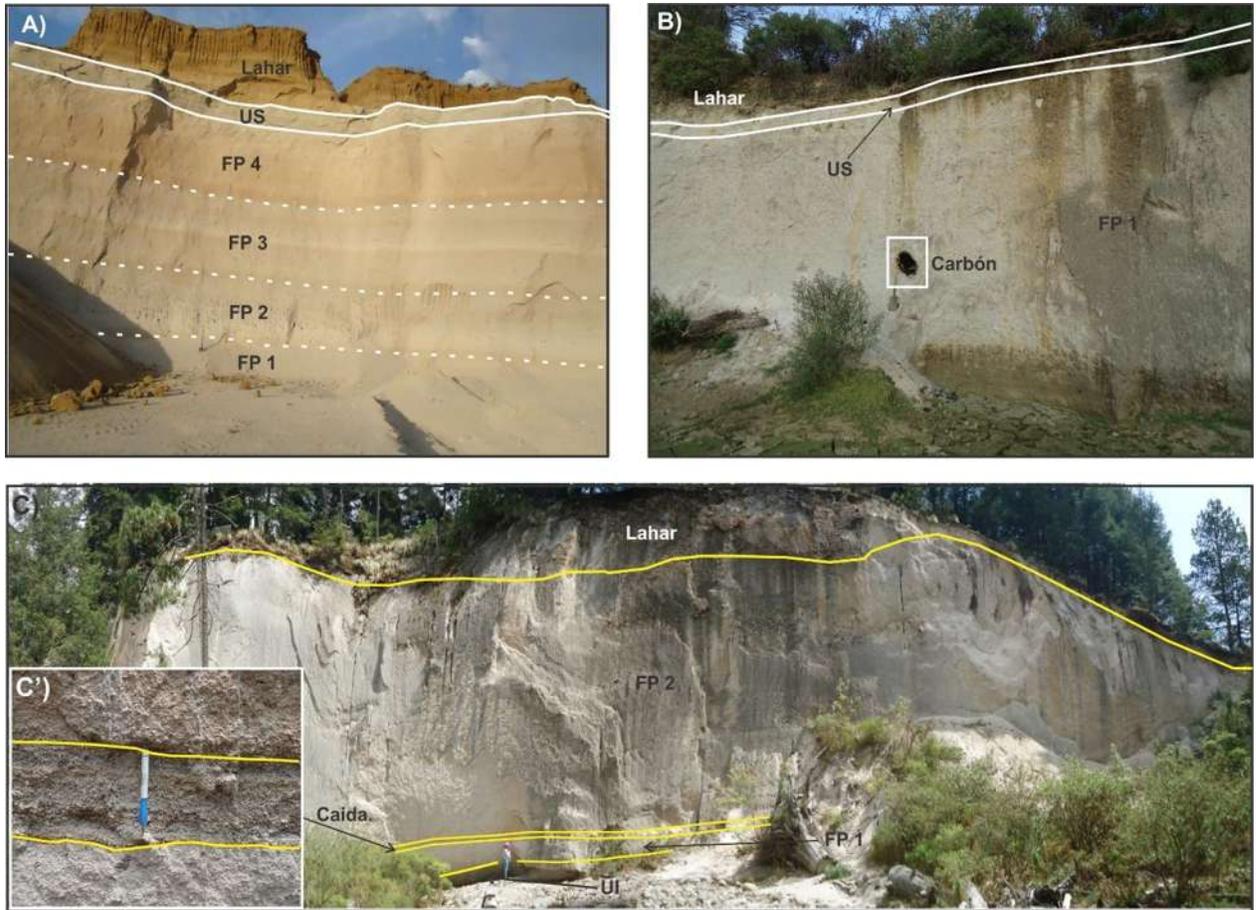


Figura 10. En esta imagen se puede apreciar la secuencia Valentín en distintas zonas: A) Unidad Intermedia (UInt) de flujos de pómez masivo que cambian de coloración (TL1404); B) Unidad de flujo de pómez (FP1), masivo con troncos carbonizados (TL1520); C) En esta imagen se aprecia a dos unidades de la secuencia, la Unidad Inferior y la Intermedia (TL1568).

3.1.3 Unidad Superior (US)

Consiste de intercalaciones de caídas de pómez y oleadas piroclásticas, conformado de cinco capas bien definidas que sobreyacen consistentemente a la Unidad Intermedia (figs. 3, 11 y 12). A continuación se describe las características del depósito (de la base a la cima), expuesto en uno de los mejores afloramientos, situado en la mina Tenerife en las cercanías del poblado Cuauhtémoc (figura 11).

US-a: Depósito de caída de pómez con intercalaciones de oleadas (40 cm de espesor total) de color blanco a gris, del tamaño de lapilli fino a ceniza fina, compuesto de pómez blanca, líticos accesorios, accidentales y cristales, presenta gradación asimétrica. Las oleadas son de color beige a gris, presentan laminaciones y capas finas.

US-b: Depósito de caída de pómez color blanco a gris del tamaño de lapilli medio a gruesos contacto grano a grano, compuesto de pómez, lítico y cristales, presenta gradación inversa y un espesor de 10 cm. Su base está enriquecida en líticos alterados hidrotermalmente.

US-c: Intercalación de oleadas piroclásticas masivas húmedas y secas de color café claro del tamaño de ceniza fina a media, compuesto de pómez, líticos y cristales. US-c tiene un espesor total de 15 cm con capas finas y laminadas. Las oleadas húmedas se caracterizan por estar endurecidas.

US-d: Consiste de capas de caídas de pómez de con intercalaciones de oleadas piroclásticas de color blanco a gris de ~1m de espesor. La capa de caída tiene gradación inversa de lapilli grueso a ceniza fina de pómez blanca, líticos accesorios y accidentales. La parte inferior de la capa presenta pómez y líticos alterados de un cm de diámetro. Las oleadas están compuestas de capas laminares a finas (cm) y son muy deleznales.

US-e: Depósito de caída de pómez de color gris con soporte grano a grano de ceniza fina a gruesa, compuesto de pómez, líticos y cristales. US-e tiene estratificación laminar y un espesor ~50 cm. La parte superior del depósito está erosionada por un depósito de flujo hiperconcentrado.

En general, a la unidad superior (US) le subyace un flujo hiperconcentrado de color amarillo, de un espesor de 2 m, y un suelo moderno de color café oscuro de un espesor de 40 cm. También aflora en el poblado de Santa Cruz Otlatla, en la cercanía del cementerio, sección TL1520, donde solo se observó FP1. Aquí le sobreyace la unidad de caídas e intercalaciones de oleadas piroclásticas (US) con un espesor ~40 cm (fig. 12).

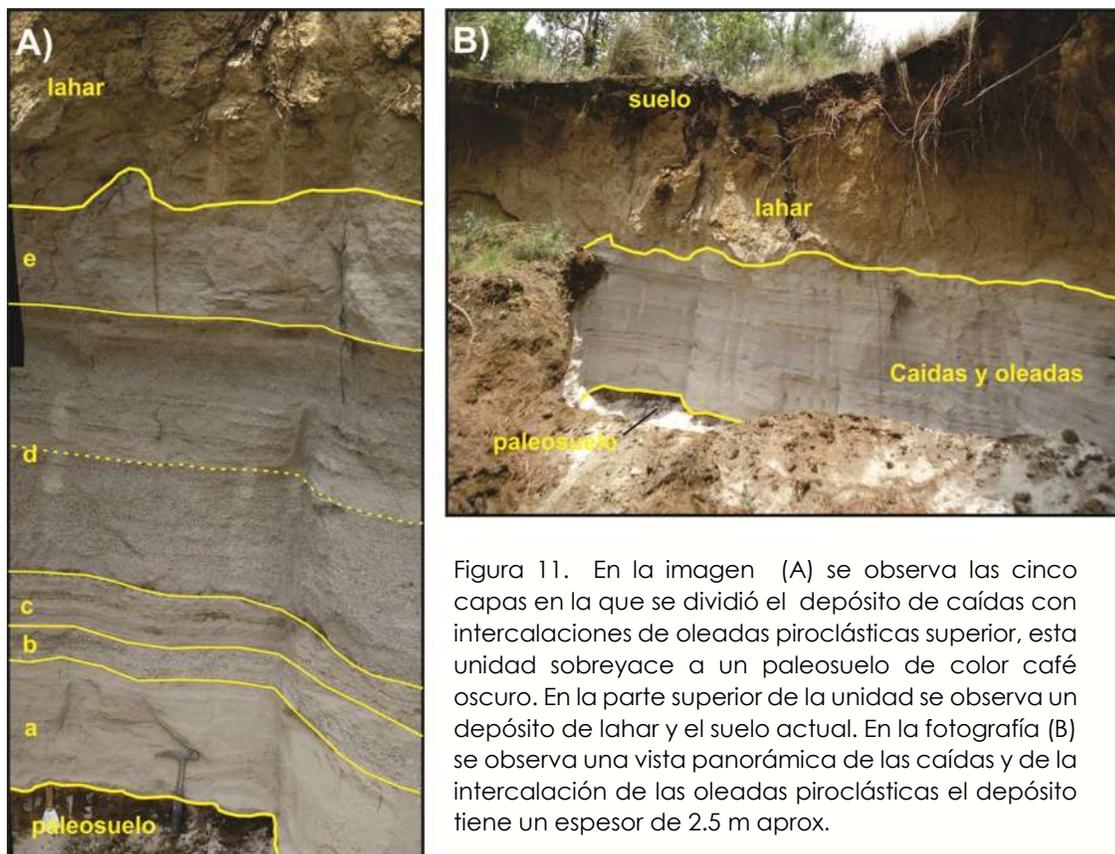


Figura 11. En la imagen (A) se observa las cinco capas en la que se dividió el depósito de caídas con intercalaciones de oleadas piroclásticas superior, esta unidad sobreyace a un paleosuelo de color café oscuro. En la parte superior de la unidad se observa un depósito de lahar y el suelo actual. En la fotografía (B) se observa una vista panorámica de las caídas y de la intercalación de las oleadas piroclásticas el depósito tiene un espesor de 2.5 m aprox.

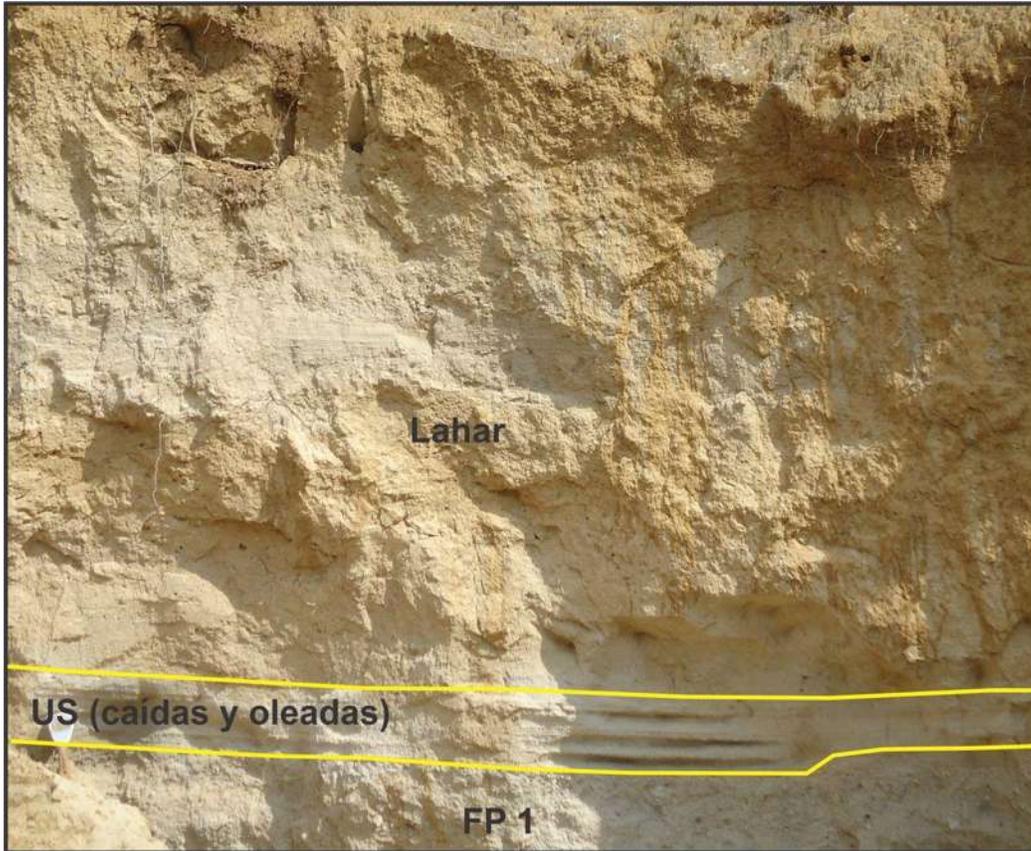


Figura 12. En la imagen se observa la unidad superior de depósito de caída con intercalaciones de oleadas, la parte superior de esta unidad esta erosionada por lahares.

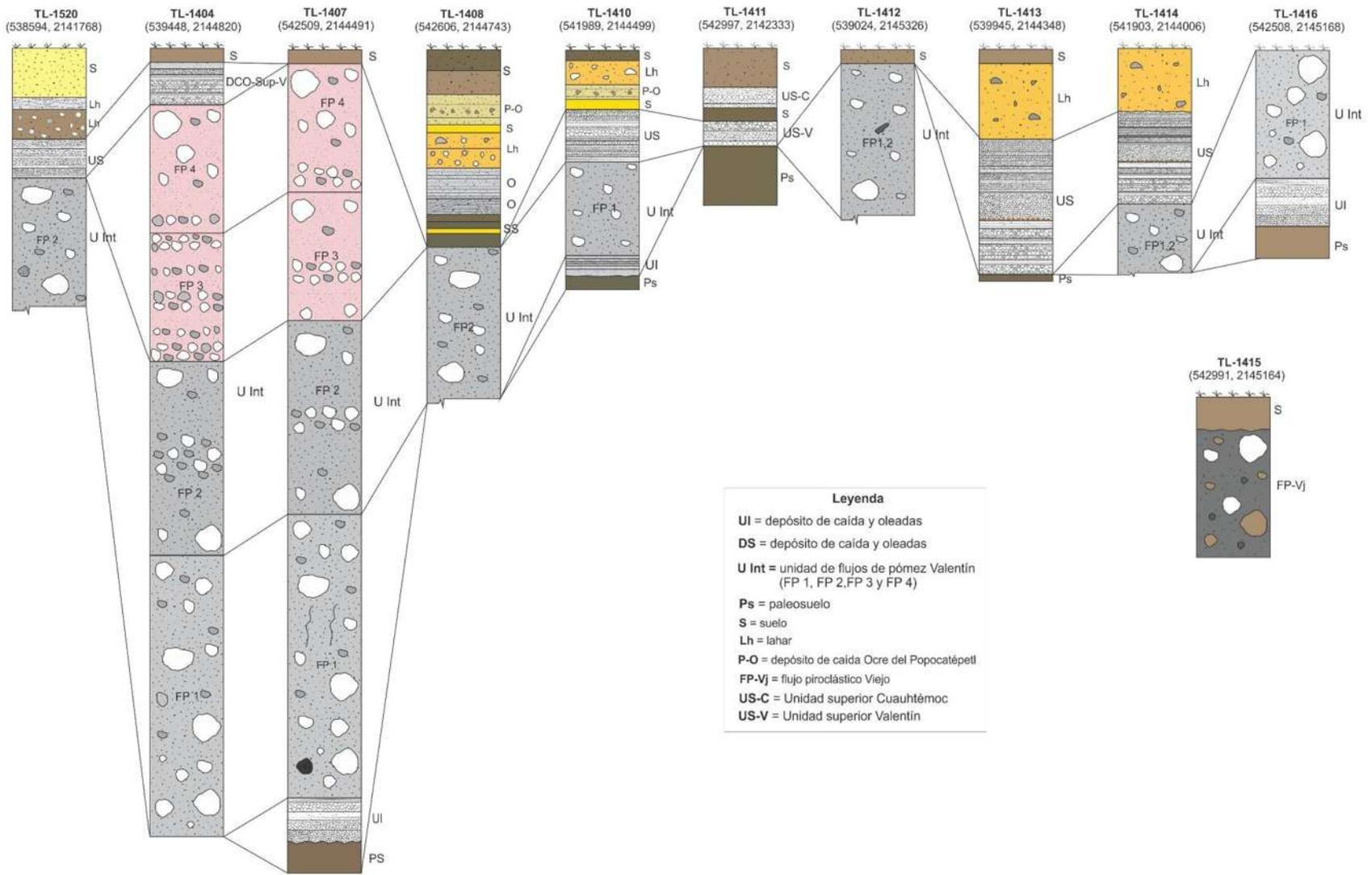


Figura 13. Correlación de columnas estratigráficas al SE de Tlaloc en las localidades de San Juan Cuauhtémoc y Santa Cruz Otlatla.

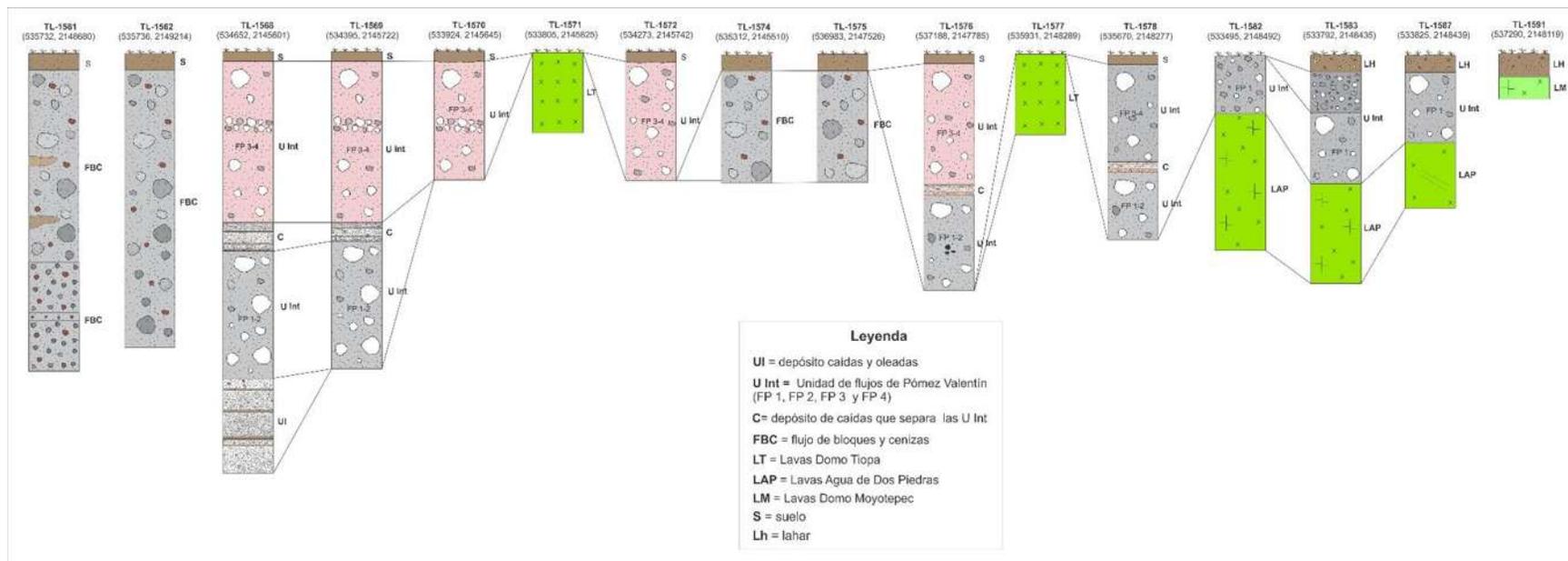


Figura 14. Correlación de columnas estratigráficas de la Secuencia Valentín al Este del volcán en las cañadas Huacahuasco, la Cruz y Tlapacoyan.

3.2 Secuencia Multicapa (SM)

Esta secuencia fue propuesta y estudiada por Rueda et al. (2013) en la porción N y NE del volcán Tlaloc con una edad de 31,000 años A.P. Sin embargo, en este trabajo se identificaron depósitos de la SM al SE del volcán aflorando al norte del cementerio del poblado de Santa Cruz Otlatla y en las barrancas Agua Azul, Chichicaxtla y Hueyotenco (fig.25). Se hizo un levantamiento de 22 columnas estratigráficas, con las cuales se construyó una columna compuesta (figs. 17 y 18). Consiste de la base a la cima de: de (1) un depósito de oleadas piroclásticas secas y húmedas, a estas oleadas le sobreyacen (2) dos unidades de flujo piroclástico de pómez y por último, (3) depósito de caída de pómez.

1.- Consiste de una serie de oleadas piroclásticas de color gris y beige con estratificación cruzada, paralela y dunas, compuestas de pómez blanca, cristales (cuarzo, plagioclasa, biotita) y líticos de ceniza fina a gruesa. Con espesores que varían de 4 a 20 cm. Esta unidad aflora en dos localidades en las cercanías del cementerio Otlatla (TL1519) y en las barrancas Chichicaxtla y Hueyotenco (TL15-96), donde estas oleadas se depositan de forma diferente, de ceniza media a gruesa y lapilli fino, formando estructuras masivas a laminar, con un espesor ~26 cm.

2.- La unidad de flujos piroclásticos (F1, y F2) de pómez, masivos de color gris claro, estos flujos están separados por un depósito de oleada piroclástica húmeda de color gris claro a café de ceniza fina, compuesto de pómez blanca, líticos juveniles y accesorios de color gris a medio y cristales (plagioclasas, anfíboles, biotita y cuarzo). Los espesores del depósito oscilan de ~20 a 30 cm. Esta unidad aflora en las barrancas Chichicaxtla y Hueyotenco (TL15-96).

3.- Depósito de caída de pómez, de color blanco, gradado, del tamaño de lapilli medio, compuesto de pomez, líticos accesorios y accidentales de color gris a medio y cristales (cuarzo, biotita) y plagioclasas). Tienen un espesor de 50 cm.

Esta Secuencia sobreyace a un depósito de flujo piroclástico (SV) el cual fue fechado en 43,500 AP (Tabla 1; fig. 15), este flujo piroclástico (SV) se encuentra al norte de cementerio y la barranca Agua Azul. Por su parte, la SM está cubierta ocasionalmente por depósitos fluviales de color gris, así como varias capas de ceniza de color gris y café, separadas por paleosuelos poco desarrollados de color café claro a oscuro. Dentro de

estas capas interestratificadas hay dos capas de caída ceniza (soportadas grano a grano) de color blanco. Uno de estos paleosuelos (PL-2) en la parte alta de la columna fue fechado en el presente trabajo en 10,490 AP (Tabla 1), las cenizas contiguas por tanto se correlacionan con la edad de la erupción Pliniana del Nevado de Toluca (Arce et al., 2010). En algunas partes estos depósitos están erosionados por lahares. La SM fue fechado en este presente trabajo 33,470 +/- 230 y 30,830 +/- 170 AP (Reyes-Agustín, 2015).



Figura 15. Imágenes panorámicas de la Secuencia Multicapa, donde las fotos A, B, y C, se muestra la estratigrafía de la secuencia; donde la imagen A1 se observa que la secuencia sobre yace a un paleo-suelo de color café oscuro con materia orgánica, y en la imagen B3 se aprecian depósitos de oleadas piroclásticas sobreyaciendo al suelo, encima de estos piroclastos se depositaron fluviales como se observa en la imagen A2. Siguiendo con la estratigrafía, las imágenes C5 y C6, se observan depósitos de ceniza de color blanco a gris, estas cenizas están intercaladas con suelos de color café claro a oscuro. En la fotografía D se puede observar un flujo piroclástico, que se encontró discordante a toda la secuencia datado en 43,500 AP.

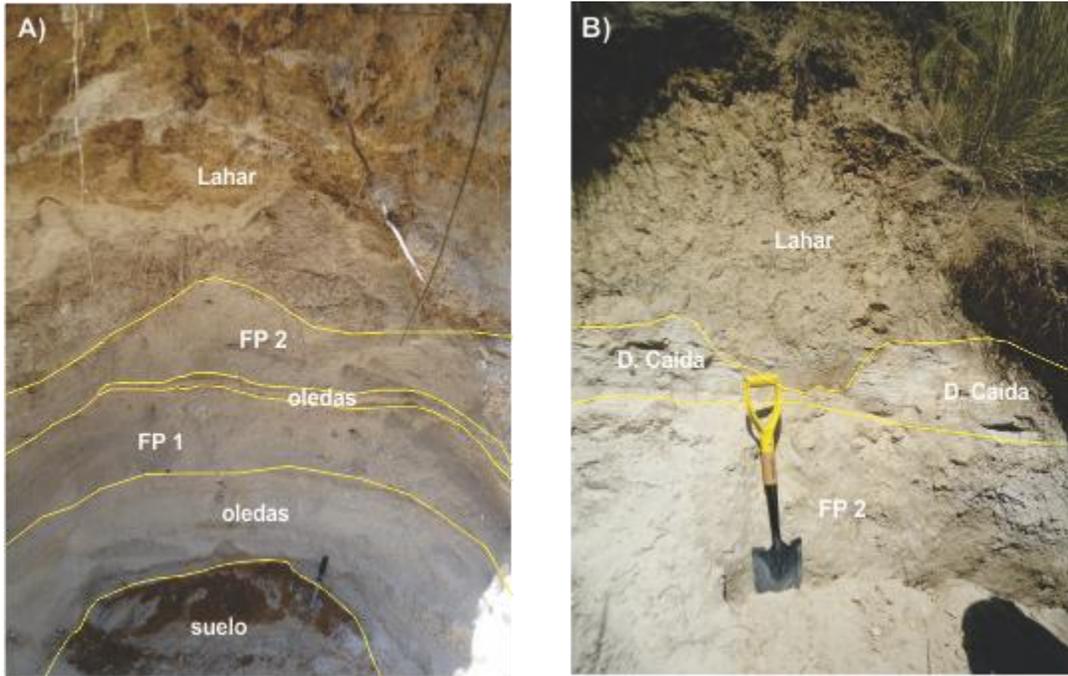


Figura 16. Vista de la SM en la cañada Hueyotenco y Chichicaxtla: (A) la secuencia descansa discordante sobre un paleosuelo, (B) se observa su parte superior con depósitos de flujo piroclástico, caída de ceniza y canales rellenos por depósitos de lahar.

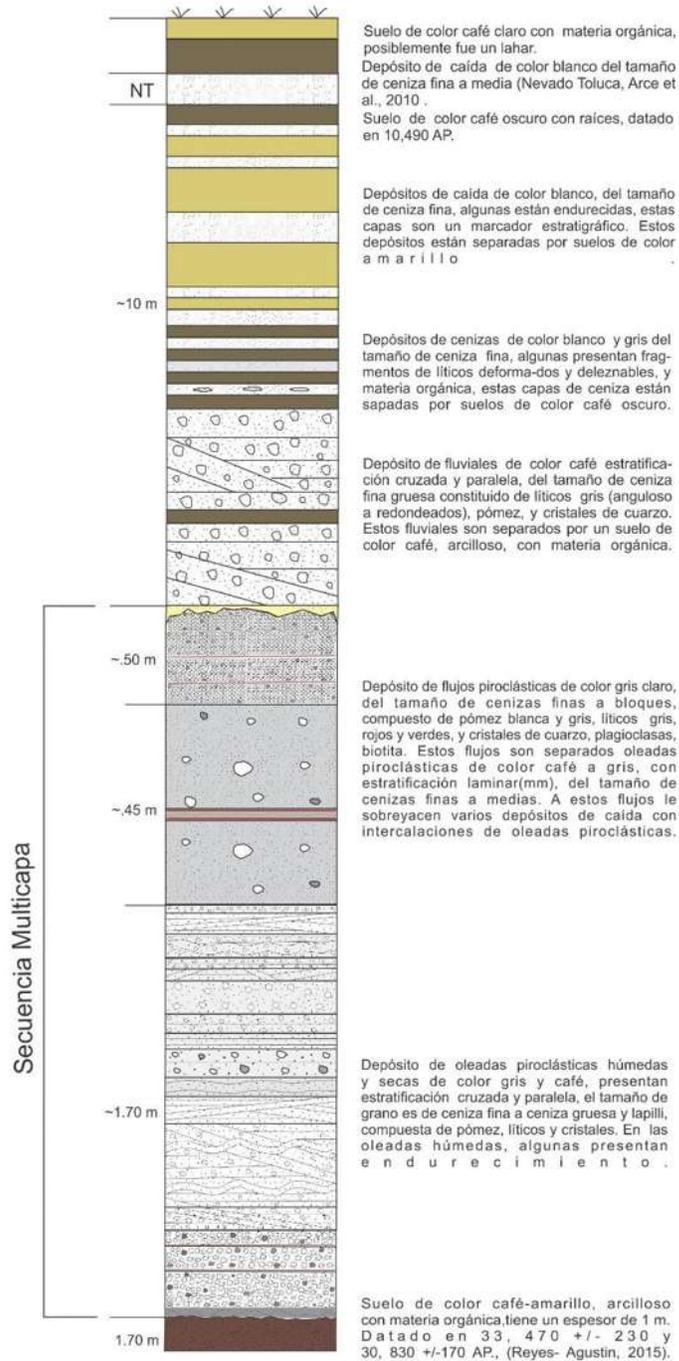


Figura 17. Columna compuesta de la Secuencia Multicapa, en ella se describe las características de las unidades de la Secuencia.

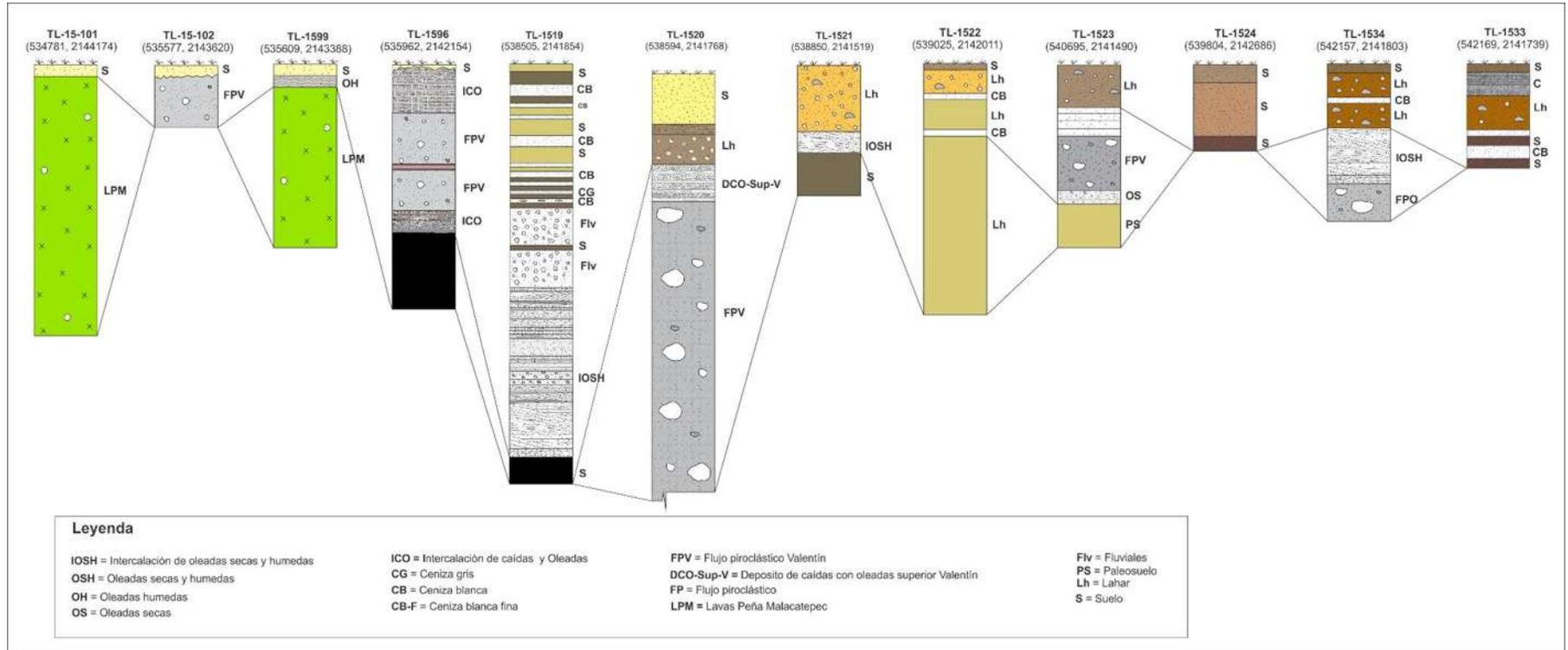


Figura 18. Correlación de secciones estratigráficas de la Secuencia Multicapa al SE del Volcán Tlaloc en las barranca Agua Azul, Chichicaxtla y Hueyotenco.

3.3 Secuencia Cuauhtémoc

La secuencia Cuauhtémoc está distribuida al SE del volcán aparece expuesta en el poblado de San Jun Cuauhtémoc, Santa Cruz Otlatla y Río Frío (fig. 19) y mapa geológico general (fig. 25) Se levantaron 51 columnas estratigráficas con las cuales se construyó una columna compuesta (figs. 20 y 24A-B,) y un perfil geológico. La columna está formada de la base a la cima en tres unidades: 1) Unidad Interior (UI); 2) Unidad Intermedia (UInt); y n 3) Unidad Superior (US).

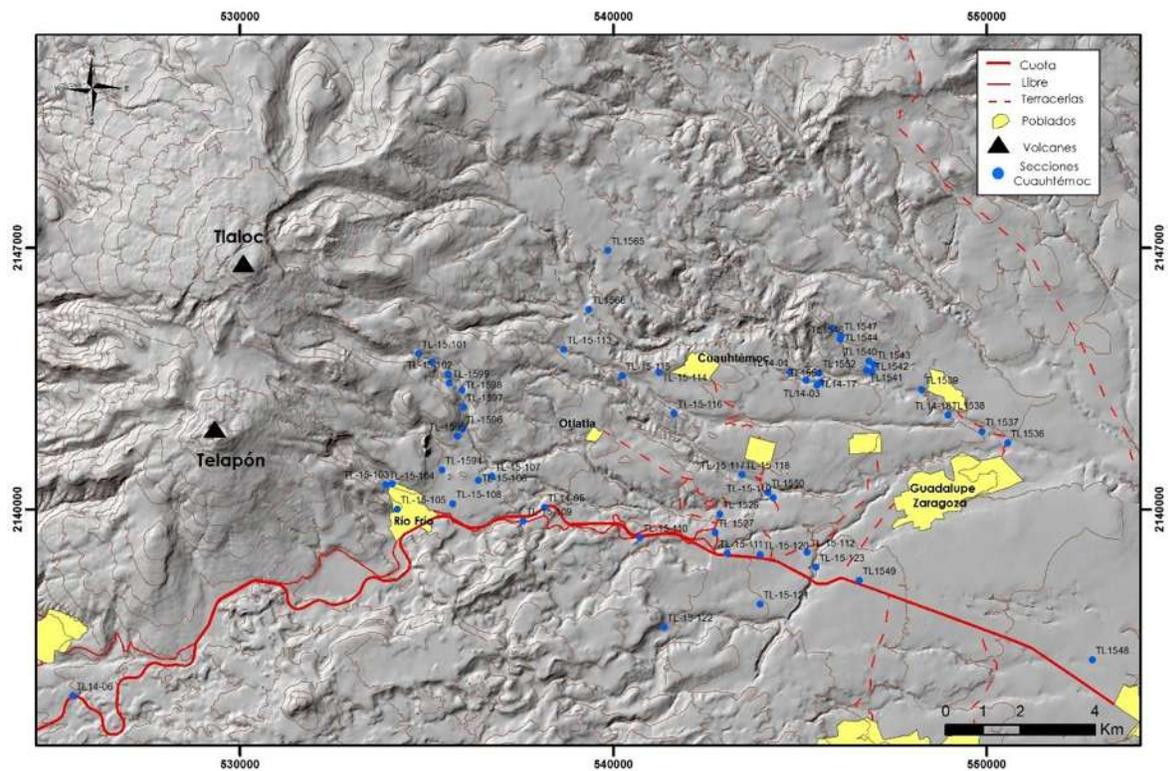


Figura 19. Mapa simplificado de las secciones estratigráficas de la Secuencias Cuauhtémoc, tiene una distribución al sur-sureste y sureste del volcán Tlaloc, hacia los poblados de San Juan Cuauhtémoc, Santa Cruz Otlatla y Río Frío.

3.3.1 Unidad Inferior (UI)

Esta unidad en la mayoría de las columnas observadas consiste de cinco capas bien definidas (a-e). A continuación se describen las características del depósito de uno de los mejores afloramientos, que expone la secuencia más completa, situado en la barranca Cuauhtémoc en las cercanías del poblado San Juan Cuauhtémoc (fig. 21A, TL-0804, TL-1403).

UI-a: Depósito de oleadas piroclásticas (6 cm de espesor) de color café oscuro a beige del tamaño de ceniza media a fina, compuesto de pómez beige, blanca y gris, cristales y líticos, con gradación múltiple. Está formado por laminaciones y capas finas. Algunas oleadas presentan endurecimiento (fig. 21).

UI-b: Depósito de caída de pómez de color café a blanco del tamaño de ceniza media a gruesa, presenta gradación múltiple, con espesor variable (13-20 cm), se caracteriza por tener laminaciones y capas finas (5-10 mm) y lentes ricos en líticos. Consiste de clastos de pómez beige, blanca y gris, líticos juveniles, accesorios y cristales (fig. 21).

UI-c: Depósito de caída de pómez de color gris a blanco endurecido (3-5 cm de espesor) de ceniza fina a muy fina con gradación inversa. Compuesto de clastos de pómez beige, blanca y gris, líticos juveniles, accesorios y cristales (figura 21).

UI-d: Depósito de caída de pómez (7.5 cm de espesor) de color café oscuro a claro de ceniza gruesa a fina, compuesto de pómez beige, blanca y gris, líticos y cristales, con soporte grano a grano y gradación normal (fig. 21).

UI-e: Depósito de caídas intercalado con oleadas piroclásticas (4.5 cm de espesor) de color café oscuro a claro, de ceniza fina a media, compuesto de pómez beige, blanca y gris, cristales y líticos. El depósito caída presenta gradación múltiple. Las oleadas tienen laminaciones y capas finas algunas de estas están endurecidas (fig. 21).

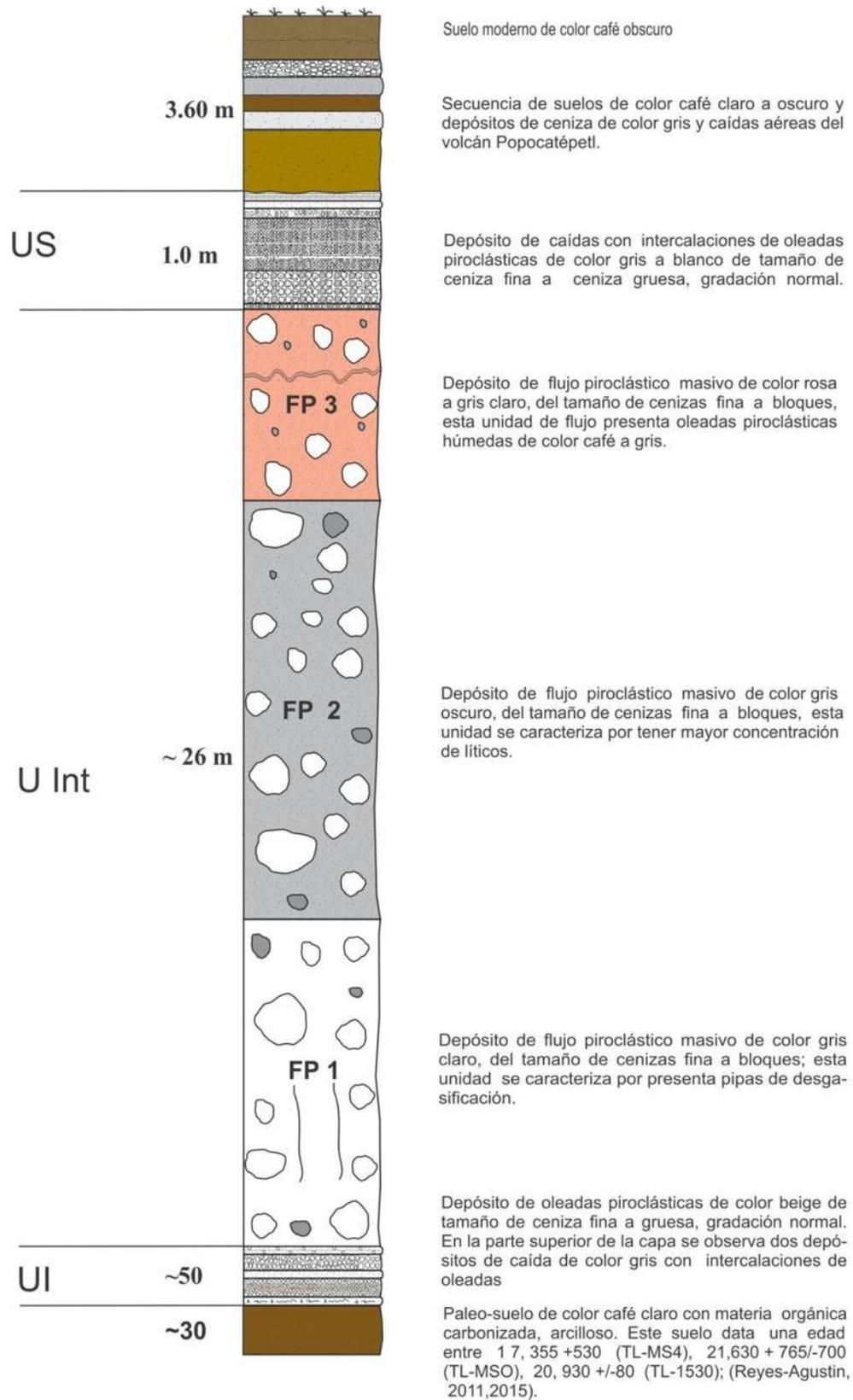


Figura 20. Columna compuesta de la Secuencia Cuauhtémoc con sus diferentes unidades.

De manera general la Unidad Inferior (UI) descansa discordantemente sobre un paleosuelo que fue fechado en el presente trabajo, con el método C14 en $17,355 \pm 530$ y $25,670 \pm 220$ años A.P. Este paleosuelo es de color amarillo a café, limoso-arcilloso y contiene materia orgánica carbonizada.

La UI aparece cerca de la mina los trucheros Arcoíris como capas de color café a gris con un espesor de 60 cm, en contacto con un paleosuelo datado en $20,930 \pm 80$ años A.P. (columna TI-1530, fig. 23). En el poblado de Otlatla (barranca Santa Cruz), las capas a y c están más espesas mientras que las capas b y e tienen partículas de lapilli fino a ceniza gruesa. Además se puede apreciar que la capa a erosiona al paleosuelo que fue fechado en $21,630 \pm 765$ años A.P. (ver columna TL-0806, fig. 23A). En el poblado de Río Frío (autopista, sección TL-0807 y TL-1405) las unidades Inferior (UI) y superior (US) están en contacto directo (ver columna TL-0807, figura 23A).

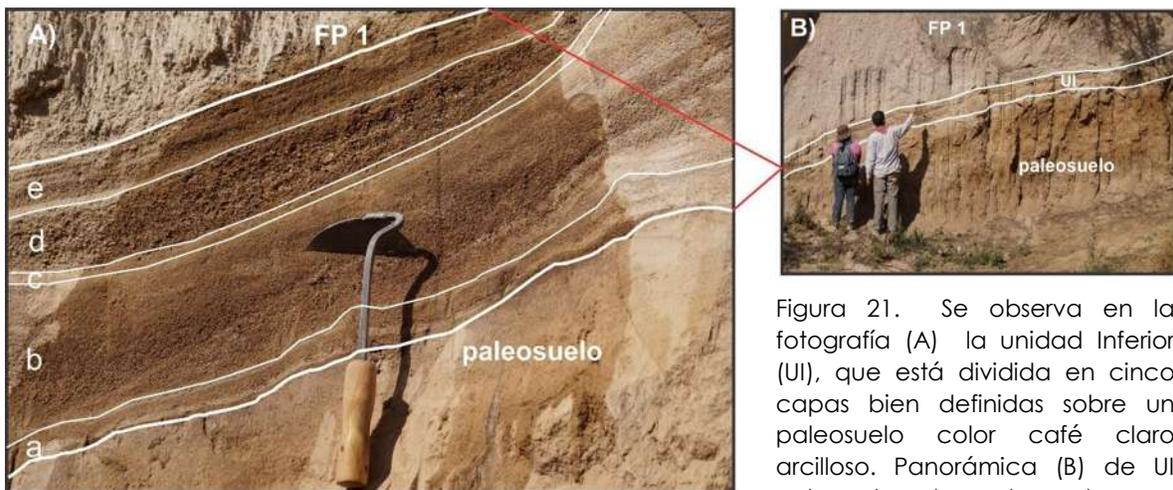


Figura 21. Se observa en la fotografía (A) la unidad Inferior (UI), que está dividida en cinco capas bien definidas sobre un paleosuelo color café claro arcilloso. Panorámica (B) de UI entre el paleosuelo y la una unidad de flujo piroclástico.

3.3.2 Unidad Intermedia (UInt)

Esta unidad sobreyace de forma erosiva al depósito de caídas y oleadas (UI). La UInt en la mayoría de las columnas observadas consiste de tres unidades de flujo bien definidas (figs. 20 y 22). A continuación se describen las características del depósito, de uno de los mejores afloramientos que expone la secuencia más completa, situada en la barranca Cuauhtémoc en la cercanía del poblado de Cuauhtémoc.

UInt-Flujo de Pómez 1 (FP-1)

Consiste de un depósito masivo (~9 m de espesor) de color beige a gris claro, con soporte de matriz de ceniza media con bloques y lapillis de pómez beige, blanca y gris, líticos juveniles, accesorios y cristales. Los clastos de pómez están orientados y algunos clastos tienen tamaños de más de 23 cm. El depósito presenta una alternancia de capas masivas de 30 a 50 cm de espesor y pipas de degasificación (fig. 22).

UInt-Flujo de Pómez 2 (FP-2)

Comprende de un depósito masivo (~10 m de espesor) de color gris claro, con soporte de matriz de ceniza media, con lapilli y bloques de pómez blanca, beige y gris, líticos juveniles, accesorios y cristales. Los clastos de pómez están orientados en dirección al flujo y algunos clastos presentan tamaños de 6 a 20 cm. Esta unidad yace concordantemente a FP-1. Esta unidad FP-2 en otros sitios presenta en la parte superior del flujo varias capas de oleadas piroclásticas (columna TL1566, fig. 24B).

UInt-Flujo de Pómez 3 (FP-3)

Consiste de un depósito masivo (~8 a 13 m de espesor) de color rosa, con soporte de matriz de ceniza media con lapilli y bloques de pómez (blanca, beige y gris), líticos juveniles, accesorios y cristales. Los clastos tienen tamaños de más de 6 a 15 cm. FP-3 cubre a FP-2 y se caracteriza por presentar en la parte media una capa de oleadas de color café claro a gris con un espesor de 1 cm.

La UInt también está expuesta en la mina los trucheros Arcoíris en donde aparece FP-1 de color beige a gris con un espesor de 13 m (columna TL-1530, fig. 24B). Al

norte del pueblo de Cuauhtémoc en la barranca Hueyotitla afloran FP-1, FP-2 y FP-3 (~13 m de espesor) en forma masiva de color beige, gris y rosa. En Otlatla, solo aflora solo la unidad FP-1 (~4m de espesor) de color gris claro a café claro (columna TL-0806, fig. 24). Por el contrario, en Río Frío (basurero) sólo aparece FP-1, de color beige a gris claro, con soporte de matriz de ceniza media, y lapilli y bloques con gradación normal (columna TL-0808, fig. 24). Esta unidad sobreyace discordante a un paleosuelo y a su vez este paleosuelo a lavas del volcán Papayo (~118 ka, Macías et al 2012).

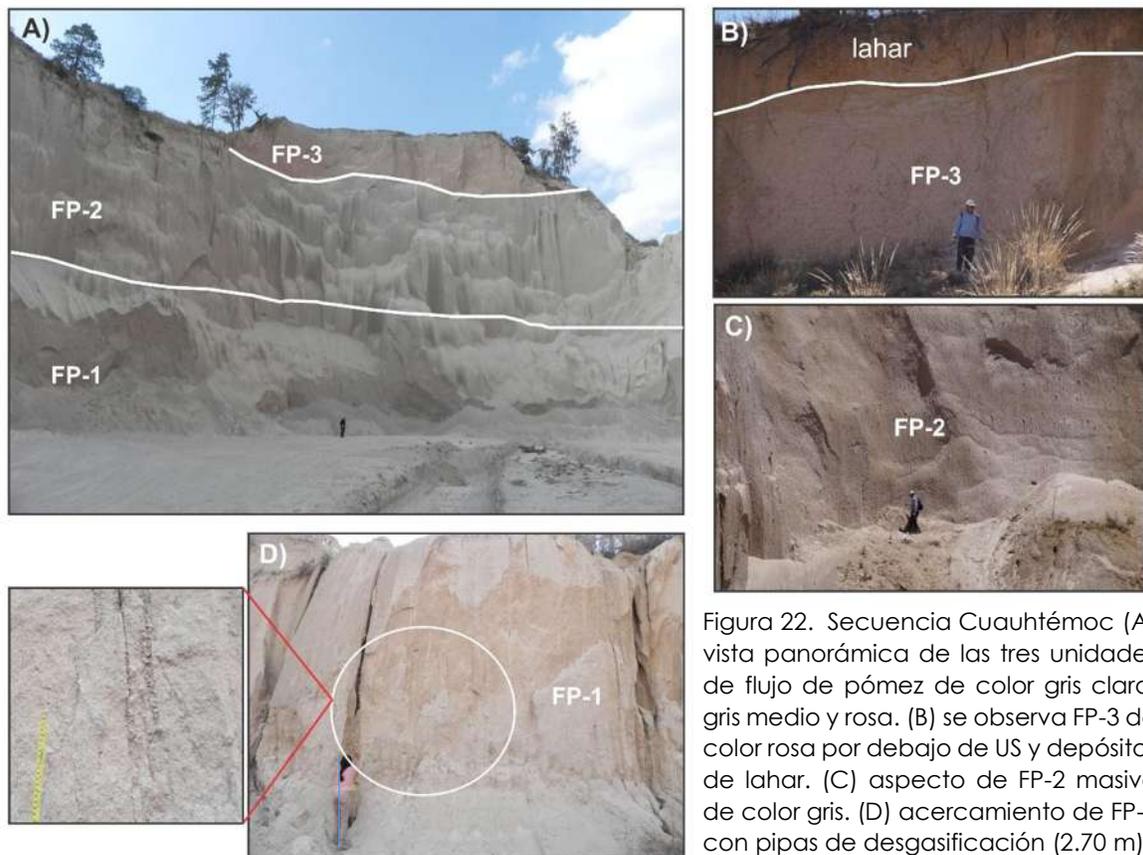


Figura 22. Secuencia Cuauhtémoc (A) vista panorámica de las tres unidades de flujo de pómez de color gris claro, gris medio y rosa. (B) se observa FP-3 de color rosa por debajo de US y depósitos de lahar. (C) aspecto de FP-2 masivo de color gris. (D) acercamiento de FP-1 con pipas de desgasificación (2.70 m)

3.3.3 Unidad superior (US)

Consiste de alternancias de depósitos de caída y oleadas piroclásticas. La unidad sobreyace discordante a la unidad intermedia (UInt). La US se dividió en seis de capas bien definidas (a-f). Esta unidad presenta intercalaciones de caídas y oleadas piroclásticas (figs. 19-23). A continuación se describe la US de la base a la cima, de uno de los mejores afloramientos situado en la mina Cuauhtémoc (columna TL-1402, fig. 24A).

US-a: Depósito de caída con gradación masiva (1-3 cm de espesor) de color café a gris de ceniza gruesa a lapilli grueso, rico en líticos y menos abundante pómez blanca y gris y cristales (fig. 23).

US-b: Depósito de caída con gradación masivo (8 cm de espesor) de color gris a beige de ceniza media a gruesa, con soporte grano a grano y gradación inversa. Consiste de pómez blanca, beige y gris, líticos juveniles, accesorios y cristales (fig. 23).

US-c: Depósito de caída (30 cm de espesor) de color gris a blanco del tamaño de ceniza media a fina, con soporte de grano a grano. La capa está compuesta de clastos de pómez blanca, gris y beige, líticos juveniles, accesorios y cristales. La capa tiene intercalaciones de oleada piroclástica de color café de ceniza media a fina en láminas (fig. 23).

US-d: Depósito de caída (9 cm de espesor) de color gris, de ceniza media a gruesa, con soporte grano a grano y gradación inversa. Consiste de clastos de pómez blanca, gris y beige, líticos juveniles, accesorios y cristales (fig. 23).

US-e: Depósito de caída con gradación masivo (4 cm de espesor) de color blanco, de ceniza media a gruesa, con soporte grano a grano y gradación inversa. Contiene clastos de pómez blanca, gris y beige, líticos juveniles, accesorios y cristales (fig. 23).

US-f: Consiste de intercalaciones de depósito caída aérea con oleadas piroclásticas. Los depósitos de caída son de color gris a blanco (9 cm de espesor) de ceniza media a gruesa, con soporte de grano a grano. La capa está compuesta de pómez blanca, gris y beige, líticos juveniles, accesorios y cristales. Las oleadas piroclásticas son de estructura laminadas de color café de ceniza media a fina (Fig. 23).

En Río Frío (basurero y autopista) esta unidad yace discordantemente sobre un depósito de oleada piroclástica (columnas TL-0807 y TL-0808, fig. 24A).

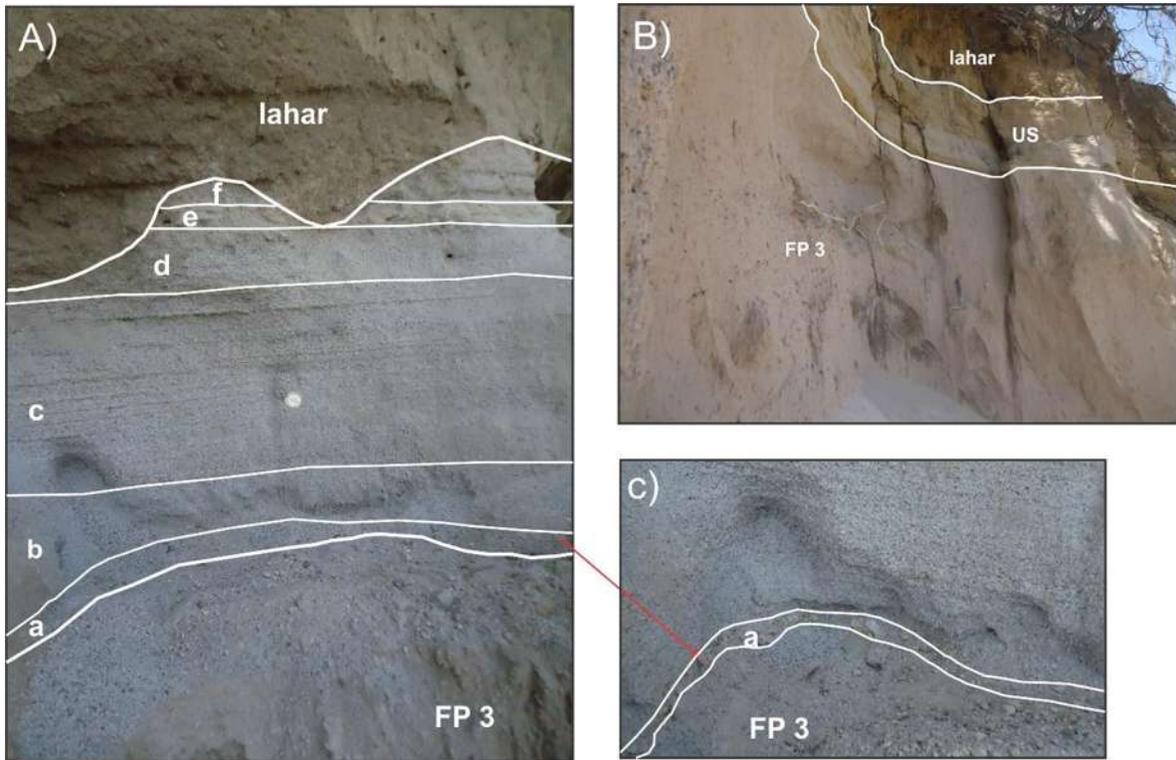


Figura 23. Unidad Superior de la Secuencia Cuauhtémoc. (A) Se aprecian seis capas que sobreyacen a la unidad intermedia de flujos piroclásticos, (B) vista panorámica de US sobre el depósito de flujo piroclástico (FP 3). (C) acercamiento de la capa que descansa en FP-3,

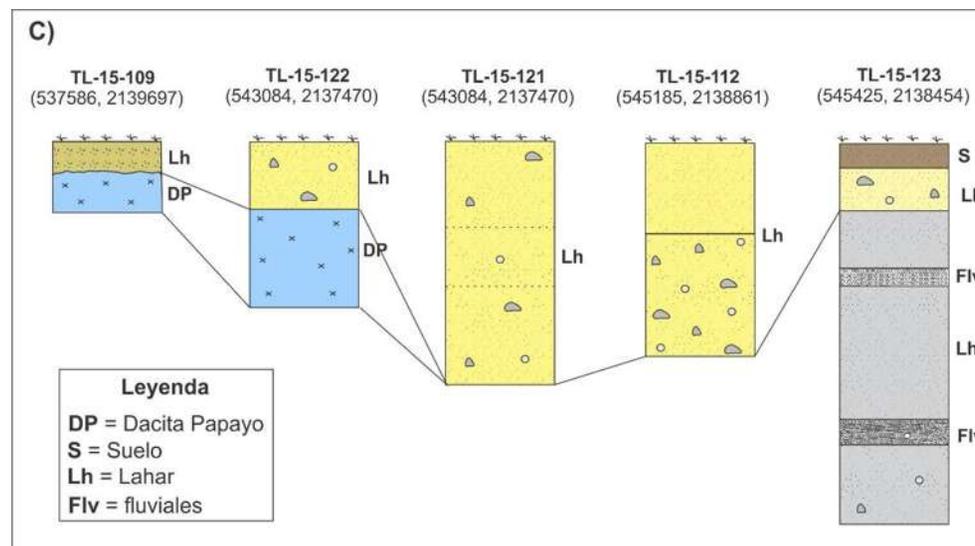
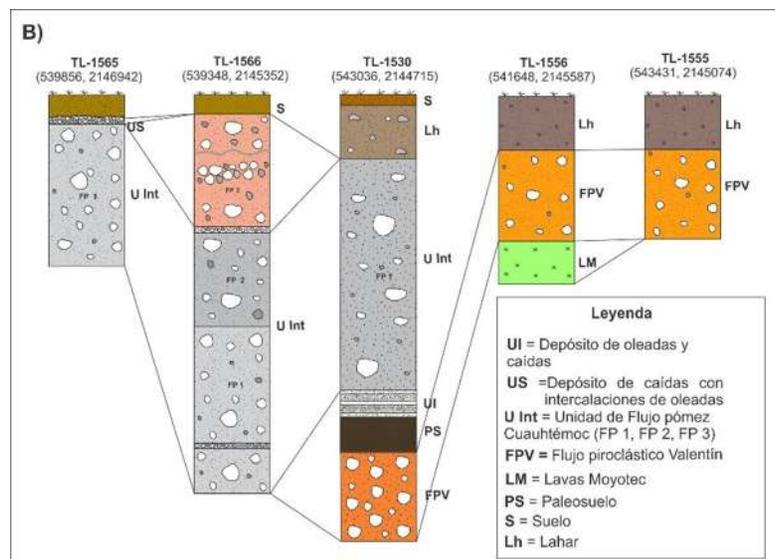
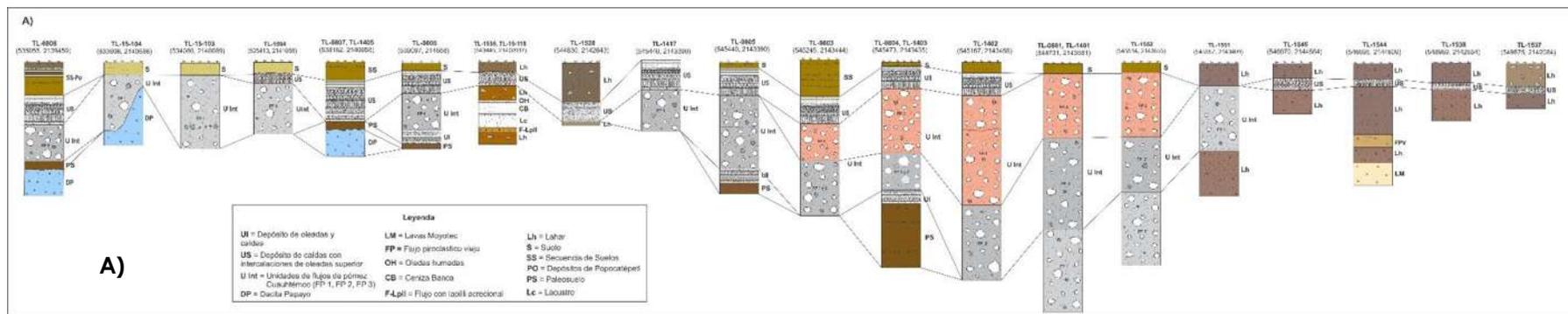


Figura 24. Correlación de las columnas estratigráficas de la Secuencia Cuauhtémoc al Sureste (A), Este (B) y Sur-Sureste (C) del volcán Tlaloc. En la correlación C están expuestos depósitos de volcanoclásticos de los volcanes Papayo y Teyotl.

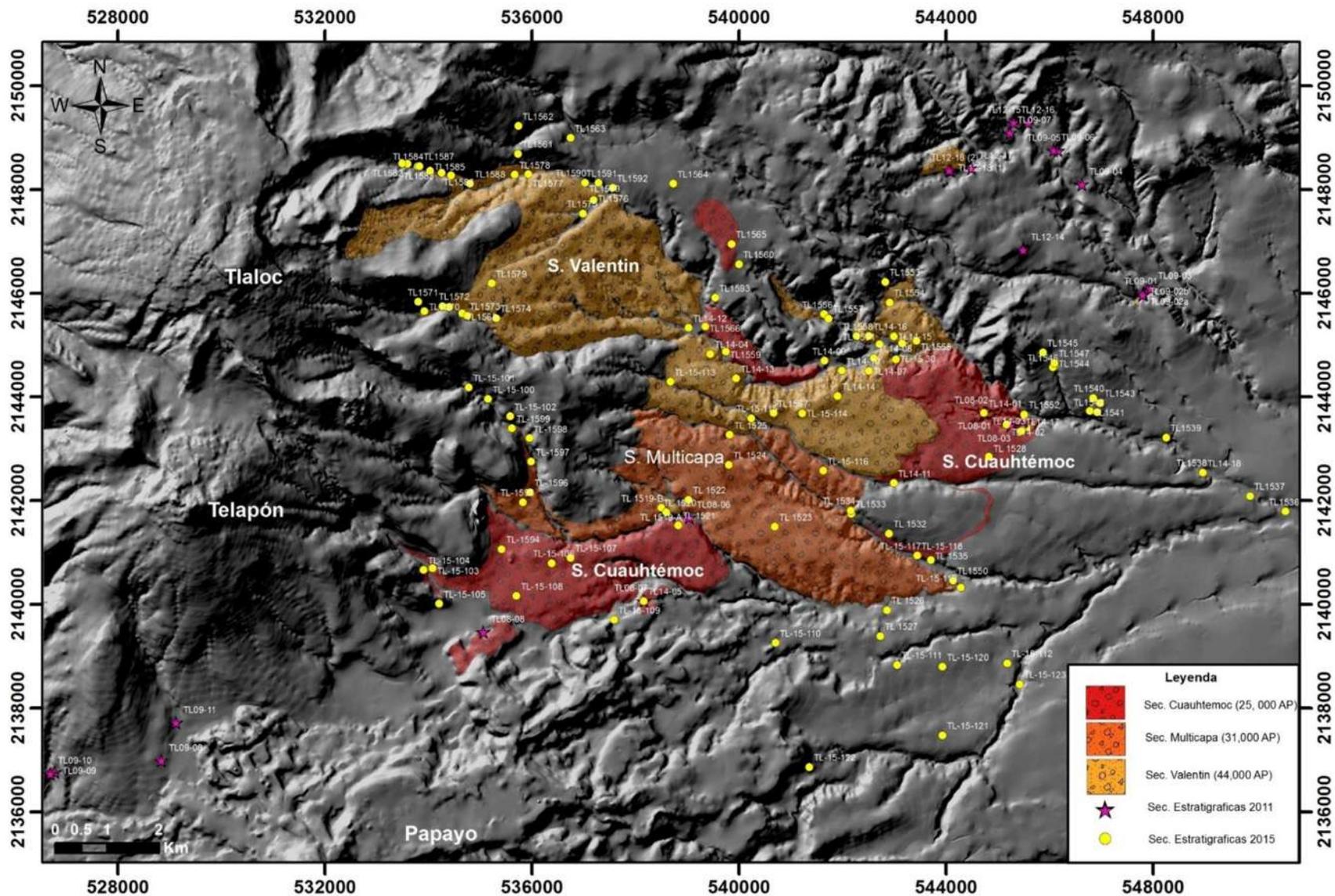


Figura 25. Mapa Geológico de distribución de las Secuencias Valentín y Cuauhtémoc; la Secuencia Valentín tiene una distribución hacia el sureste del volcán Tlaloc, hacia los poblados de San Juan Cuauhtémoc, Santa Cruz Otlatla y la Preciosita. En cambio la Secuencia Cuauhtémoc su distribución es hacia el sureste y sur-sureste del volcán, hacia los poblados de San Juan Cuauhtémoc, Santa Cruz Otlatla, Ignacio Manuel Altamirano y Río Frio.

4. Granulometría y análisis de componentes

4.1 Secuencia Valentín

El análisis granulométrico de la Secuencia Valentín se realizó en cada una de sus unidades: Unidad Inferior (UI), Depósito de caídas con intercalaciones de oleadas piroclásticas; Unidad Intermedia (UInt), Unidad de flujos piroclásticos de pómez separadas por un depósito de caída de pómez; Unidad Superior (US), Depósito de caídas con intercalación de oleadas piroclásticas (fig. 26).

Unidad Inferior (UI), los depósitos de caída tienen tamaños de ceniza fina $>4 \Phi$ hasta lapilli grueso (-5Φ) con una selección pobre ($\sigma\Phi = 2.67-1.29$). Las ocho muestras presentan histogramas granulométricos unimodales con enriquecimiento en fracciones finas, con modas en 0, 1 y 2Φ (fig. 25). Este tipo de distribución unimodal es típica de los depósitos de caída (fig. 24). En tanto las oleadas piroclásticas (TL-1407, DC-inf-I y TL-1407 DC-inf-IVb) tienen partículas entre $>4 \Phi$ y -2Φ con una distribución en los histogramas polimodal y picos en las fracciones 1, 2 y 4Φ . Este tipo de distribución es típica de oleadas piroclásticas (de acuerdo a Walker, 1971, fig. 27).

El análisis granulométrico de la Unidad Intermedia (UInt), en las muestras de las unidades de flujo piroclástico FP1 (TL-1407 F1), FP3 (TL-1407 F3), FP1 (TL-1568 F1), y FP2 (TL-1568 F2), indica que contiene partículas entre las fracciones -5 y $>4\Phi$ con selección pobre ($\sigma\Phi = 3.35-1.26$) y distribución polimodal en los histogramas, con enriquecimiento en las fracciones finas (modas en 0, 1 y 2Φ). En cambio las muestras del flujo FP2 (TL-1407 F2), y el FP4 (TL-1407 F4), presentan una distribución polimodal con un empobrecimiento de fracciones finas y un enriquecimiento en las fracciones gruesas con modas en -5 y -4Φ (fig. 25). Este tipo de distribución es típica de depósitos de flujo piroclástico (de acuerdo a Walker, 1971) (fig. 27).

Por su parte para las muestras de caída con intercaladas con los flujos piroclásticos: TL-1568 2(B) y TL-1568 2(C) los depósitos poseen un tamaño de partícula entre lapilli grueso (-5Φ) a ceniza fina ($>4\Phi$) y presentan una selección pobre ($\sigma\Phi = 1.99-1.34$),

con una distribución en los histogramas unimodal, con modas en 0 y 1 Φ . En cambio la muestra TL-1568 2(A) tiene una distribución polimodal, con un empobrecimiento en las fracciones finas y un enriquecimiento en las fracciones gruesas, con modas en -5 y -4 Φ . Este tipo de depósito es típica de caída (de acuerdo a Walker, 1971).

En cambio para la Unidad Superior (US), los histogramas granulométricos de las muestras (TL-1413-1, TL-1413-4b, TL-1413-1 III, TL-1413- 5 inf) tienen una distribución unimodal con modas en 0,1 y 2 Φ y una selección de moderada a pobre ($\sigma\Phi = 1.52-0.88$) (fig. 25). No obstante, la muestra TL-1413-2 tiene una distribución polimodal, con anomalías en -4, 0 y 1 Φ . Este tipo de distribución es típica de caída (de acuerdo a Walker, 1971).

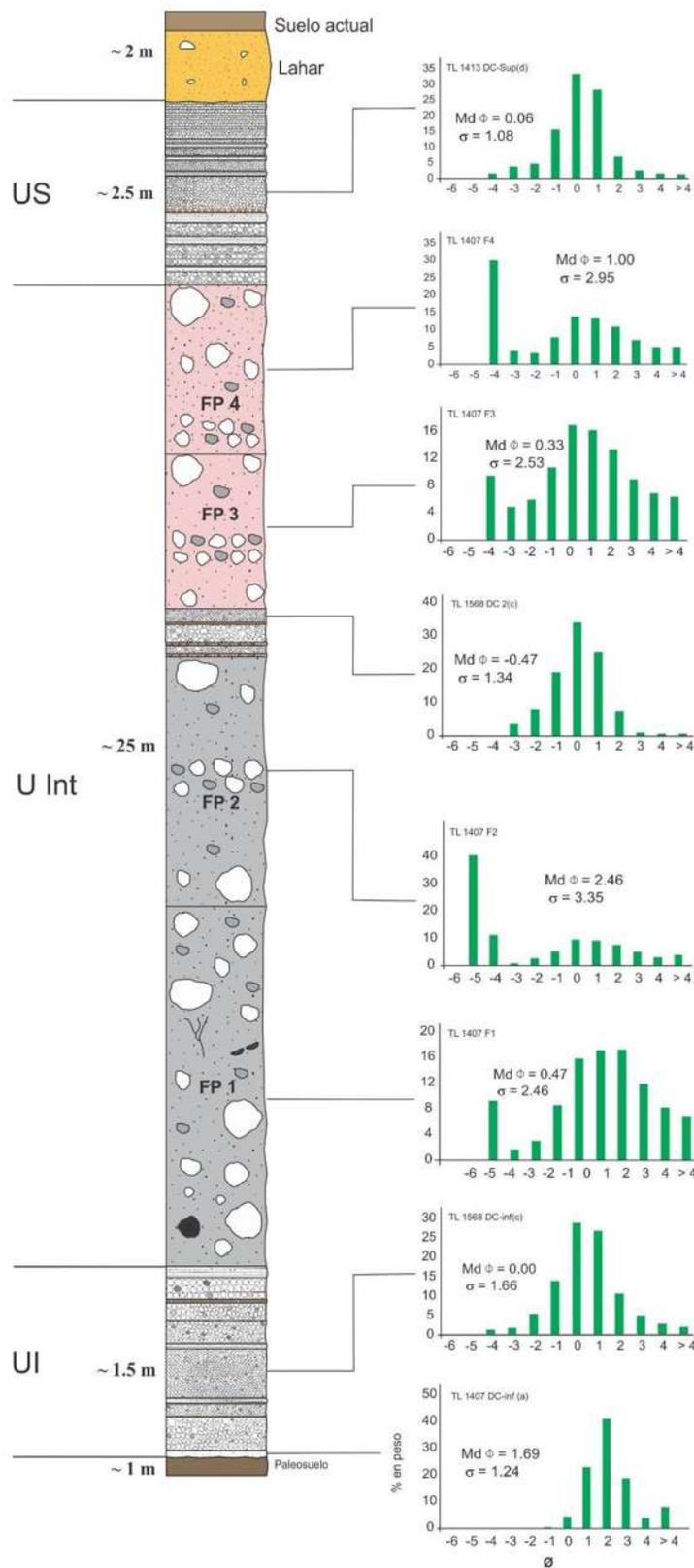


Figura 26: Histogramas de distribución de tamaños de algunas las muestras de las secciones TL1407, TL1413, TL1568, pertenecientes a los depósitos piroclásticos de caídas, flujos piroclásticos y oleadas.

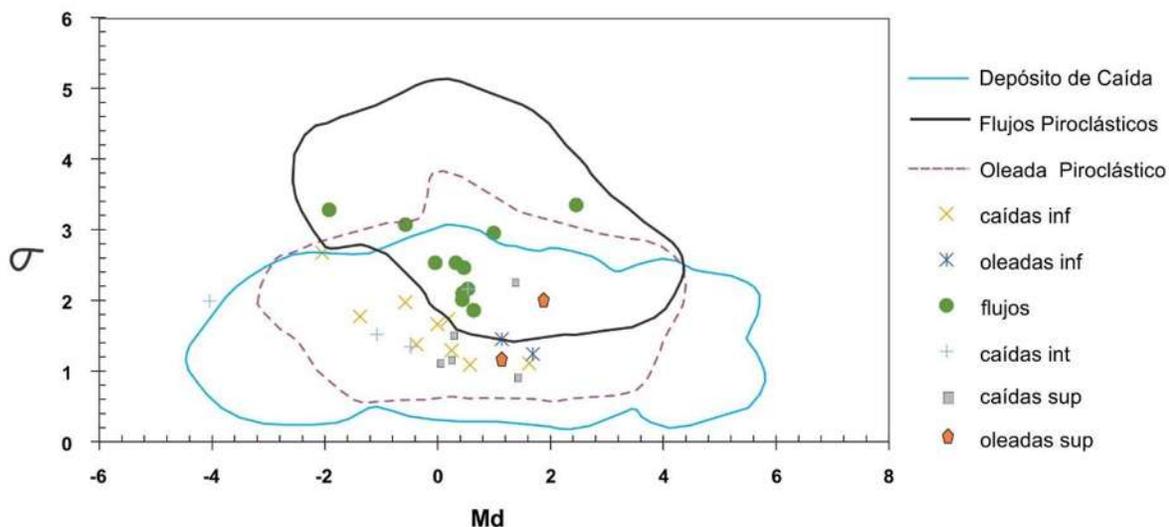


Figura 27. Diagrama de clasificación de Walker (1971) de las muestras analizadas de la Secuencia Valentín.

Componentes: El análisis de componentes de las muestras se realizó por medio del conteo de más de 1000 partículas en las fracciones 0 y 1Φ de los flujos piroclásticos, depósitos de caída y oleadas piroclásticas en las secciones (TL14-07, TL-1568 y TL 14-13). Los constituyentes de estas muestras son: pómez blanca con forma angulosa a subredondeada y vesiculada, poco densa, en algunas muestras de la sección TL1413, esta pómez presenta una alteración de color amarillo y aparecen pómez de color gris angulosa, densa y poco vesiculada; cristales con abundante cuarzo y en menor proporción biotita, feldespatos y piroxenos; por último, líticos accesorios de color gris claro a gris obscuro, algunos se encuentran alterados (rojo) y los accidentales de color naranja y amarillo. En la muestra de la sección TL1413, hay una mayor cantidad de líticos alterados. A continuación se describe el conteo de componentes realizado verticalmente en la columna compuesta. En general el porcentaje de los productos juveniles (pómez + cristales) es de 82 % a 96 % en vol. y de líticos es de 3 % a 51 % en vol. (fig. 28). En la columna ocurren cambios significativos en la UInt y US en el contenido de líticos debido a su aumento, esto sugiere que hubo un mayor aporte de material a la columna, así como la erosión al diámetro del conducto, originando el colapso de la columna.

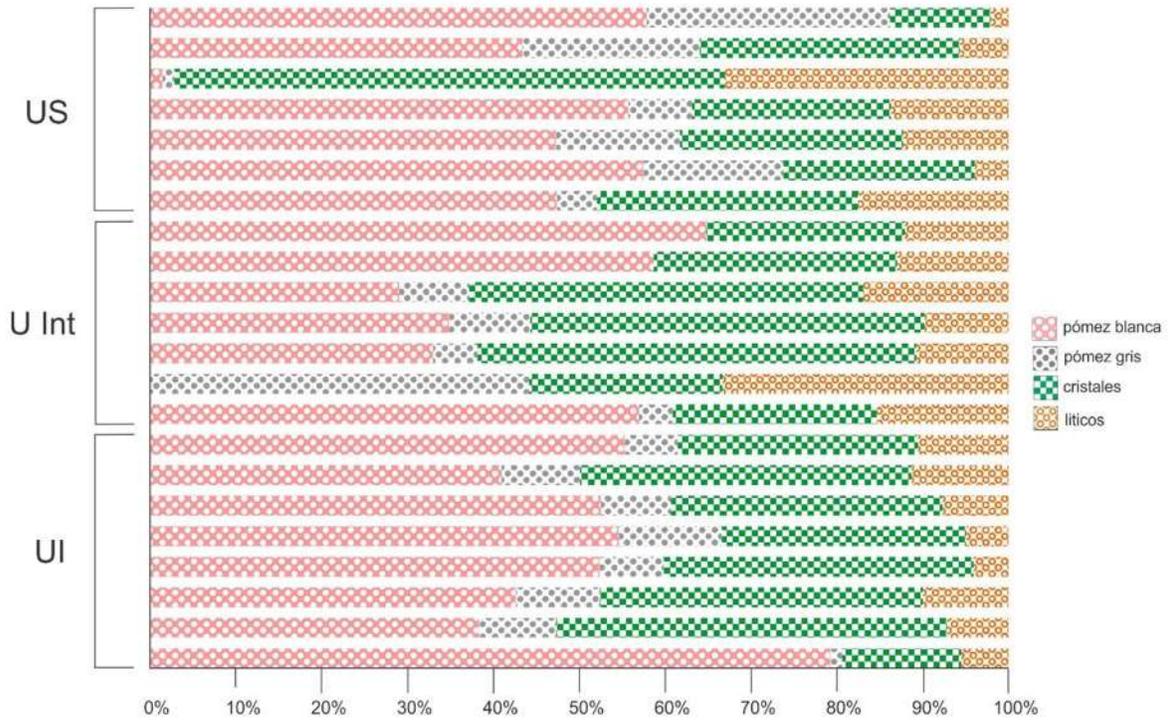


Figura 28: Histograma de componentes de la Secuencia Valentín donde se aprecia el % de componentes de las tres unidades (UI, UInt y US), se observa un cambio evidente en la UInt y US debido a un mayor contenido de líticos en algunas capas de estas unidades.

4.2 Secuencia Cuauhtémoc

Para esta secuencia, el análisis también se realizó de acuerdo a las unidades divididas como son: Unidad Inferior (UI), depósito de oleadas y caídas; Unidades Intermedia (UInt) de flujos piroclásticos de pómez; Unidad Superior (US) Depósito de caídas y oleadas piroclásticas, (fig. 29).

Para la Unidad Inferior (UI), de acuerdo con los histogramas de frecuencia, los depósitos de caídas poseen un tamaño de partícula entre ($>4\Phi$) y lapilli grueso (-2Φ). Las muestras TL1403 DC-inf (b) y TL1403 DC-inf (d) presentan una selección pobre ($\sigma\Phi = 1.09$ - $\sigma\Phi=1.17$). Ambas muestras presentan curvas granulométricas unimodales con modas en 0 y 1Φ (fig. 29). Este tipo de distribución unimodal es típico de un depósito de caída (de acuerdo a Walker, 1971) (fig. 28)

Sin embargo, en las oleadas piroclásticas, muestras TL-1403 DC-inf (a), TL-1403 DC-inf (c), TL-1403 DC-inf (e) y TL1530 (1), tiene un tamaño de partícula de ceniza fina ($>4\Phi$) hasta lapilli grueso (-2Φ), presentan una distribución polimodal con modas en 1, 2 y 3Φ . Este tipo de distribución es tipo de oleadas piroclásticas (fig. 29, de acuerdo a Walker, 1971).

En la Unidad Intermedia (UInt), las unidades de flujo piroclástico, posee un tamaño de partícula de lapilli grueso (-5Φ) a ceniza fina ($>4\Phi$) con una pobre selección ($\sigma\Phi= 2.00$ - 2.59) y una distribución polimodal con modas en 0 y 1Φ . A diferencia de los flujos piroclásticos FP2 y FP3 (muestras TL-1566 F2 y TL-1566 F3) presentan un empobrecimiento de fracciones finas y un enriquecimiento de las fracciones gruesas, con una selección pobre ($\sigma\Phi= 3.21$ a $\sigma\Phi=3.25$), con modas en -5 y -4Φ (fig. 29). Este tipo de distribución es típica de flujos piroclásticos, (fig. 29, de acuerdo a Walker, 1971).

En cambio para la Unidad Superior (US), los histogramas de frecuencia muestran un tamaño de partícula de lapilli fino (-4Φ) a ceniza fina ($>4\Phi$), con una distribución granulométrica unimodal con un enriquecimiento en las fracciones finas y un empobrecimiento de las fracciones gruesas con modas en 1Φ y una selección de moderada a buena ($\sigma\Phi = 0.73$ - $\sigma\Phi= 1.47$). Sin embargo, la muestra TL-1402 DC-sup(a), también presentan una distribución unimodal, pero con un

empobrecimiento de las fracciones finas y un enriquecimiento en las fracciones gruesas, con moda en -3Φ , presenta una buena selección $\sigma\Phi = 0.82$, el tamaño de las partículas es de lapilli grueso (-4Φ) a ceniza gruesa (1Φ) (fig. 29). Este tipo de distribución es típica de depósitos de caída (fig. 29, de acuerdo a Walker, 1971).

Para las oleadas piroclásticas de las muestra TL1401 DC-sup(a), TL1405 DC-sup (a) y TL1546 DC-sup(c) presentan una distribución polimodal con modas en -1 , -3 , 0 , 1 y 4Φ , una mala selección ($\sigma\Phi = 2.12-2.42$). Este tipo de distribución es típica de depósitos de oleadas piroclásticas (fig. 29, de acuerdo a Walker, 1971).

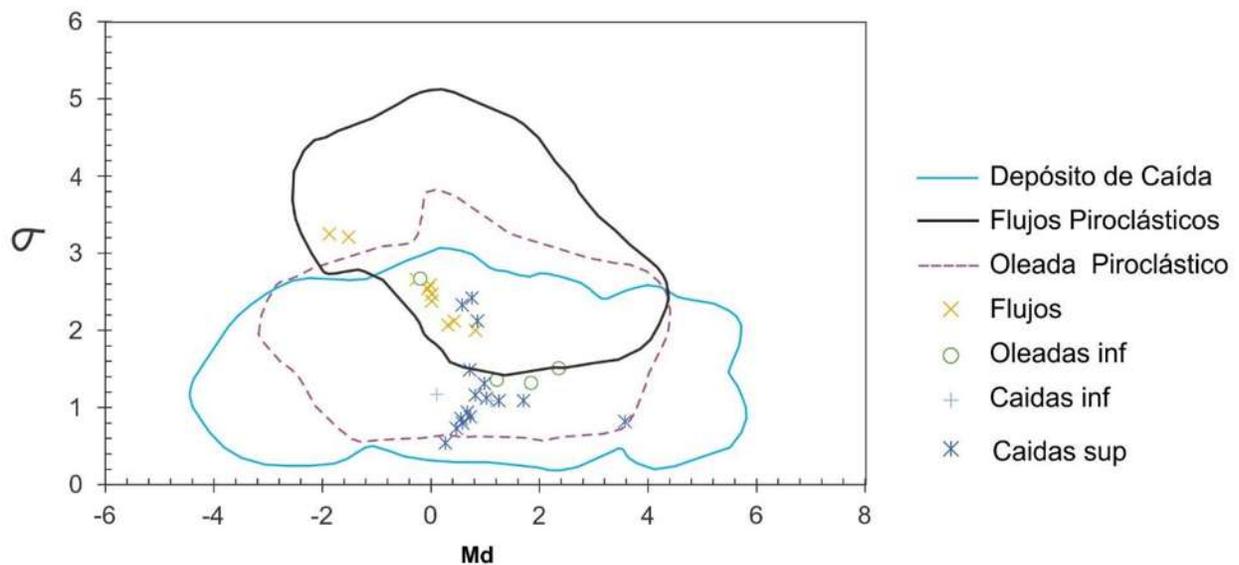


Figura 29: Diagrama de Walker (1971), en el cual se grafican los parámetros Md , Φ y $\sigma\Phi$ de las muestras pertenecientes a la Secuencia Cuauhtémoc.

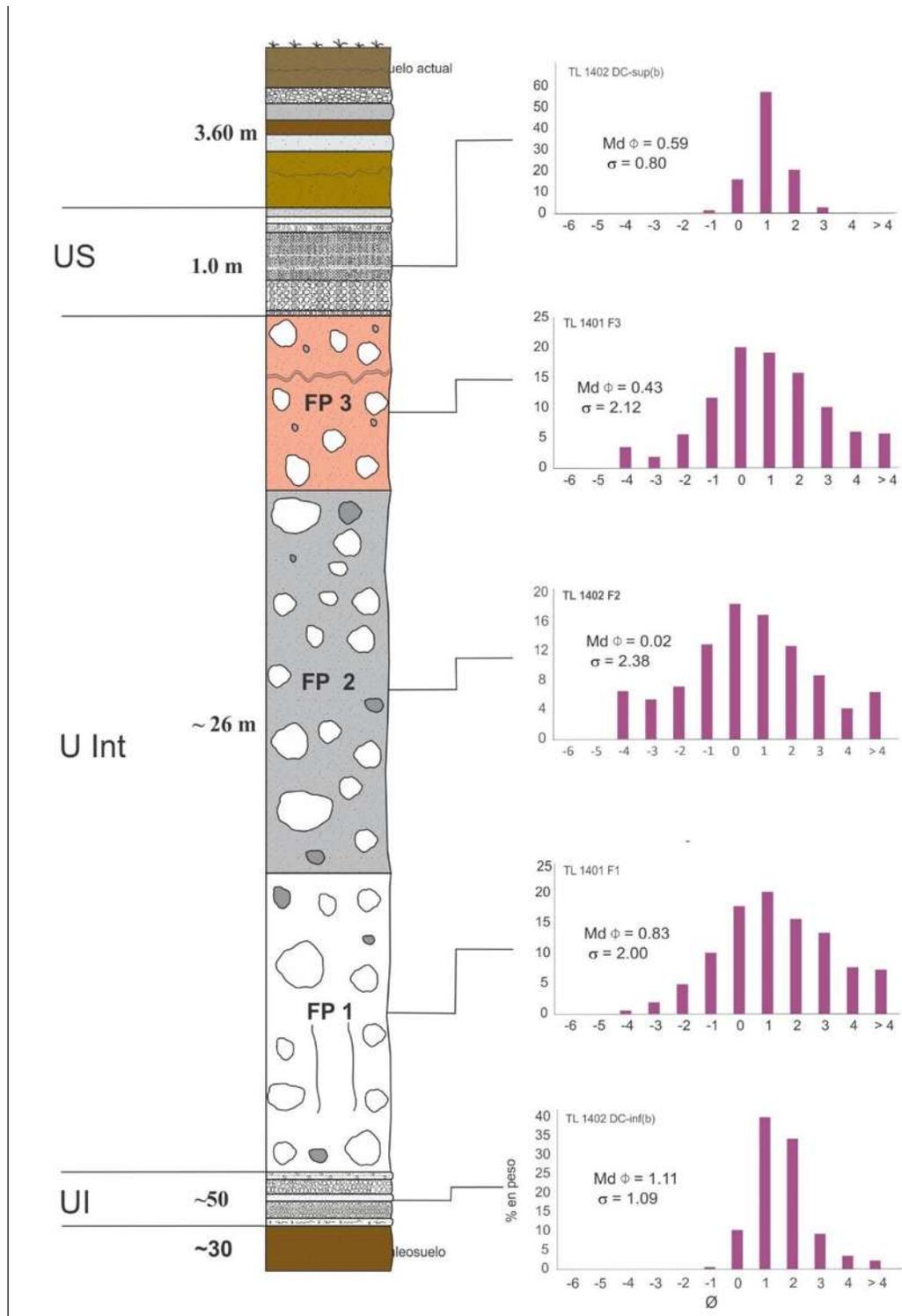


Figura 30: Histogramas de distribución de frecuencia en las secciones TL 1401 y TL 1402.

Componentes: El análisis de componentes de la Secuencia Cuauhtémoc, se realizó en los flujos piroclásticos, depósitos de caída y oleadas piroclásticas de las secciones TL 1401, TL 1402 y TL 1403, en las fracciones 0 y 1 Φ . Los componentes de esta secuencia están representados por pómez blanca con forma subredondeada a redondeada vesiculada, poco densa; pómez beige es de forma redondeada a subangulosa, poco densa, mas vesiculada, en algunas muestras de la sección TL 1403, presentan alteración de color amarillo; Así como pómez gris en menor porcentaje de forma subredondeada a angulosa, densa y poco vesiculada; los cristales presentes son abundante cuarzo y en menor abundancia feldespatos, biotita, piroxenos y anfíboles; por último, los líticos accesorios son de color gris claro, gris oscuro y negros, algunos presentan alteración (rojo), así como líticos vítreos, en cambio los líticos accidentales son de color naranja, rosas y café. A continuación se describe el conteo de componentes de acuerdo a la columna compuesta de las secciones TL 1401, TL 1402, TL 1403.

En general el porcentaje de los productos juveniles (pómez + cristales) es de 69 % a 98 % y de líticos 2 % a 30 % (fig.31). En la UI el porcentaje de pómez llega de un 66% hasta un 81% y disminuye continuamente en la UInt hasta alcanzar de un 40 % a 46 %. En cambio en la US la pómez alcanza valores de 33% a 56%.

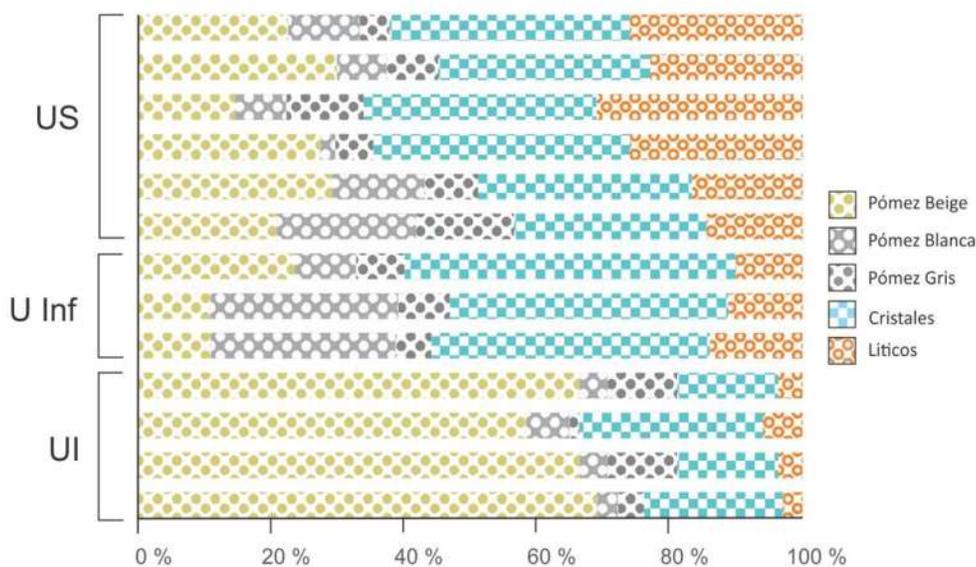


Figura 31: Histograma de componentes de la Secuencia Cuauhtémoc, se aprecia el % de componentes de las tres unidades (UI, UInt y US), donde se observa que la UI tiene un mayor contenido de pomez con respecto a la UInt y US.

5. Petrografía y Geoquímica

En este capítulo se presenta el análisis petrográfico y química de las rocas estudiadas, éste último incluye elementos mayores, traza y tierras raras. Para realizar la descripción mineralógica y textural de la pómez de la Secuencia Valentín y Cuauhtémoc, se hizo un estudio petrográfico con su análisis modal a través de una estimación óptica, determinando el porcentaje de fenocristales (>0.3 mm), microfenocristales (0.3 y 0.03 mm) de acuerdo con Wilcox (1954), así como el análisis de la matriz vítrea y cristales, de cada sección delgada. En total se describieron 35 secciones delgadas de los componentes juveniles (pómez) encontrados en las secciones TL1401-TL1403 (Secuencia Cuauhtémoc) y TL1407, TL 14013 y TL 1568 (Secuencia Valentín). A continuación se hace una descripción general de cada Secuencia.

5.1 Petrografía

5.1.1 Secuencia Valentín

En esta secuencia se analizaron 24 secciones delgadas, pertenecientes a la pómez, de los depósitos de caída, flujos piroclásticos y oleadas (TL1407, TL 1413 y TL 1568). Se describieron dos tipos de pómez: blanca y gris.

La pómez blanca tiene una textura hipocristalina, inequigranilar, vesiculada y fluidal con una asociación mineralógica compuesta de fenocristales y microfenocristales de plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo, biotita, y menos abundante anfíbol, apatito, magnetita e ilmenita. Petrográficamente las rocas de pómez se clasifican como riolitas. La asociación mineralógica se encuentra con distintos porcentajes en las muestras de las diferentes unidades; que se describen a continuación. La plagioclasa (plg) se observa como microfenocristales, fenocristales y pocos microlitos (<3 % vol.), de forma euhedral-subhedral, con bordes reabsorbidos e inclusiones de biotita, óxidos y apatito, con maclado polisintético a carlsbad, algunas presentan zoneamiento y textura de tamiz. La biotita (bt) se encuentra

como microfenocristales y fenocristales (<2 % vol.), con algunos bordes corroídos e inclusiones de óxidos. El cuarzo (qz) se encuentra como xenocristal de forma subhedral a anhedral con bordes corroídos y algunos fracturados (<1 % vol.). Los feldespatos potásicos (feld-k) se observan como microlitos y pocos microfenocristales y fenocristales, de forma subhedral, fracturados (<0.8 % vol.). Los óxidos se encuentran como microlitos pocos microfenocristales de forma subhedral a anhedral con bordes corroídos (0.2% vol.) La matriz (93 %vol.) es de vidrio riolítico con abundantes vesículas y pocos microlitos. También se puede observar vesículas de forma redondeada, subredondeada a elongadas en dirección al flujo, con diámetros variables (<100 μ). Ocasionalmente se presentan glomeroporfidos de plagioclasa y feldespato, (fig. 32).

La muestra de la sección TL1407 DC-inf, se caracterizar por presentar una textura áfirica (<0.5-1 % vol. de cristales), esta muestra presenta las mismas características descritas anteriormente (fig. 31f). En cambio las muestras TL 1413 DC-sup, presentan una matriz de vidrio (< 96% vol.) rica en microlitos de plagioclasa, feldespato potásico y biotita, pocos fenocristales y microfenocristales (<4 % vol.) (fig. 32g).

La pómez gris es hipocristalina, vesiculada y fluidal, presenta una mayor abundancia modal de fenocristales de (~9 % en vol. de la muestra TL 1407 F1b y TL 1407 F2a) de plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo, biotita, y menos abundante anfíbol, apatito, magnetita e ilmenita. Petrográficamente las muestras de pómez se clasifican como riolitas. En algunas muestras los fenocristales aparecen fracturados con bordes corroídos y las plagioclasas con textura de tamiz. Las vesículas son más angulosas a subesféricas con diámetros variables (<100 μ) (fig. 33).

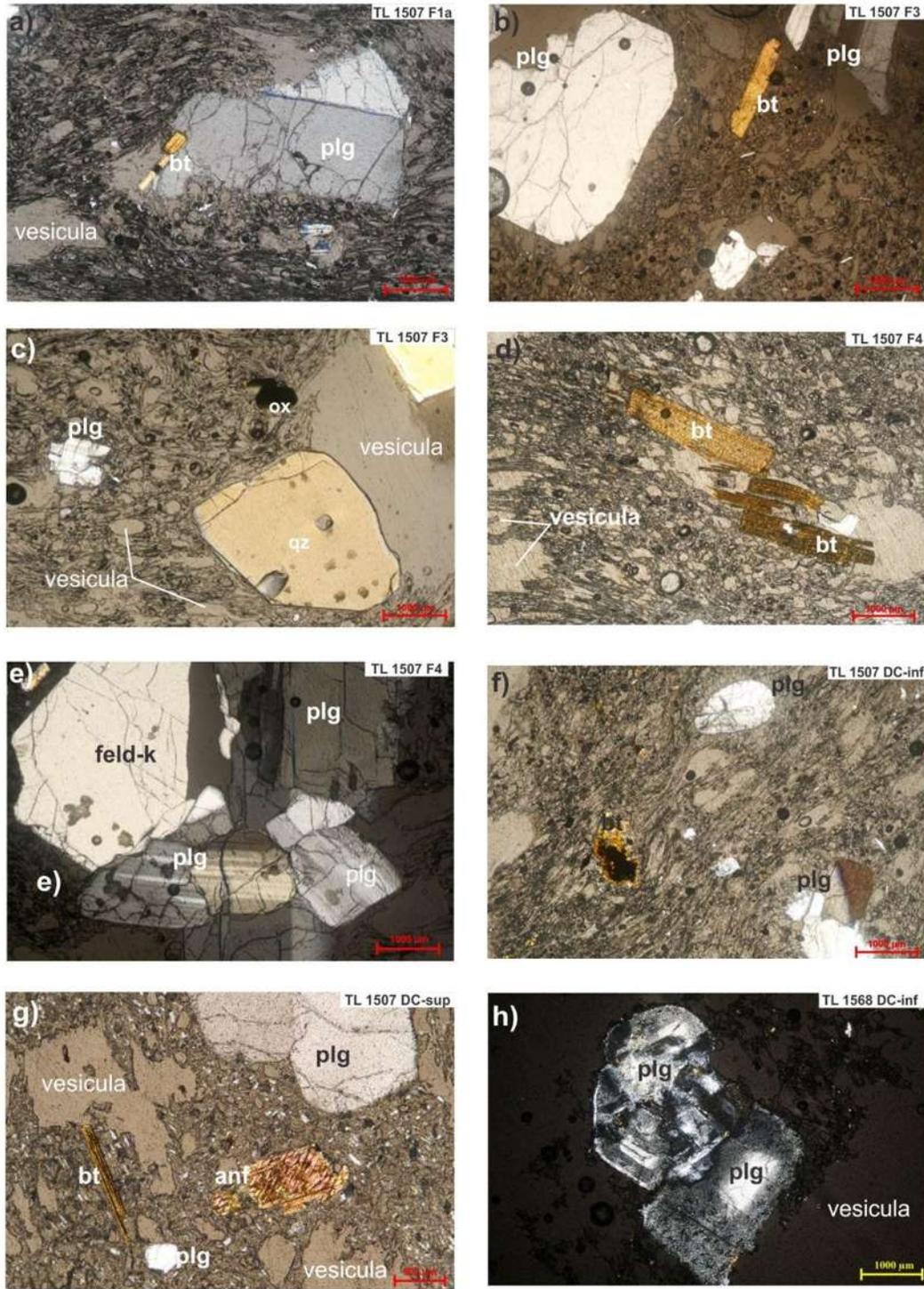


Figura 32. Microfotografías de la Secuencia Valentín de las secciones TL 1407, TL 1413 y TL 1568, de la pómez blanca. a) plagioclasa (plg) subhedral, fracturada con bordes corroídos con inclusiones de biotita (bt) y óxidos (ox). En cambio en (b), (d) y (f) se observa la biotita (bt) en forma subhedral fibrosa alineada en dirección al flujo. En (c), se observa un fenocristal de cuarzo (qz) con inclusiones de vidrio. En (e) se muestra un glomeporfido de plg y feld-k. En (g) se observan un fenocristal de anfíbol (anf) con bordes corroídos al igual que las plg se puede observar que las vesículas son más grandes y angulosas, matriz de vidrio con microlitos de plg, bt y feld-k. Y en (h) se observan dos cristales de plg con bordes corroídos y textura de tamiz. Todas se tomaron con luz polarizada



Figura 33. Microfotografías de la Secuencia Valentín, de las secciones TL 1407 de la pómez gris. En (a) y (e) se observa biotita (bt) de forma subhedral fibrosa alineada en dirección al flujo. En (b), (c) y (d), hay fenocristales de plagioclasa (plg) de forma subhedral, con bordes corroídos, fracturadas; también se observa cuarzo (qz) con inclusiones de forma anhedral, fracturado. Por último, en (f) se ve un fenocristal de anfíbol con bodes corroídos. Todas las fotografías se tomaron con luz polarizada, excepto la microfotografía (f), esta se tomó con luz natural.

5.1.2 Secuencia Cuauhtémoc

En la Secuencia Cuauhtémoc se analizaron 15 secciones delgadas pertenecientes a los depósitos piroclásticos (flujos de pomez y depósitos de caída) de las secciones (TL1401, TL1402 y TL1403). En éstas se describieron tres tipos de pómez: beige (rosa), blanca y gris

La pómez beige a rosa tiene una textura hipocristalina, vesiculada y fluidal, con fenocristales, microfenocristales y microlitos de plagioclasa, feldespatos potásicos, cuarzo, biotita, anfíbol, y menos abundante piroxenos, apatito, magnetita e ilmenita. Petrográficamente las muestras de pomez se clasifican como Riolitas. La plagioclasa (plg) se encuentra como fenocristal principalmente de forma subhedral, con bordes corroídos, algunas zonadas, con inclusiones de biotita y textura de tamiz, (<3 % vol). La biotita (bt) es subhedral, fibrosa, algunas se encuentran alineadas al flujo, también están presentes en los glomeroporfidos de plg y bt, (<3 % vol.). El cuarzo (qz) aparece como fenocristales y microfenocristales (<3 % vol). Los feldespatos potásicos (feld-k) se presentan como fenocristales, fracturados (<2 % vol). El anfíbol (anf) es subhedral con bordes corroídos e inclusiones de óxidos (<1 % vol). Los piroxenos (opx y cpx) los encontramos como microfenocristales con bordes corroídos de forma subhedral (<0.2 % vol). Por último, los óxidos son anhedral con bordes corroídos y los encontramos como microfenocristales y microlitos (< 0.1 % vol.) La matriz (90 % vol.) es de vidrio riolítico con abundantes vesículas y pocos microlitos. Estas vesículas tienen formas subredondeadas a subangulosas con diámetros variables (<100 μ) (fig. 31a-e). Ocasionalmente se presentan glomeroporfidos de plg y bt. Las muestras de la sección TL 1403, se caracterizan por tener un menor contenido de cristales (<2 % vol.) observado en la microfotografía (f) (fig. 34).

La pómez blanca y gris, presentan características texturales similares a la pómez beige (rosa), sin embargo, la pómez blanca presenta una menor abundancia de cristales (~4 % vol.), como es el caso de las muestras TL1402 (fig. 34l) con una asociación mineralógica de plg, bt y qz. La pómez gris tiene un contenido de cristales de ~5 a 9% vol., su mineralogía es muy similar a la pómez beige (rosa), sin embargo, los piroxenos no están presentes y los anfíboles ocurren como

fenocristales con bordes corroídos. La pómez blanca y pómez gris petrográficamente se clasificaron como riolitas. Las muestras TL1401F1c y TL1401F2b presentan microfrecristales fracturados, con bordes corroídos (fig. 34j y k). Las vesículas son subredondeadas a subangulosas con diámetros variables (<100 μ).



Figura 34. Microfotografías de la Sección Cuauhtémoc, (a-f) pómez beige (rosa), las plg, son de forma subhedral con bordes corroídos, algunas presentan textura de tamiz. También se observan piroxenos (cpx y opx) de forma subhedral. La bt y anf se encuentra como fenocristales y microfencristales con bordes corroídos. Los cuarzos se encuentran como fenocristales, fracturados con golfos de corrosión. En cambio la pómez gris (g-i), presenta cristales fracturados con bordes corroídos, a diferencia de las microfotografías j y k, se muestra un mayor fracturamiento de los cristales. La pómez blanca tiene pocos cristales (l).

5.2 Geoquímica

Se realizó el análisis químico a catorce muestras de roca (pómez) de las diferentes unidades de la Secuencia Valentín, para los depósitos de caídas se analizaron tres muestras (TL-14 07- DC inf. IVa, TL-1413-1C, TL-1413-C2) y para los flujos de pomez cinco muestras (TL-1407-F1-G, TL-1407-F1-B, TL-1407-F2, TL-1407 F3, TL-1407-F4). En cambio para la Secuencia Cuauhtémoc se analizaron dos muestras de depósitos de caída (TL DC14 y TL-DC2) y cinco muestras de los flujos de pómez (TL-FP1, TL-FP2, TLFP3, TL-1401-F1-B, TL-1401-F3). Los análisis químicos se realizaron en base anhidra y se graficaron en diversos diagramas que se presentan a continuación:

5.2.1 Elementos mayores

En el diagrama de sílice contra álcalis totales (TAS, por sus siglas en inglés, *Total Alkalies vs. Silica*, de Le Bas et al., 1986) y SiO_2 vs K_2O las rocas se clasificaron principalmente como riolitas. A diferencia de una muestra de la Secuencia Cuauhtémoc, que se clasificó como dacita en ambos diagramas (figs. 35 y 36 A).

En el diagrama de variación de SiO_2 vs K_2O (Peccherillo y Taylor et al., 1976, las muestras aparecen en el campo de las rocas calco-alcálicas normales en potasio (fig. 33A), en cambio en el diagrama AFM (AFM (Le Bas et al., 1986), que discrimina rocas toleíticas de calco-alcálicas, las rocas también caen en el campo calco-alcálico (fig. 36 B). En el diagrama de $\text{Al}/(\text{Na}+\text{K})$ vs $\text{Al}/(\text{Ca}+\text{Na}+\text{K})$ todas las riolitas son moderadamente peraluminosas (fig. 36 C), mientras las andesitas basálticas y dacitas de la Sierra Nevada (SN) caen en el campo metaluminosas y peraluminosas (Rueda et al., 2013). Las variaciones en el contenido de sílice para la Secuencia Valentín cambia de 71.9 % en peso en la Unidad Inferior a 78.3-74.78 % en peso en la Unidad Intermedia y 70.3 a 73.7 % en la Unidad Superior (fig. 34). En cambio la Secuencia Cuauhtémoc la concentración de sílice varía de 72.34 % en peso en la Unidad Inferior, 67.7-74.6 % en peso en la Unidad Intermedia y 71.68 % en peso en la Unidad Superior.

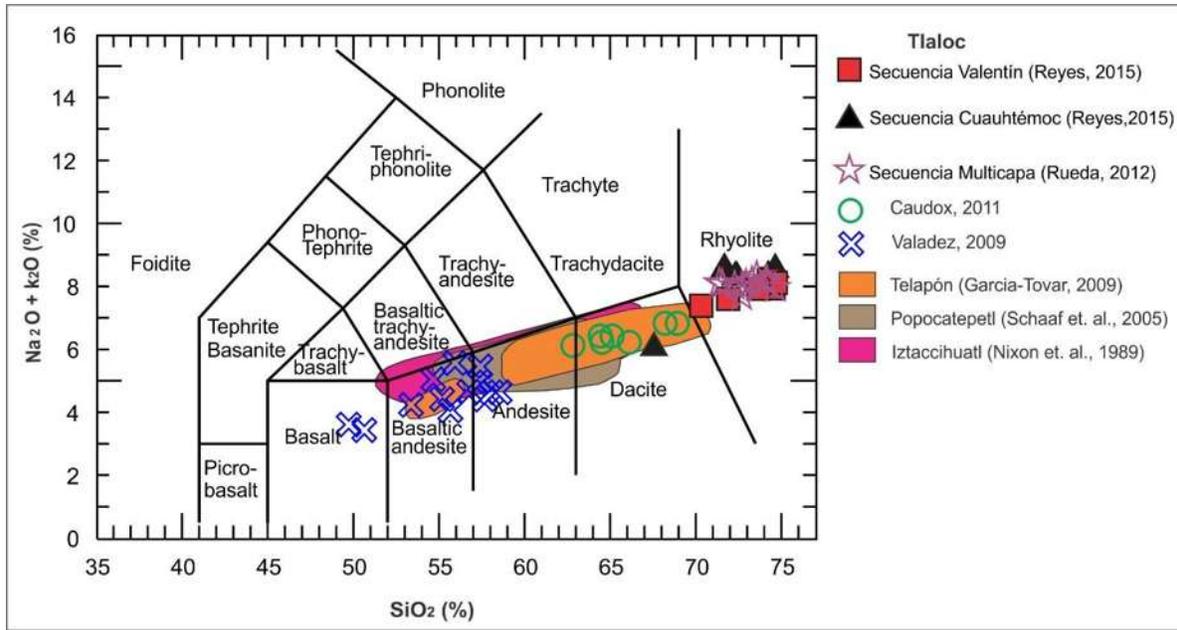


Figura 35. Diagrama de Álcalis Total ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) vs Sílice (SiO_2) de Le Bas et al. (1986) para la composición química de la roca total de pómez de la Secuencia Valentín y Secuencia Cuahtémoc.

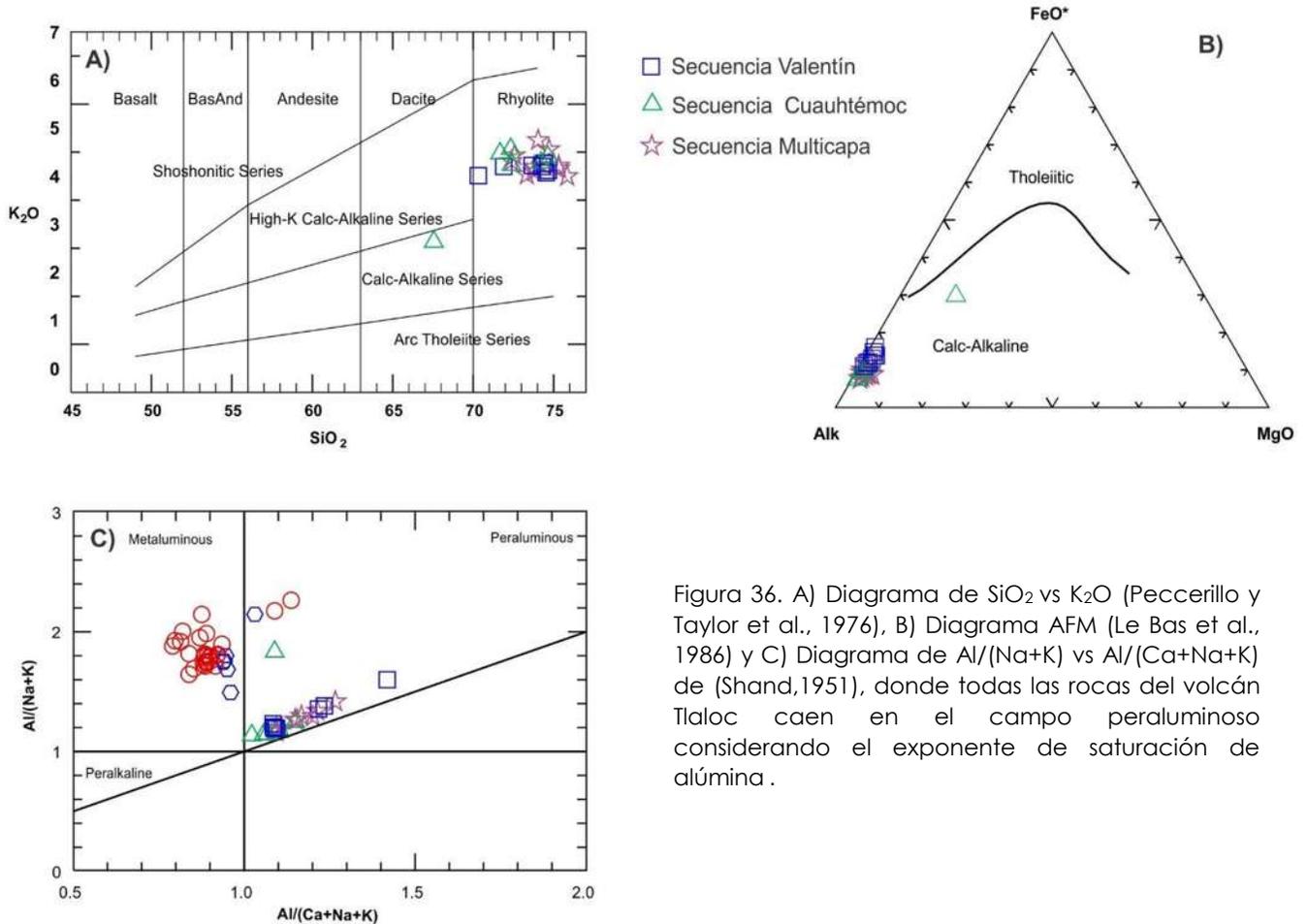


Figura 36. A) Diagrama de SiO_2 vs K_2O (Peccerillo y Taylor et al., 1976), B) Diagrama AFM (Le Bas et al., 1986) y C) Diagrama de $\text{Al}/(\text{Na}+\text{K})$ vs $\text{Al}/(\text{Ca}+\text{Na}+\text{K})$ de (Shand, 1951), donde todas las rocas del volcán Tlaloc caen en el campo peraluminoso considerando el exponente de saturación de alúmina.

En los diagramas tipo Harker se puede apreciar varias tendencias del comportamiento de los elementos con respecto al sílice. En estos diagramas para ambas secuencias, hay una tendencia negativa para los elementos como el MgO, CaO y Fe₂O₃ y una tendencia positiva para K₂O, Na₂ y Al₂O, con respecto al aumento del sílice. En cambio para los elementos (TiO₂, MnO y P₂O₅) no muestran una tendencia definida, con un empobrecimiento de estos mismos elementos (fig. 37).

5.2.2 Elementos traza y Tierras raras

Los elementos traza son indicadores petrogenéticos, y de procesos magmáticos, debido a su incompatibilidad o compatibilidad con las fases sólidas de un magma. En los diagramas tipo Harker los elementos traza (Sr, Zr, Ba Pb y Y) presentan una tendencia negativa con respecto al aumento del sílice, mientras que el Rb tiene una tendencia opuesta (fig. 38) y para el Pb muestra una tendencia dispersa con respecto al aumento del sílice (fig. 38).

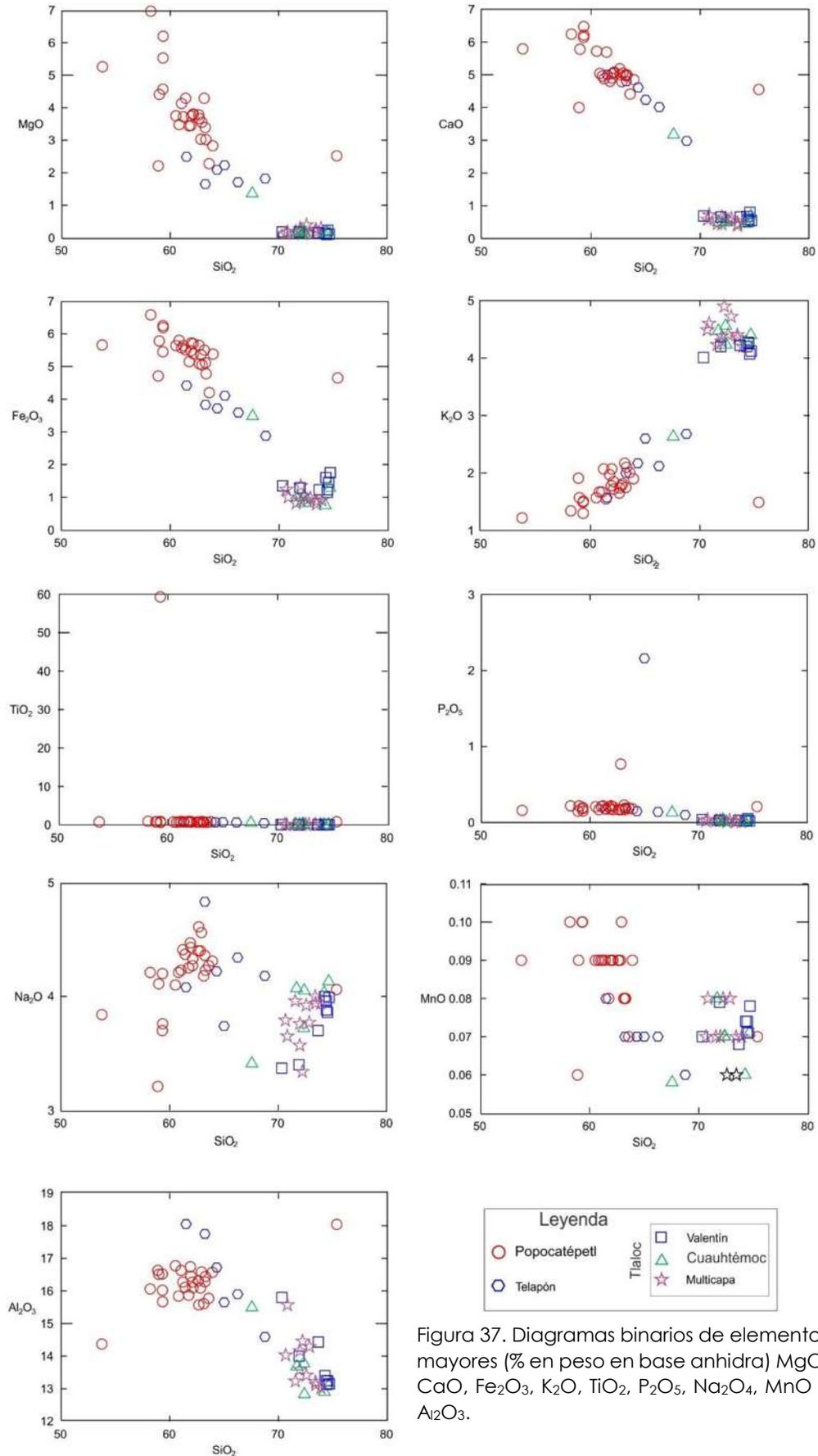


Figura 37. Diagramas binarios de elementos mayores (% en peso en base anhidra) MgO, CaO, Fe₂O₃, K₂O, TiO₂, P₂O₅, Na₂O, MnO y Al₂O₃.

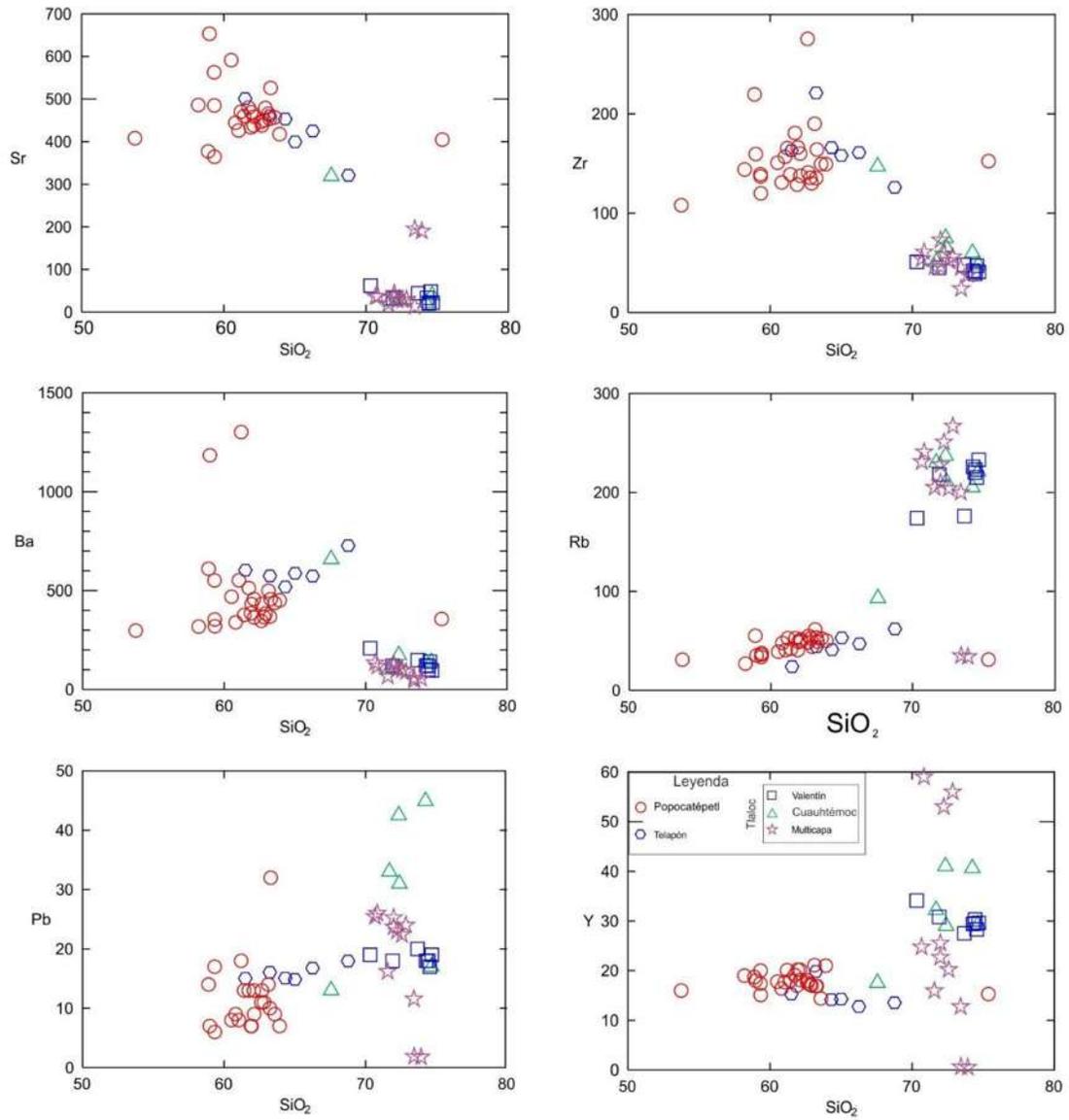


Figura 38. Diagramas binarios de elementos traza en ppm de Sr, Zr, Ba, Rb y Y.

En cambio, en el diagrama de multielementos (Sun y McDonouhg, 1989) de la figura 35A normalizado con respecto al manto, se graficó la concentración de los elementos traza de catorce muestras observando un enriquecimiento de elementos incompatibles tales como el Rb, Pb y Th que presentan anomalías positivas. Los elementos Nb, Ta, Sr, P y Ti por el contrario tienen anomalías negativas. Estas anomalías negativas (p.e. Sr y P) están relacionadas con la compatibilidad de fases minerales como plagioclasa y apatito con el líquido. En cambio la anomalía del Ti está relaciona con el fraccionamiento de la magnetita o la ilmenita. En este caso las rocas de la Secuencia Valentín tienen una anomalía mayor con respecto a la Secuencia Cuauhtémoc.

Los valores graficados en los diagramas de REE (Elementos de Tierras Raras) y normalizados con los valores de la condrita (Nakamura, 1974, fig. 39B), tienen un comportamiento de enriquecimiento de las Tierras Raras ligeras (LREE) y un menor enriquecimiento en las Tierras Raras pesadas (HREE). En general presentan una tendencia casi plana con anomalías negativas de Eu y Gd, lo cual se relaciona a ambientes de subducción (ambientes de arco y márgenes activos) (Wilson, 1989) (fig. 39B).

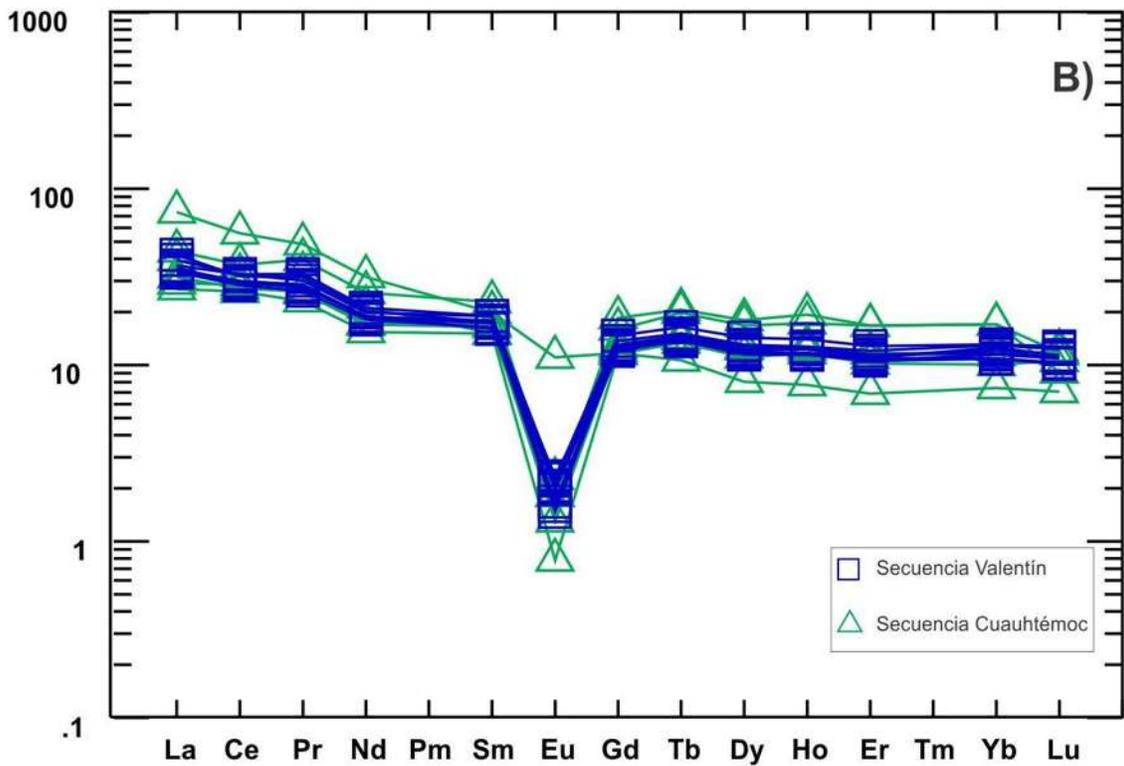
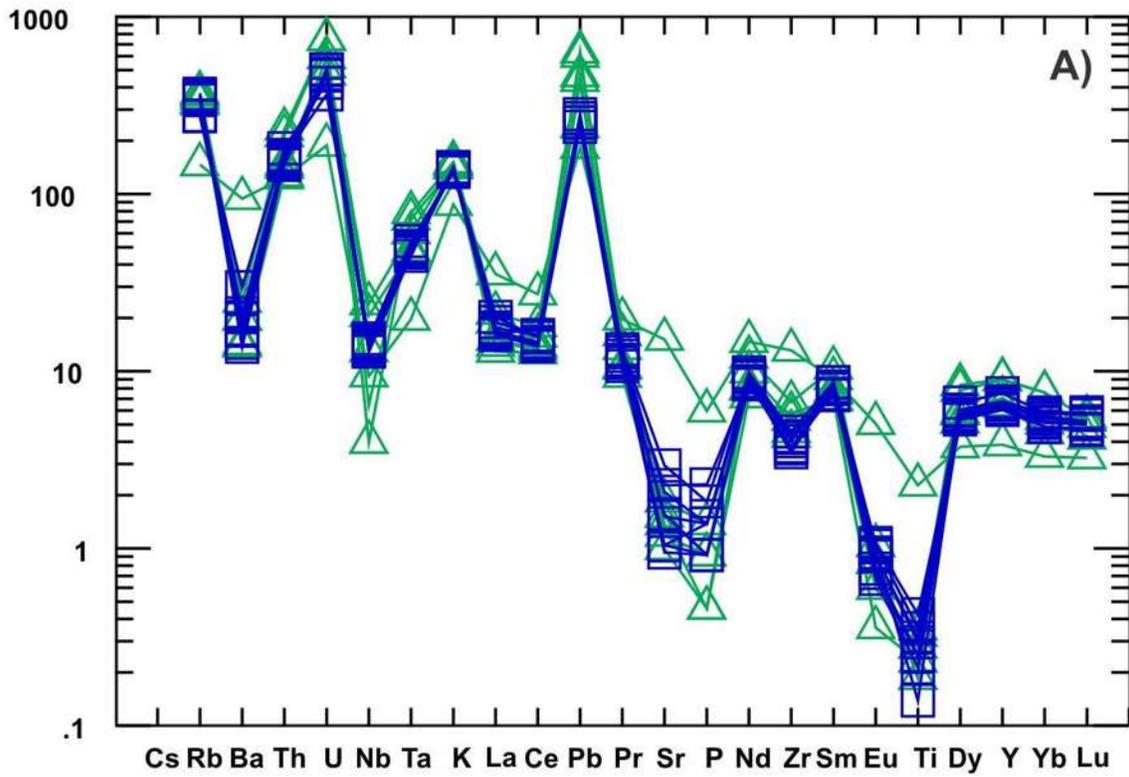


Figura 39. A) Diagramas de distribución multi-elementos normalizados a valores del manto primitivo (Sun y McDonouhg, 1989). B) Diagramas de REE normalizados con los valores de condrita (Nakamura, 1974). En ambos diagramas se aprecia una homogeneidad química para la Secuencia Valentín y Secuencia Cuauhtémoc.

6. Discusión

De acuerdo a los datos estratigráficos, geoquímicos, petrográficos, sedimentológicos y radiométricos del presente trabajo las erupciones que formaron la secuencia Valentín y Cuauhtémoc, consistieron de una serie de eventos piroclásticos provenientes del volcán Tlaloc.

El volcán Tlaloc (4120 m) es un complejo volcánico, que se formó durante el Terciario (Mooser, 1975), los productos más antiguos que han sido reportados tienen edades de 1.82 ± 004 Ma y 1.58 ± 003 Ma (Cadoux et al., 2011) y 1.7 Ma (Razo-Cruz, 2015 y Ávila-Huerta, 2015). De acuerdo con estos trabajos la primera fase de formación de este volcán tuvo lugar entre 1.82 y 1.58 Ma. Durante este periodo se formaron una serie de volcanes andesítico dacíticos al N-NE de la cima actual (Ávila-Huerta, 2015). Posteriormente, la actividad migró unos kilómetros al SO con la edificación de un volcán principal central (volcán Tlaloc) y domos dacíticos periféricos con edades que varían de 1.03 a 1,04 Ma como Quetzaltepec y Yahualica (García et al., 2011 y Macías et al., 2012) y flujos de lava de composición dacítica y depósitos piroclásticos, distribuidos alrededor de la cima actual del volcán (Macías et al., 2012). Este volcán estuvo activo hasta hace 800 mil de acuerdo a fechamientos obtenidos en lavas que circundan la cima del volcán (Cadoux et al., 2011; Macías et al., 2012). La actividad efusiva y dómica continuo en la cima del volcán Tlaloc en 0.9 y 0.8 Ma de acuerdo a fechamientos obtenidos en lavas que circundan la cima del volcán (Cadoux et al., 2011 y Macías et al., 2012). Para culminar con las construcción terminal-somital del volcán Tlaloc se emplazaron lavas daciticas viscosas y un domo central en la cumbre del volcán Tlaloc en ~330. Esta cima ha sido afectada por el colapso lateral de origen desconocido de su flanco este el cual ha sido afectado por glaciación y el emplazamiento de depósitos de morrenas (Macías et al., 2012). De acuerdo a estos autores una nueva fase de magmatismo inicio con el emplazamiento de domos y lavas riolíticas en el interior de la estructura de colapso hace ~129 ka. A partir de

este tiempo se han registrado por lo menos cinco erupciones de tipo explosivo que han originado magmas de composición dacítica y riolítica (Macías et al., 2012; Rueda et al., 2013). Estos magmas han generado erupciones muy explosivas hace 44, 38, 33, 31 y ~25 ka que han sido contemporáneas con actividad del volcán Popocatepetl en cual se sitúa al sur de la Sierra Nevada. Sólo una de estas erupciones conocida como multicapas ocurrida hace 31 ka, ha sido estudiada de manera detallada por Rueda et al. (2013). A continuación se describe la cronología eruptiva de dos de estas erupciones cuyas secuencias que han sido denominadas como Secuencias Valentín y Cuauhtémoc.

6.1 Erupción Valentín (44,195 ±2020/-1615 ka)

Fase uno

La erupción que produjo a la Secuencia Valentín ocurrió hace 44,195 ±2020/-1615 ka) en tres fases eruptivas. Esta secuencia está formada por una serie de depósitos de flujos de pómez, depósitos de caída y oleadas piroclásticas. Debido a que no se encontraron depósitos piroclásticos asociados a un domo (p.e. depósitos de flujos de bloques y cenizas) se infiere que esta erupción inicio a través de un conducto que estaba abierto (figura 40a). De acuerdo a las características geoquímicas de la rocas, se propone que antes de la erupción Valentín, un magma de composición riolítica (71.9% SiO₂) se encontraba estacionado a profundidad. Este magma desencadenó la erupción muy probablemente debido a sobrepresión o sobresaturación de volátiles en el sistema magmático (como es evidenciado por la presencia de anfíboles y biotita en la mineralogía de las rocas). El magma fragmentado a profundidad fue emitido a través de una columna ascendente de pómez, ceniza y gases que generó una erupción vertical que dispersó caídas de pómez. Esta columna probablemente alcanzó alturas plinianas (Gertisser et al., 2009; Macías et al., 2003; Saucedo et al., 2010;) o subplinianas (Bursik, 1993; Cioni et al., 2000, 2003) debido a que las capas depositadas tiene múltiples capas alternadas con depósitos de oleadas piroclásticas (figura 40 b). Esta columna fue dispersada por los vientos dominantes hacia el SE hasta distancias mínimas de 11 km en donde se encuentran expuestos los depósitos en las laderas del domo Cerros blancos y en el poblado de San Jun Cuauhtémoc.

Probablemente la alteración de las caídas y las oleadas piroclásticas, sugieren que hubo vapor de agua en la erupción, implicado interacciones freatomagmáticas complejas (Sheridan, 1979; Carey and Sigurdsson, 1985; Rowley et al., 1982; Arce, 1996; Macías et al., 1997b; Arce et al., 2003). Estas explosiones iniciaron la erupción, durante su ascenso erosionaron las paredes del conducto, reflejado por el enriquecimiento de líticos accidentales alterados en los depósitos observados en la parte superior del depósito de caída.

Fase dos

La erupción prosiguió con el emplazamiento de flujos piroclásticos de pómez, debido a la inestabilidad de la columna eruptiva que provocó su colapso parcial (Arce, 1996; Arce et al., 2005) emplazando dos unidades de flujo de pómez (1 y 2) de composición riolítica con un contenido de sílice de 74.4% a 74.5 % (figura 40 c). Sin embargo, la columna vertical al parecer continuó activa depositando pequeños horizontes de caída de pómez con dispersión hacia el SE del volcán (figura 40 d). Posteriormente, la columna se desestabilizó provocando su colapso, que emplazó a dos unidades de flujo piroclástico de pómez 3 y 4, cuyas composiciones fueron riolíticas. Estas pómez tienen un contenido de sílice de 74.3 % a 74.7 % (figura 37 e). Las cuatro unidades de flujo de pómez viajaron por las cañadas Huacahuasco, Candotitla, La Cruz y barrancas Ojo de Agua y Honda, emplazándose hasta donde se encuentran actualmente en los poblados, Santa Cruz Otlatla y San Juan Cuauhtémoc, alcanzado por lo menos 11 km de distancia. A la altura de la localidad de Cuauhtémoc las cuatro unidades de flujo fueron depositadas con espesores variables de 6 a 12 m. Por el contrario, en Otlatla solo se depositó una unidad de flujo (2), con un espesor de 10 m.

Fase tres

La erupción culminó con el establecimiento de una nueva columna eruptiva vertical con interacciones freatomagmáticas que dispersaron corrientes piroclásticas de densidad diluidas (oleadas piroclásticas) (figura 40 f). La nueva erupción inició con un evento freatomagmático, emplazando oleadas piroclásticas y depósitos de caída; las corrientes piroclásticas de densidad viajaron ~11 km de la fuente, encausándose en las cañadas Huacahuasco, Candotitla, La Cruz y barrancas Ojo de Agua y Honda. En la actualidad estos depósitos están emplazados en los poblados, Santa Cruz Otlatla y San Juan Cuauhtémoc. La erupción fue generada por un magma de composición riolítica, con un contenido de sílice de 70.3-73.7 %. En comparaciones con las fases eruptivas previas el contenido de sílice disminuyó. Los depósitos de caída y oleadas tienen un espesor total de 1.50 m aproximadamente, los análisis granulométricos indican un enriquecimiento de fracciones finas y fragmentos líticos alterados, esto sugiere que la erupción continuó con una interacción freatomagmática (Arce, 1996; Macías et al., 1997b).

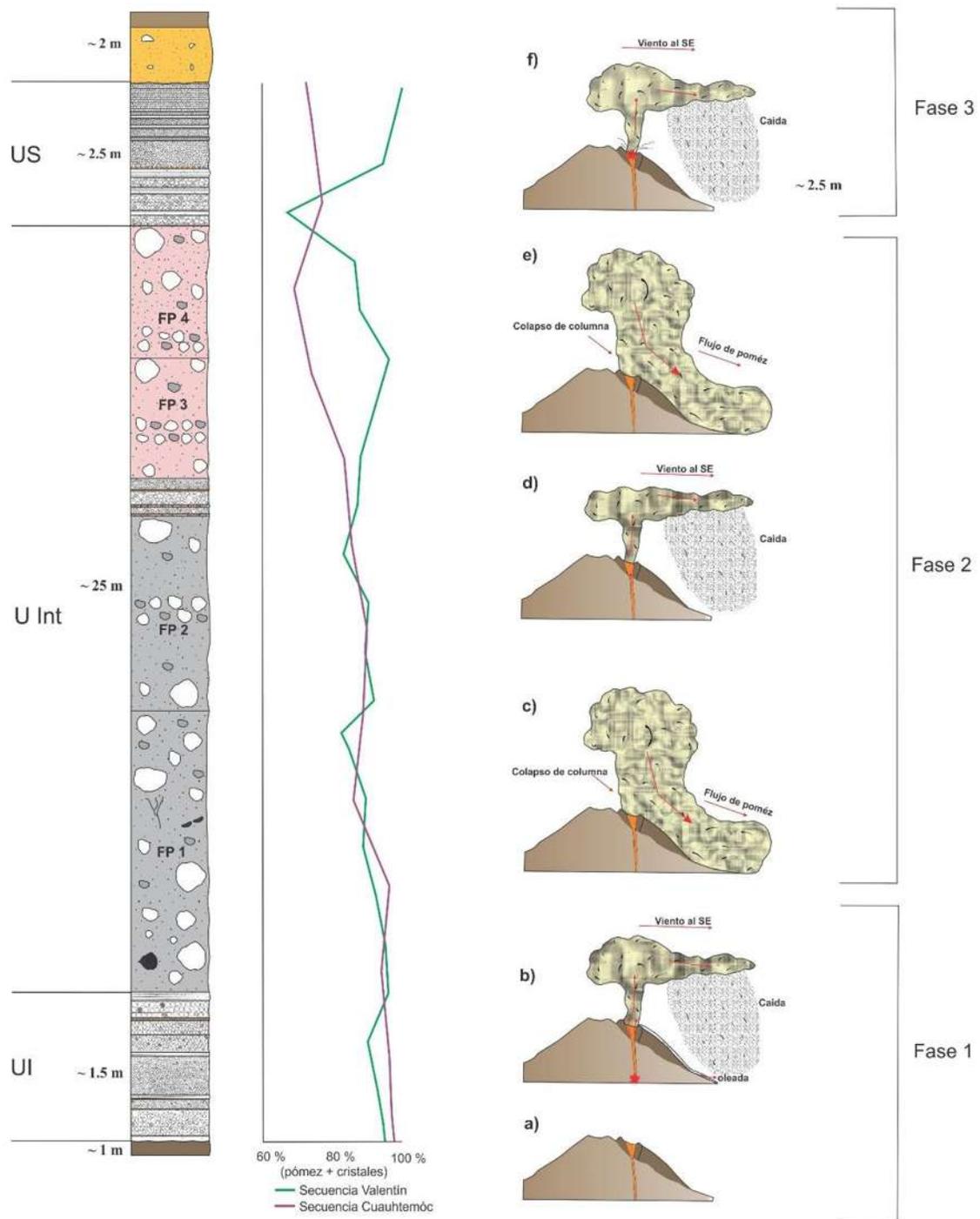


Figura 40. Fases eruptivas de la Secuencia Valentín y porcentaje de pómez + cristales, en comparación con la Secuencia Cuauhtémoc.

6.2 Erupción Cuauhtémoc

De acuerdo con el análisis de las edades por radiocarbono obtenidas en los depósitos de la Secuencia Cuauhtémoc y los paleosuelos asociados esta erupción ocurrió entre 20,930 y 21,630 años AP (Reyes-Agustin, 2011, 2015) y 25,640 años (Rueda-Galeano, 2005) que representa la erupción más joven del volcán. Esta erupción tuvo lugar unos 5 mil años después de la erupción Multicapa ocurrida hace 31,000 mil años AP (Rueda et al., 2013). Por la distribución de los depósitos básicamente hacia el SE de la cima del volcán es muy probable que haya ocurrido dentro del anfiteatro antes mencionado en donde afloran los cerros blancos y los domos riolíticos fechados hace 130 mil años. A continuación se presenta una interpretación de como ocurrió esta erupción (fig. 41a). Antes de la erupción estaba acumulado un magma de composición riolítica (72.34 % en peso de sílice) compuesto por cristales, volátiles y melt. La erupción fue provocada probablemente a la sobrepresión o sobresaturación de volátiles en el sistema magmático (como es señalado por la presencia de anfíbol y biotita). El magma fragmentado a profundidad formando una columna eruptiva cargada en de pomez, cenizas y gases.

Fase uno (erupción inicial)

La erupción comenzó con el emplazamiento de una columna de tipo subpliniana (Bursik, 1993; Cioni et al., 2000, 2003) que dispersó depósitos de caída hacia el SE del volcán la cual fue interrumpida en varias ocasiones por oleadas piroclásticas (figura 41 b). Estas explosiones freatomagmáticas erosionaron el conducto, lo cual es reflejado por el aumento de los líticos accesorios en los depósitos de caída cuyo contenido aumenta, (Arce, 1996; Macías et al., 1997b).

Los depósitos que emplazaron por el evento eruptivo (Unidad Inferior) se encuentran expuestos hasta una distancia de 17.4 km de la fuente en las cercanías de los poblados de San Juan Cuauhtémoc, Santa Cruz Otlatla y Río Frío.

Fase dos.

Como se mencionó anteriormente, es probable que estas explosiones freatomagmáticas de la fase uno hayan erosionado el conducto volcánico

produciendo sucesivamente el colapso de la columna piroclástica establecida originando el emplazamiento de flujos piroclásticos. En efecto estos depósitos son ricos en líticos (10-30 %) con respecto a los depósitos de la Unidad Inferior, lo que pudo haber ocasionado la ampliación del conducto y a una mayor salida del magma y aumento de su densidad provocando que la columna colapsará como fue descrito para la Pómez Toluca Superior del Nevado de Toluca (Arce, 1996; Arce et al., 2003, 2005). El magma que alimento los flujos piroclásticos tuvieron una composición riolítica (74.6-72.4% en peso de sílice), a diferencia del último flujo (FP3) que tiene un contenido 67.67 % en sílice (figura 41 c).

El evento piroclástico emitió tres episodios de flujos (1, 2 y 3) que se movieron por el flanco sureste del volcán Tláloc; estas tres unidades de flujo que se desplazaron por las barrancas de Honda, Paso del Muerto, Río Grande y Cañada Tuzantlapa en las cercanías donde se encuentra hoy en poblado de San Juan Cuauhtémoc. Otros flujos piroclásticos se movilizaron hacia el sur en donde actualmente se encuentran los poblados de Santa Cruz Otlatla y Río Frío. La paleotopografía influyó en el emplazamiento de los flujos piroclásticos en el área ya que al sureste de Río Frío (autopista México- Puebla) en zonas elevadas los depósitos de flujo piroclástico están ausentes, y solo se encuentran expuestos los depósitos de caída de la Unidad Superior.

Fase tres:

La erupción continuó con el establecimiento de una nueva columna eruptiva con el emplazamiento de oleadas piroclásticas seguidos de depósitos de caída (Sheridan, 1979; Arce, 1996) (fig. 41d). Esta fase de la erupción inició con un evento freatomagmático que emplazó una oleada piroclástica que se dispersó por el flanco sureste del volcán hasta 17.4 km de la cima, erosionando a los depósitos de flujo piroclástico anteriores. A esta explosión le siguió el establecimiento de una columna eruptiva que dispersó hacia el SE y SSE depósitos de caída. Los depósitos de caída de esta fase (Unidad Superior) también tuvieron una composición riolítica (71.68 % en peso de sílice) relativamente empobrecido en sílice con respecto a los depósitos de las fases anteriores. Los depósitos de caída se dispersaron hacia el flanco sureste en dirección del viento predominante actualmente están expuestos

a una distancia de 17.4 km desde la cima en localidades actuales cercanas a San Juan Cuauhtémoc, Santa Cruz Otlatla y Río Frío. La intercalación de depósitos de caída y oleadas piroclásticas sugieren que la erupción siguió con actividad freatomagmática (Arce, 1996) que podría ser típica de columnas subplinianas inestables (Bursik, 1993; Cioni et al., 2000, 2003).

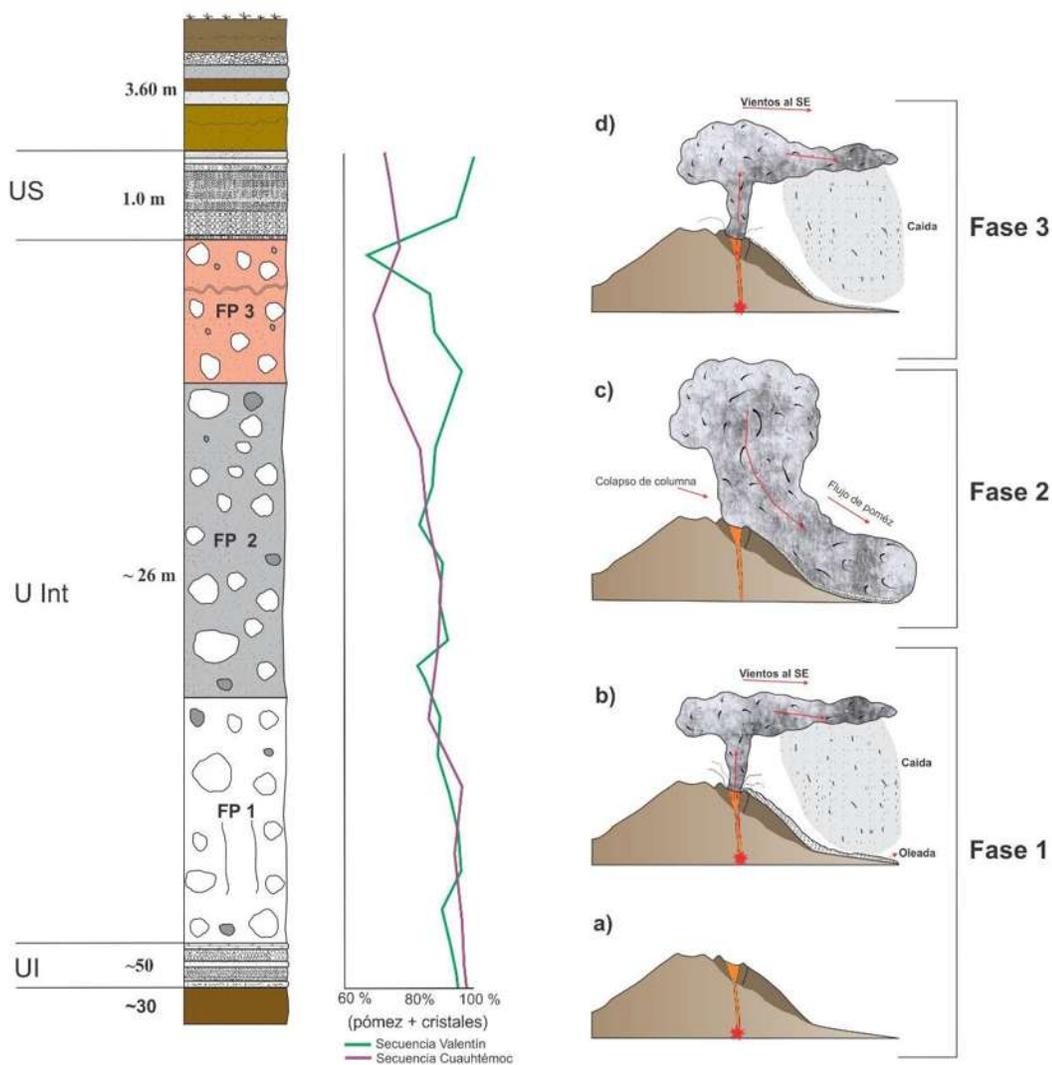


Figura 41. Fases eruptivas de la Secuencia Cuauhtémoc y porcentaje de pómez + cristales, en comparación con la Secuencia Valentín.

CONCLUSIONES

De acuerdo con estudios estratigráficos, radiométricos, cartográficos, y geoquímicos, la erupción que originó a la secuencia Valentín ocurrió entre 36,000 y 44,000 años AP. Esta erupción fue provocada por el ascenso de un magma riolítico. La erupción tuvo lugar en tres fases eruptivas mediante erupciones hidromagmáticas y una columna eruptiva (fase 1= Unidad Inferior), seguida del colapso de la columna con la generación de flujos piroclásticos de pómez (fase 2= Unidad Intermedia) y finalmente el establecimiento de una columna eruptiva alternada con la dispersión de oleadas piroclásticas (Fase 3 = Unidad Superior). La extensión máxima de los flujos piroclásticos fue de 9 a 11.6 km desde la fuente.

Por otra parte, la erupción que originó a la Secuencia Cuauhtémoc fue por el ascenso de un magma riolítico (71.7 – 74.6 % en peso de sílice). La erupción tuvo lugar en la misma estructura en forma de herradura del Volcán Tlaloc y consistió de tres fases eruptivas: primero con el establecimiento de una columna eruptiva interrumpida por explosiones hidromagmáticas (Unidad Inferior) seguramente una columna de tipo Subpliniano; seguida del colapso de la columna que emplazó flujos piroclásticos de pómez (Unidad Intermedia); y finalmente una segunda columna eruptiva que dispersó depósitos de caídas y oleadas piroclásticas (Unidad Superior). Las dataciones radiométricas de C14 indican que este evento ocurrió entre $20,930 \pm 80$ y $- 25,670 \pm 220$ años AP. Las erupciones piroclásticas del volcán Tlaloc estudiadas, indican que una migración del vulcanismo hacia el sur de la Sierra Nevada, no existe, y que el volcán Tlaloc es más explosivo en erupciones de flujos piroclásticos que los otros volcanes de la Sierra Nevada como son Iztaccíhuatl y Popocatepetl. La erupción más joven, (Secuencia Cuauhtémoc) muestra que El Complejo Volcánico Tlaloc-Telapón estuvo activo hasta finales del Pleistoceno Tardío y cerca del Holoceno. La gran cantidad de depósitos piroclásticos que rodean al Complejo Volcánico Tlaloc-Telapón, hacen de esta zona muy importante porque estos materiales son zona de recarga de los acuíferos de las Cuencas de México y Puebla-Tlaxcala, por lo que su conservación es necesaria para el futuro.

Referencias

- Arce-Saldaña, 1996. Estudio Vulcanológico preliminar del Nevado de Toluca, Edo. México. Universidad Nacional Autónoma de Guerrero, Escuela Regional de Ciencias de la Tierra, tesis de licenciatura.
- Arce et al., 2003. The 12.1 ka Middle Toluca Pumice: A dacitic Plinian-subplinian eruptive of Nevado de Toluca volcano, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 147 (2005) 125 - 143.
- Arce et al., 2005. The 10,5 Plinian eruption of Nevado de Toluca volcano, México: Stratigraphy and hazard implications. *Geological Society of América Bulletin*, v.115, p.230-248
- Avila- Huerta, Estudio Vulcanologica de la vertiente NNE del complejo volcánico Tláloc-Telapón. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, tesis de licenciatura, pág. 93.
- Bachmann, O., Bergantz, G.W., 2008. Rhyolites and their source mushes across tectonic settings. *Journal of Petrology* 49, 2277–2285.
- Cadoux, Anita; Missenard, Yves; Martínez-Serrano, R.G.; y Guillou, Hervé, 2011, Trenchward Plio-Quaternary volcanism migration in the Trans-Mexican Volcanic Belt—The case of the Sierra Nevada range. *Geological Magazine*: v. 148, p. 492-506.
- Carey S. and Sigurdsson H., The May 18, 1980 Eruption of Mount St. Helens, *Journal of Geophysical Research*, v. 90, p. 2948- 2958.
- Carrera-Muñoz, M., Estudio Geocronológico y Petrológicos del Basamento del Complejo Volcánico Tacana. Instituto Politécnico Nacional, ESIA, Tesis para obtener título de Ingeniero Geólogo.
- Criswell, W. 1987. Chronology and Pyroclastic Stratigraphy of the May 18, 1980, Eruption of Mount St. Helens, Washington, v. 90, p. 10,237-10,266
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 1996. Estudio geofísico-geohidrológico en la zona del lago Nabor-Carrillo, Texcoco, Estado de México; México, CNA, CFE, 19p.
- Cruickshank-García, G., 1995, Proyecto Lago de Texcoco, rescate Hidrológico: México, CNA, 111 p.
- Demant, A. 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, v. 2, pp. 172-187

- García-Palomo, A., Macías-Vázquez, J. L. and Arce-Saldaña, J. L. 2007. Estudio estructural preliminar del complejo volcánico de Tláloc-Telapón sector norte de la Sierra Nevada. Reunión Anual de la unión Geofísica Mexicana, GEOS; v.27 (1), pp.13
- García-Tenorio, F. 2002 Estratigrafía y Petrografía del Complejo Volcánico Iztaccíhuatl. Instituto Politécnico Nacional, ESIA. Tesis de Licenciatura (inédita) 150 p.
- García-Tenorio, F. 2008 Avalancha de Escombros del Pleistoceno Tardío del Cono los Pies, Complejo Volcánico Iztaccíhuatl. Instituto Politécnico nacional, ESIA. Tesis de Maestría, 147 p.
- García-Tovar, G.P. 2009. Características geológicas, geoquímicas e isotópicas de las lavas del estratovolcán Telapón, Sierra nevada, México. Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias De la Tierra, Tesis de Maestría (inédita).
- Gardner J. E. and Tait S., 2000, The caldera-forming eruption of Volcán Ceboruco, México, Bulletin of Volcanology.
- Glazner, A.F., Coleman, D.S., Bartley, J.M., 2008. The tenuous connection between highsilica rhyolites and granodiorite plutons. *Geology* 36, 1047–1050.
- Gunn, B. M. y Mooser, F., 1971, Geochemistry of the volcanics of central México. *Bull. Volcanol.*, 34: 577-616.
- Huddart, D and Gonzalez, S. 2004. Pyroclastic flow and associate sediments, Tláloc-Telapón, piedmont fringe of the eastern basin of México. Neogene-Quaternary Continental Margin Volcanism. Proceeding of the GSA Penrose Conference at Metepec Puebla, México 2004. Aguirre-Díaz, G. J Macías-Vázquez, J.L., and Siebe, C, eds., pp35.
- INEGI. 2003. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Carta topográfica Chalco (E14B31,) escala 1:50,000, segunda impresión 2003.
- INEGI. 2003. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Carta topográfica San Martín Texmelucan (E14B32,) escala 1:50,000, segunda impresión 2003.
- INEGI. 2005. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Carta topográfica Ciudad de México (E14-2,) escala 1:50,000, cuarta impresión 2005.
- Irvine, T.N., Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 8, pp. 523-548.

- Júarez-López, K., 2009. Variaciones geoquímicas de minerales: Evidencias de Procesos magmáticos en el estratovolcán Tláloc, Sierra Nevada. Instituto Politécnico Nacional, ESIA, Tesis de Licenciatura (inéedita), 99.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin B. 1986. A chemical classification of the volcanic rocks base on the total alkalis-silica diagram. *Journal of Petrology*, v 27, 99. 745-750
- Ledesma-Guerrero, O., (1987), Hoja Calpulalpan 14Q-h (3), con resumen de la geología de la hoja Calpulalpan, estados de Hidalgo, México y Tlaxcala, UNAM.
- Vázquez-Selem, L., and Heine, K., 2004, Late Quaternary glaciation of Mexico, in Ehlers, J., and Gibbard, P.L., eds., *Quaternary Glaciations - Extent and Chronology, Part III: South America, Asia, Africa, Australia, Antarctica*: Amsterdam, Elsevier, p. 233-242.
- Macías et al., 2003, A550-year-old Plinian eruption at El Chichón Volcano, Chiapas, Mexico: Explosive volcanism linked to reheating of the magma reservoir., *Journal of Geophysical Research*, v. 108.
- Macías J.L., Evolución espacio-temporal de los volcanes Tláloc y Telapón, sierra de río frío. Instituto de Geología, UNAM. Simposio Dr. Zoltan de Cserna. Libro de resúmenes. 116 p.
- Macías J.L., Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Macías, J.L., Arce, J.L., García, P.A., Siebe, C., Espíndola, J.M., Komorowski, J.C., Scott, K., 1997a, Late Pleistocene-Holocene cataclysmic eruptions at Nevado de Toluca and Jocotitlan volcanoes, Central México, en: Link, K. P., Kowallis, B. J., (eds.), *Proterozoic to recent stratigraphy, tectonics, and volcanology, Utah, Nevada, southern Idaho and Central México*: Brigham Young Univesity, Geology Studies.
- Meier, M., Grobéty, B., Arce, J. L. and Rueda, H. 2007. Origin and age of Volcanic Rocks of Tláloc Volcano, Sierra Nevada, Central México. AGU abstracts in Acapulco, México.
- Mooser, F. 1957. Los ciclos de Vulcanismo que formaron la Cuenca de México. En: 20th International Geological Congress, Section 1.
- Nakamura N.1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na, and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochemical et Cosmochemical Acta*, v.38, pp. 757-775

- Negendank, J. F. W., 1972, Volcanics of the Valley of México, Part I: Petrography of the volcanics. N. Jb. Miner. Abh., 116: 308-320.
- Nixon, G.T. 1989. The Geology of Iztaccíhuatl volcano and adjacent areas of the Sierra Nevada and Valley of México: Boulder, CO, Geological Society of America, Special Paper, V. 219, 58 pp.
- Nixon, G.T. 1988. Petrology of the Younger Andesites and Dacites of Iztaccíhuatl volcano Mexico: I. Disequilibrium Phenocryst Assemblages Indicators of Magma Chamber Processes., Journal of Petrology V. 29.,pp, 213-264.
- Tapia-Varela G., y López-Blanco J., 2002, Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México, Unidades morfogénicas a escala 1: 100,000. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. V. 19, núm. 1., 50-65, 50 p.
- Pearce J.A. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins, pp. 230-249.
- Pearce, J.A., Norry, M.J., 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. Contributions to Mineralogy and Petrology 69, 33-47.
- Peccerillo R. and Taylor S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. Contribution of Mineralogy and Petrology., v. 58, pp.63-81.
- Razo-Cruz, 2015. Estudio vulcanológico de la vertiente este y de Los depósitos de Flujos de pomez Tepixtic del Estratovolcán Tlaloc. México D.F. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, tesis de licenciatura. 102 p.
- Reyes A.G., 2011. Estudio Vulcanológico del Flujo de pómez Cuauhtémoc en el sector SE del complejo volcánico Tlaloc-Telapón. México D.F. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, tesis de licenciatura. 99 p.
- Rowley et al. 1982. Pyroclastic-Flow Deposits (The 1980 Eruption of Mount St. Helens, Washington).
- Rueda, H., Arce, J., Macías, J. and García-Palomo, A., 2005. Estratigrafía preliminar del Volcán Tlaloc (México central). Revista de Vulcanología. V. 25, num. 1, pp. 193-211
- Rueda, H., Arce, J., Macías, J. and García-Palomo, A., 2007. Pyroclastic sequences at the N-Ne slopes of Tlaloc-Volcano, Sierra Nevada, central México, eds., pp.100
- Rollinson, H.R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Scientific and Technical, NY. (352 pp.).

- Schlaepfer, J. C. 1968, Resumen de la Geología de la Hoja México, Distrito Federal y estados de México y Morelos. Hoja México 14 Q-h (5), Esc. 1:100,000, Inst. Geología, UNAM, México, D.F.
- Scolamacchia T. Macias J.L. Sheridan M.F. Hughes S.R., 2005, Morphology of ash aggregates from wet pyroclastic surges of the 1982 eruption of El Chichón Volcano, México.
- Sigurdsson H. and Carey S, 1989., Plinian and co-ignimbrite tephra fall from the 1815 eruption of Tambora volcano., Bulletin of Volcanology.
- Streckeisen & Le Maitre, R, W., 1979. A chemical approximation to the modal QAPF classification of the igneous rock. Neues Jahrbuch fur Mineralogie Abhandlungen, 136:169-206.
- Streckeisen, A.L., 1976, Classification of the common igneous rocks by means of their chemical composition: a provisional attempt. Neues Jahrbuch fur Mineralogie, Monatshefte, H1,1-15.
- Valadez-Cabrera, S-N. 2009. Procesos Magmáticos en el estratovolcán Tláloc: Sierra Nevada: Evidencias geoquímicas e isotópicas en xenolitos. Instituto Politécnico nacional, ESIA. Tesis de Licenciatura (inédita).
- Vázquez-Sánchez, E. y Jaimes-Palomera, R., 1989. Geología de la Cuenca de México. Geofísica Internacional, v. 28(2), pp. 133-190.
- Wilson, M., 1989. Igneous Petrogenesis. A Global Tectonic Approach. Chapman and Hall, London. (466 pp.).

Anexo A

Tabla 2. Análisis químico de las rocas de la Secuencia Valentín

Secuencia Valentín								
Unidad	Unidad Inferior	Unidad Intermedia					Unidad Superior	
Muestra	TL-1407-DC inf.IVa	TL-1407-F1-G	TL-1407-F1-B	TL-1407-F2	TL-1407-F3	TL-1407-F4	TL-1413-1C	TL-1413-C2
wt. %								
SiO ₂	71.90	74.41	74.43	74.54	74.28	74.68	70.32	73.67
TiO ₂	0.03	0.046	0.054	0.092	0.064	0.053	0.077	0.068
Al ₂ O ₃	14	13.25	13.13	13.24	13.4	13.15	15.8	14.43
Fe ₂ O ₃ t	1.29	1.15	1.23	1.46	1.60	1.75	1.35	1.23
MnO	0.079	0.071	0.074	0.071	0.074	0.078	0.07	0.068
MgO	0.17	0.1	0.12	0.23	0.14	0.11	0.18	0.15
CaO	0.66	0.53	0.59	0.8	0.67	0.55	0.69	0.66
Na ₂ O	3.4	3.96	3.88	3.86	4	3.99	3.37	3.7
K ₂ O	4.2	4.27	4.26	4.07	4.2	4.12	4.01	4.22
P ₂ O ₅	0.03	0.02	0.03	0.05	0.02	0.02	0.04	0.03
Total	100.6	100.5	100.6	100.9	100.6	100.6	100.7	100.7
LOI(%)	4.78	2.65	2.83	2.46	2.19	2.09	4.78	2.5
ppm								
Ni	6	8	6	10	10	8	7	5
Zn	40	37	41	42	38	37	48	39
Rb	218	220	223	215	226	233	174	176
Sr	32	20	22	48	33	22	62	44
Zr	45	39	41	47	42	41	51	48
Ba	120	118	101	141	121	96	208	148
La	12.1	11.3	11.5	11.7	11.1	11	13	13.9
Ce	28.3	25.8	25.9	25.4	24.5	25.3	28.3	27.5
Pr	3.37	3.19	3.19	3.08	2.95	3.12	3.67	3.53
Nd	12.5	11.9	11.7	11.9	11.4	11.8	13.3	12.8
Sm	3.84	3.55	3.51	3.25	3.31	3.63	3.85	3.55
Eu	0.159	0.113	0.129	0.18	0.155	0.122	0.174	0.152
Gd	3.77	3.58	3.59	3.4	3.54	3.31	4.05	3.5
Tb	0.71	0.67	0.69	0.64	0.65	0.65	0.77	0.65
Y	30.8	29.5	30.3	28.3	29.4	29.6	34.1	27.5
Dy	4.47	4.22	4.39	4.1	3.97	4.15	4.9	3.93
Ho	0.89	0.86	0.87	0.81	0.82	0.86	0.98	0.8
Er	2.71	2.46	2.59	2.39	2.44	2.55	2.88	2.38
Yb	2.85	2.77	2.57	2.52	2.4	2.67	2.88	2.39
Lu	0.419	0.383	0.373	0.371	0.35	0.386	0.433	0.344
V	<5	<5	<5	8	<5	<5	<5	<5
Cr	30	30	30	25	40	30	30	20
Nb	10.5	9.6	10.1	9.3	9.2	9.9	10.9	10.2
Hf	2.4	2.2	2.2	2.4	2.3	2.1	2.7	2.4
Ta	2.05	1.97	2.02	1.9	1.82	1.91	2.21	2.06
Pb	18	18	18	17	18	19	19	20
Th	14.1	13.3	13.7	12.4	12.5	12.9	15.4	13.9
U	9.84	10.5	10.6	9.78	10	10.6	8.9	7.66

Tabla 3. Análisis químico de las rocas de la Secuencia Cuauhtémoc

Secuencia Cuauhtémoc						
Unidad	U.Inferior	Unidad Intermedia				U. Superior
Muestra	TL- DCI4	TL-FP1	TL-1401-FP1-B	TL-FP2	TL-1401-FP3	TL-DC2
Wt. %						
SiO ₂	72.34	74.23	74.64	72.39	67.56	71.68
TiO ₂	0.07	0.04	0.076	0.05	0.493	0.06
Al ₂ O ₃	13.77	12.90	13.1	12.83	15.49	13.68
Fe ₂ O ₃ t	1.00	0.75	1.28	0.82	3.48	1
MnO	0.07	0.06	0.071	0.07	0.058	0.08
MgO	0.2	0.11	0.19	0.14	1.36	0.16
CaO	0.51	0.45	0.69	0.49	3.17	0.49
Na ₂ O	3.72	4.03	4.13	4.05	3.41	4.07
K ₂ O	4.56	4.28	4.4	4.23	2.63	4.47
P ₂ O ₅	0.02	0.01	0.03	0.01	0.13	0.02
Total	96.26	96.86	100.9	95.08	100-8	95.71
LOI(%)	3.70	3.11	2.34	4.89	3.06	4.25
ppm						
Ni	0	0	7	0	14	0
Zn	0	0	38	0	51	36
Rb	237	205.00	221	211	93	230
Sr	32	21.00	39	29	319	25
Zr	75	60.00	48	65	147	51
Ba	173	137.00	138	97	658	100
La	14.6	13.00	10.4	8.9	24.3	9.6
Ce	32.0	28.00	23.6	22.6	48.4	24.7
Pr	4.43	3.70	2.92	2.58	5.43	2.87
Nd	16.2	13.40	10.9	9.7	19.9	10.7
Sm	4.62	3.08	3.44	3.06	4.03	3.34
Eu	0.14	0.14	0.174	0.06	0.85	0.1
Gd	5.11	4.40	3.35	3.2	3.22	3.5
Tb	0.97	0.93	0.66	0.63	0.5	0.67
Y	41.0	40.60	29.3	28.99	17.5	32.18
Dy	6.17	5.74	4.23	3.8	2.76	4.32
Ho	1.35	1.21	0.86	0.82	0.54	0.89
Er	3.77	3.76	2.48	2.3	1.55	2.64
Yb	3.74	3.74	2.67	2.21	1.63	2.51
Lu	0.4	0.31	0.392	0.36	0.24	0.41
V	2	0	6	1	48	1
Cr	3	2.00	30	0	50	0
Nb	4.58	2.83	9.3	14.7	6.7	17.1
Hf	2.38	1.39	2.3	1.89	3.8	2.11
Ta	3.19	2.93	1.88	1.96	0.8	2.46
Pb	42.5	44.90	17	31	13	33
Th	19.7	18.10	12	10.8	10.5	12.5
U	15.6	15.60	9.96	10.96	3.95	12.34

Anexo B

Tabla 4. Síntesis petrográfica de todas las secciones delgadas realizadas, correspondientes a distintas unidades de la Secuencia Valentín y Cuauhtémoc.

UNIDAD	Muestra	Coordenadas		Tipo de Roca	Cristalinidad	Granularidad	Textura	Mineralogía	Observaciones
		X	Y						
Cuauhtémoc	TL-1401F1a	544731	2143681	Pomez	Hipocristalina	Inequigranular	vesicular, fluidal	Minerales (10%): plg (3%), feld-k (3%), bt (3%), qz (0.7%), opx (0.2%), ox (0.1%). Matriz (90%): Matriz vítrea fluidal, con vesículas pequeñas, irregulares y con microlitos de plg.	En general, se observan fenocristales, microfenocristales y microlitos de plg, feld-k, bt, qz, con bordes reabsorbidos. En cambio los opx se encuentran como microfenocristales al igual con bordes corroídos, los óxidos por lo regular se encuentran como microlitos. También se observan glomeroporfidos de bt. La matriz de vidrio, con vesículas elongadas en dirección al flujo.
Cuauhtémoc	TL-1401F1b	544731	2143681	Pomez (densa)	Hipocristalina	Inequigranular	vesicular, fluidal	Minerales (9%): plg (4%), bt (1.5%), opx (1%), cpx (1%), ox (0.5%). Matriz (91%): Matriz vítrea fluidal y vesicular	En general, se observan fenocristales, microfenocristales y microlitos de plg, bt, anf, con bordes reabsorbidos de forma euhedral a subhedral. En cambio los opx y cpx se encuentran como microfenocristales al igual con bordes corroídos de forma subhedral ocasionalmente con inclusiones de óxidos; los óxidos se encuentran como microlitos. También se observan glomeroporfidos de plg, cpx con inclusiones de óxidos. La matriz de vidrio, con vesículas redondeadas.
Cuauhtémoc	TL-1401F2	544731	2143681	Pomez	Hipocristalina	Inequigranular	vesicular, fluidal	Minerales (9%): plg (2%), bt (1.5%), qz (1%), feld-k (0.5%). Matriz (95%): Matriz vítrea fluidal y vesicular.	Se observan fenocristales y microfenocristales de plg, bt y feld-k, qz, de forma euhedral a subhedral, algunos los encontramos con inclusiones de ox o de bt en el caso de las plg, las bt y los qz se encuentran corroídos. En general, la matriz es vítrea fluidal y vesicular, las vesículas son redondeadas.
Cuauhtémoc	TL-1401F3a	544731	2143681	Pomez (densa)	Hipocristalina	Inequigranular	vesicular, fluidal	Minerales (7%): plg (3%), bt (2%), qz (1.5%), ox (0.5%). Matriz (93%): Matriz vítrea fluidal y vesicular.	Se observan fenocristales y microfenocristales de plg, bt y qz, de forma euhedral a subhedral, las bt las encontramos con bordes corroídos, los qz se observan fracturados con inclusiones de bt. También se observan microlitos de ox, en la matriz. La matriz, es vesicular a fluidal, con vesículas redondeadas.
Cuauhtémoc	TL-1401F3b	544731	2143681	Pomez (densa)	Hipocristalina	Inequigranular	vesicular, poco fluidal	Minerales (5%): plg (1.5%), bt (1%), qz (1%), feld-k (1%), anf (0.5%). Matriz (95%): Matriz vítrea vesicular, poco fluidal.	Se observan fenocristales y microfenocristales de plg, feld-k, bt, qz, anf, de forma euhedral a subhedral, los qz presentan golfos de corrosión, así como inclusiones de bt. En cambio las plg y bt presentan bordes corroídos; los feld-k, presentan fracturamiento y maclado tipo carlsbad con inclusiones de plg. También se observan glomeroporfidos de plg con inclusiones de bt. La matriz, es vesicular poco fluidal, las vesículas son elongadas a subredondeadas.

Cuauhtémoc	TL-1402 DC-Sup(a)	545167	2143458	Pomez	Hipocristalina	Inequigranular	vesicular, fluidal	Minerales (4%): plg (2.5%), bt (1%), qz (0.5%). Matriz (96%): Matriz vítrea vesicular, fluidal.	Se observan microfenocristales y pocos fenocristales de plg, bt, qz; de forma euhedral a subhedral. Las plg presentan maclado polisintético y pocas son zonadas; en cambio la bt, la entramos de forma fibrosa. La matriz, es vesicular y fluidal, las vesículas son elongadas en dirección del flujo.
Cuauhtémoc	TL-1403 DC-Inf-d	545473	2143435	Pomez (beigue)	Hipocristalina	Inequigranular	vesicular, poco fluidal o bien áfirica con pocos cristales	Minerales (2%): plg (1%), bt (0.6%), anf (0.4%). Matriz (98%): Matriz vítrea vesicular, fluidal.	Se observan microfenocristales y escasos fenocristales de plg, anf; de forma subhedral. Las plg, presentan textura de tamiz, maclado polisintético; en cambio la bt la entramos como microlitos en la matriz. La matriz, es vítrea poco fluidal y vesicular, pocos cristales, podría ser un textura áfirica con pocos cristales.
Cuauhtémoc	TL-1405 DC-Sup(a)	538162	2140058	pomez (densa)	Hipocristalina	Inequigranular	vesicular	Minerales (2%): plg (1%), bt (0.9%), qz (0.1%). Matriz (98%): Matriz vítrea vesicular.	Se observan microfenocristales, microlitos y escasos fenocristales de plg, bt y qz; de forma subhedral en su mayoría. Las plg presentan maclado polisintético y carlsbad; en cambio la bt la encontramos de manera fibrosa con bordes corroídos. La matriz, es vítrea fluidal y vesicular, las vesículas se presentan de forma subredondeada de tamaño muy pequeño.
	TL-1406	525527	2135016	Pomez	Hipocristalina	Inequigranular	vesicular, fluidal o bien áfirica con pocos cristales	Minerales (1%): plg (0.6%), anf (0.4%). Matriz (99%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan microfenocristales, microlitos de plg y anf; de forma subhedral en su mayoría. Las plg presentan un maclado polisintético y carlsbad con bordes corroídos; en cambio el anf también presenta bordes corroídos. La matriz, es vítrea fluidal y vesicular, las vesículas se presentan de forma subredondeada a redondeada.
Valentín	TL-1404 F3	539448	2144820	Pomez	Hipocristalina	Inequigranular	vesicular, fluidal	Minerales (7%): plg (3.5%), bt (2.5%), anf (1%). Matriz (93%): Matriz vítrea vesicular, fluidal.	Se observan fenocristales y microfenocristales de plg, bt, qz; de forma subhedral y pocos anhedral (qz). Las plg presentan bordes corroídos, maclado polisintético y carlsbad, con inclusiones de bt; en cambio la bt la encontramos de forma fibrosa. Los qz se presentan con bordes corroídos y fracturados. La matriz, es vítrea fluidal y vesiculada, las vesículas son de forma elongadas en dirección al flujo.
Valentín	TL-1407 F1a	542509	2144491	pomez (blanca)	Hipocristalina	Inequigranular	vesicular, fluidal	Minerales (7%): plg (4%), bt (2%), qz (1). Matriz (93%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales y microlitos de plg, bt, qz; de forma subhedral en su mayoría. Las plg presentan bordes polisintético y carlsbad; en cambio la bt la encontramos de forma fibrosa con bordes corroídos. Los qz se presentan muy fracturados y como fenocristales. La matriz, es vítrea fluidal y vesiculada, las vesículas son de forma elongadas en dirección al flujo.

Valentín	TL-1407 F1b	542509	2144491	Pomez (gris densa)	Hipocristalina	Inequigranular	vesicular, fluidal	Minerales (9%): plg (4%), bt (3%), qz (2%). Matriz (91%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales y microlitos de plg, bt, qz; de forma subhedral, y pocos anhedral. Las plg presentan bordes corroídos, fracturadas, maclado polisintético y carlsbad, algunas presentan zoneamiento; en cambio la bt la encontramos de forma fibrosa con algunos bordes corroídos. Los qz se presentan muy fracturados. La matriz, es vítrea fluidal y vesiculada, las vesículas son de forma elongadas a subredondeadas.
Valentín	TL-1407 F2a	542509	2144491	Pomez (gris claro)	Hipocristalina	Inequigranular	vesicular, fluidal	Minerales (9%): plg (3%), bt (3%), feld-k (2%), anf (1.5%), ox (0.5%). Matriz (91%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales y microlitos de plg, bt, feld-k, anf; de forma subhedral, y pocos anhedral. Las plg presentan bordes corroídos, fracturadas, maclado polisintético y carlsbad, algunas presentan zoneamiento; en cambio la bt la encontramos de forma fibrosa con algunos bordes corroídos. Los qz se presentan muy fracturados. La matriz, es vítrea fluidal y vesiculada, las vesículas son de forma elongadas a subredondeadas.
Valentín	TL-1407 F2b	542509	2144491	xenolito (granítico)	Holocristalina	Equigranular	Hipidiomorfa	Minerales (100%): plg (60%), bt (20%), qz (10%), anf (5%), ox (5%).	Se observan fenocristales, microfenocristales de plg, bt, qz y anf; de forma subhedral y poco euhedrales. Las plg presentan algunos bordes corroídos y de tamiz; en cambio la bt y el anf los encontramos con bordes corroídos. Los qz en su mayoría son fenocristales. Los óxidos los encontramos como microlitos.
Valentín	TL-1407 F3	542509	2144491	pomez (gris-blanca)	Hipocristalina	Inequigranular	vesicular, fluidal	Minerales (2%): plg (0.5%), bt (0.5%), feld-k (0.5%), qz(0.3%), anf (0.1%) y ox (0.1%). Matriz (98%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales y microlitos de plg, feld-k, bt, anf y qz; de forma subhedral en su mayoría y pocos de forma anhedral como el qz. Las plg presentan bordes corroídos, maclado polisintético y carlsbad; en cambio los feld-k los encontramos con bordes corroídos, fracturados, con inclusiones de ox; las bt la encontramos de forma fibrosa con algunos bordes corroídos e inclusiones de óxido. Los qz se presentan bordes corroídos y fracturados; los ox en general se presentan como microlitos, como inclusiones y pocos en la matriz. La matriz, es vítrea fluidal y vesiculada, las vesículas son de forma elongadas con dirección al flujo y otras son subredondeadas.
Valentín	TL-1407 F4	542509	2144491	pomez (blanca)	Hipocristalina	Inequigranular	vesicular, fluidal	Minerales (2%): plg (0.8%), bt (0.7%), qz(0.5%). Matriz (98%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales de plg, bt, qz y anf; de forma subhedral euhedrales. Las plg presentan maclado polisintético, con inclusiones de bt, algunas son zonadas; en cambio la bt la biotita es fibrosa con inclusiones de ox. Los qz en su mayoría son microfenocristales, rara vez fenocristales, están fracturados. La matriz es vítrea fluidal y vesicular, las vesículas son redondeadas, pocas elongadas. También se presentan glomeroporfidos de plg.

Valentín	TL-1407 DC-Inf Iva	542509	2144491	Pomez (blanca)	Hipocristalina	Inequigranular	vesicular, fluidal o bien áfirica	Minerales (1%): plg (0.4%), bt (0.3%), qz(0.2%) y ox (0.1). Matriz (99%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales de plg, bt, qz y ox; de forma subhedral y poco euhedrales. Las plg presentan maclado polisintético y carlsbad; en cambio la bt presenta bordes corroído, con inclusiones e óxidos. Los qz en su mayoría son fenocristales, fracturados. Los óxidos los encontramos como microlitos con bordes corroídos. La matriz vítrea vesicular, las vesículas son elongadas en dirección al flujo y algunas son subredondeadas.
Valentín	TL-1408 F	542606	2144743	Pomez	Hipocristalina	Inequigranular	vesicular, fluidal	Minerales (3%): plg (1%), bt (1%), feldk (0.5%), qz(0.5%). Matriz (97%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales de plg, bt, qz y ox; de forma subhedral y poco euhedrales. Las plg presentan maclado polisintético y carlsbad; en cambio la bt presenta bordes corroído, con inclusiones e óxidos. Los qz en su mayoría son fenocristales, fracturados. Los óxidos los encontramos como microlitos con bordes corroídos. La matriz vítrea vesicular, las vesículas son elongadas en dirección al flujo y algunas son subredondeadas.
Valentín	TL-1410-1b	541989	2144499	Pomez	Hipocristalina	Inequigranular	vesicular, fluidal	Minerales (7%): plg (4%), bt (2%), qz(1%). Matriz (93%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales de plg, bt, qz; de forma subhedral. Las plg presentan maclado polisintético y carlsbad, algunas presentan zonamiento; en cambio la bt presenta bordes corroído, fibrosa, también se presenta como microlitos. Los qz en su mayoría son fenocristales, fracturados. La matriz vítrea vesicular, las vesículas son elongadas en dirección al flujo y algunas son subredondeadas. También se presentan glomero porfidos de plg.
Valentín	TL-1410-3	541989	2144499	Pomez	Hipocristalina	Inequigranular	vesicular, fluidal	Minerales (7%): plg (3%), bt (2%), qz(1.5%)anf (0.5%). Matriz (93%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales y microlitos de plg, bt, qz; de forma subhedral. Las plg presentan maclado polisintético, con bordes corroídos, algunas presentan zonamiento; en cambio la bt presenta bordes corroído, fibrosa; los anf presentan bordes corroídos. Los qz en su mayoría son fenocristales, fracturados. La matriz vítrea, poco vesicular y fluidal. También se presentan glomero porfidos de plg.
Valentín	TL 1410-5	541989	2144499	Pomez	Hipocristalina	Inequigranular	vesicular, fluidal	Minerales (3%): plg (1%), qz (0.8%), anf (0.7%) bt (0.5%). Matriz (97%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales y microlitos de plg, bt, qz; de forma subhedral. Las plg presentan maclado polisintético, con bordes corroídos, algunas presentan zonamiento; en cambio la bt presenta bordes corroído, fibrosa; los anf presentan bordes corroídos. Los qz en su mayoría son fenocristales, fracturados. La matriz vítrea, poco vesicular y fluidal. También se presentan glomero porfidos de plg.

Valentín	TL-1410-7	541989	2144499	Pomez	Hipocristalina	Inequigranular	fluidal poco vesicular	Minerales (4%): plg (0.9%), bt (0.8%), qz (0.6%), feld-k (0.6%), anf (0.1%). Matriz (96%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales y microlitos de plg, bt, qz, feld-k, anf; de forma subhedral. Las plg presentan maclado polisintético, con inclusiones de bt, algunas presentan zonamiento; en cambio la bt son fibrosa; los qz en su mayoría son fenocristales, fracturados; los feld-k, son de forma euhedral a subhedral; en cambio los anf se encuentran como microlitos con bordes corroídos. La matriz vítrea fluidal poco vesicular, densa. También se presentan glomeroporfidos de plg con inclusiones de bt.
Valentín	TL-1410-9	541989	2144499	Pomez	Hipocristalina	Inequigranular	fluidal, vesicular	Minerales (6%): plg (3%), bt (2.5%), qz (1%), ox (0.5%). Matriz (96%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales y microlitos de plg, bt, qz, ox; de forma subhedral. Las plg presentan maclado polisintético, con bordes corroídos, fracturados y algunas con textura de tamiz; en cambio la bt son fibrosa con inclusiones de óxidos; los qz en su mayoría son fenocristales con inclusiones de bt y plg; por último los ox los encontramos como microlitos y pocos microfenocristales. La matriz vítrea fluidal vesiculada, las vesículas elongadas en dirección al flujo.
Valentín	TL-1412	539024	2145326	Pomez	Hipocristalina	Inequigranular	fluidal, vesicular	Minerales (2%): plg (0.8%), bt (0.5%), qz (0.4%), feld-k (0.3%). Matriz (98%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales de plg, bt, qz, feld-k; de forma subhedral. Las plg presentan maclado polisintético, algunas presentan zonamiento; en cambio la bt son fibrosas con bordes corroídos; los qz en su mayoría son fenocristales con bordes corroídos y fracturados; por último los feld-k presentan bordes corroídos. La matriz vítrea fluidal vesiculada, las vesículas elongadas en dirección al flujo.
Valentín	TL-1413-1c	549945	2144345	pomez (blanca)	Hipocristalina	Inequigranular	fluidal, vesicular, áfirica	Minerales (0.5%): plg (0.2%), bt (0.15%), qz (0.15%). Matriz (99.5%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales de plg, bt, qz; de forma subhedral. Las plg, presentan maclado polisintético; en cambio la bt es fibrosa; los qz en su mayoría son fenocristales, fracturados. La matriz vítrea fluidal vesiculada, las vesículas elongadas en dirección al flujo y poco redondeadas.
Valentín	TL-1413-2	549945	2144345	pomez (blanca)	Hipocristalina	Inequigranular	fluidal, vesicular, áfirica	Minerales (4%): plg (2%), bt (1.5%), qz (0.5%). Matriz (96%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales de plg, bt, qz; de forma subhedral. Las plg, presentan maclado polisintético, algunas con bordes corroídos, también esta como microlitos en la matriz; en cambio la bt es fibrosa; los qz en su mayoría son fenocristales, con bordes corroídos. La matriz vítrea fluidal vesiculada, las vesículas elongadas en dirección al flujo, se caracteriza por tener una textura áfirica.

Valentín	TL1416	542508	2145168	Pomez	Hipocristalina	Inequigranular	fluidal, vesicular	Minerales (7%): plg (3%), bt (3%), qz (0.5%), feld-k (0.5%). Matriz (93%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales de plg, bt, qz, feld-k; de forma subhedral. Las plg, presentan maclado polisintético, algunas con bordes corroídos; en cambio la bt es fibrosa, con bordes e inclusiones de ox; los feld-k se encuentran como fenocristales fracturados; por último los qz en su mayoría son fenocristales, con bordes corroídos y fracturados. La matriz vítrea fluidal vesiculada, las vesículas elongadas en dirección al flujo; también se presentan glomeroporfidos de plg y bt.
Valentín	TL1568 F0	534652	2145168	Pomez	Hipocristalina	Inequigranular	fluidal, vesicular, porfídica	Minerales (7%): plg (3%), bt (3%), qz (0.5%), feld-k (0.5%). Matriz (93%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales de plg, bt, qz y cpx; de forma subhedral. Las plg, presentan maclado polisintético, fracturados con bordes corroídos y algunas con textura de tamiz e inclusiones de px; en cambio la bt es fibrosa, con inclusiones de óxidos, algunas presentan coronas de reacción de px; los qz en su mayoría son fenocristales, fracturado y corroídos; los cpx los encontramos como microlitos y poco fenocristales de forma euhedral a subhedral. La matriz vítrea fluidal vesiculada, las vesículas son subredondeadas. También se presentan glomeroporfidos de cpx.
Valentín	TL1568 1B Caída	534652	2145168	Pomez	Hipocristalina	Inequigranular	fluidal, vesicular	Minerales (5%): plg (3%), bt (1.5%), qz (0.5%). Matriz (95%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales de plg, bt, qz; de forma subhedral. Las plg, presentan maclado polisintético, con bordes corroídos, algunas presentan textura de tamiz; en cambio la bt es fibrosa con bordes corroídos; los qz en su mayoría son fenocristales, con bordes corroídos. La matriz vítrea fluidal vesiculada, las vesículas elongadas en dirección al flujo y poco redondeadas.
Valentín	TL1568 F1	534652	2145168	Pomez	Hipocristalina	Inequigranular	fluidal, vesicular, porfídica	Minerales (7%): plg (3.5%), qz (1.5%), bt (1.5%), ox (1%). Matriz (93%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales de plg, bt, qz y poco microlitos; de forma subhedral. Las plg, presentan maclado polisintético, con bordes corroídos, algunas presentan textura de tamiz; en cambio la bt es fibrosa la encontramos como microfenocristal y microlitos; los qz en su mayoría son fenocristales, con bordes corroídos; los óxidos lo encontramos como microlitos. La matriz vítrea fluidal vesiculada, las vesículas elongadas en dirección al flujo. También presenta glomeroporfidos de plg con inclusiones de óxidos.
Valentín	TL1568 2A caída	534652	2145168	Pomez	Hipocristalina	Inequigranular	fluidal, vesicular, porfídica	Minerales (5%): plg (2%), qz (1%), bt (1%), feld-k (0.5%), ox (1%). Matriz (95%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales de plg, bt, qz, feld-k y poco microlitos ox; de forma subhedral. Las plg, presentan maclado polisintético, con bordes corroídos con inclusiones de bt y ox; en cambio la bt es fibrosa la encontramos como fenocristales y microlitos con bordes corroídos; los qz en su mayoría son fenocristales, con bordes corroídos y fracturados; los feld-k son de forma subhedral fracturados; los ox lo encontramos como microlitos. La matriz vítrea fluidal vesiculada, las vesículas son subredondeadas.

Valentín	TL1568 1E caída	534652	2145168	Pómez	Hipocristalina	Inequigranular	fluidal, vesicular	Minerales (3%): plg (15%), bt (1%), qz (0.5%). Matriz (97%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales de plg, bt, qz y poco microlitos; de forma subhedral. Las plg, presentan maclado polisintético, con bordes corroídos con inclusiones de bt y ox, algunas son zonadas; en cambio la bt es fibrosa la entramos en todos sus tamaños; los qz en su mayoría son fenocristales, con bordes corroídos y fracturados. La matriz vítrea fluidal vesiculada, las vesículas son elongadas en dirección al flujo. También presenta glomero porfidos de plg y bt.
Valentín	TL1568 F2	534652	2145168	Pómez	Hipocristalina	Inequigranular	fluidal, vesicular	Minerales (7%): plg (3%), bt (2%), qz (15%) y ox (0.5%). Matriz (93%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales de plg, bt, qz y poco microlitos de ox; de forma subhedral. Las plg, presentan maclado polisintético, con textura de tamiz, algunas son zonadas; en cambio la bt es fibrosa con bordes corroídos, algunas presentan inclusiones de ox y plg; los qz en su mayoría son fenocristales, con bordes corroídos y fracturados; los ox los encontramos como microlitos y pocos microfenocristales, con bordes corroídos. La matriz vítrea fluidal vesiculada, las vesículas son elongadas en dirección al flujo. También presenta glomero porfidos de plg.
Valentín	TL1576 F2	537188	217785	Pómez	Hipocristalina	Inequigranular	fluidal, vesicular	Minerales (1%): plg (0.6%), bt (0.3%), qz (0.1%). Matriz (99%): Matriz vítrea vesiculada.	Se observan fenocristales, microfenocristales de plg, bt, qz y poco microlitos; de forma subhedral. Las plg, presentan maclado polisintético, con bordes corroídos; en cambio la bt es fibrosa la encontramos de todo los tamaños; los qz en su mayoría son fenocristales, con bordes corroídos. La matriz vítrea fluidal vesiculada, las vesículas son elongadas en dirección al flujo.