



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**CARACTERIZACIÓN DE LAS CENIZAS VOLCÁNICAS
DEL POPOCATEPETL EMITIDAS DURANTE 2016 - 2018**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
P R E S E N T A:**

GONZÁLEZ HERNÁNDEZ SANDRA KARINA



**DIRECTOR DE TESIS:
DRA. MARTIN DEL POZZO ANA LILLIAN**

Ciudad Universitaria, CD. MX. 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos.

A los proyectos SECITI/052/2016 y SECTEI/264/2019 por el apoyo ya que fue fundamental para la realización de este trabajo.

A mis padres y hermano por apoyarme siempre.

A la doctora Ana Lillian por todo el apoyo académico, así como en los momentos complicados.

A mis compañeros Fernando Tapia, Mario Díaz y Alberto Paz, por su apoyo en la colecta de las muestras de cenizas; así como a todas las personas que apoyaron en este proyecto.

A mis sinodales Dr. Robin Campion, Dra. Lizeth Caballero, Dra. Mariana Jácome y a la Dra. Margarita Reyes por sus valiosas observaciones y comentarios.

Al Dr. Robin Campion por proporcionarnos el balístico analizado en esta tesis.

Al Ing. Carlos Linares López y al Quím. Rufino Lozano, y a los laboratorios correspondientes: Laboratorio Universitario de Petrología y el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X LANGEM.

Contenido

Resumen	4
1 Introducción	5
2 Objetivos.....	6
3 Monitoreo de las Cenizas Volcánicas	7
3.1 Características de las cenizas volcánicas	8
3.1.1 Componentes	9
3.1.2 Morfología.....	10
3.1.3 Granulometría.....	12
3.1.4 Geoquímica	13
3.1.5 Dispersión y Caída de Cenizas.....	13
4 Área de Estudio	14
4.1 Cenizas volcánicas del Popocatepetl previas a 2016.	15
5 Metodología.....	16
5.1 Muestreo y Selección de Cenizas	17
5.2 Granulometría	19
5.3 Microscopía.....	19
5.4 Correlación con la Actividad Volcánica	22
6 Resultados.....	22
6.1 Granulometría	22
6.2 Tipo y Forma de los Componentes	27
6.3 Abundancia de los Componentes	32
6.4 Química Mineral	37
6.5 Actividad volcánica.....	41
7 Discusión. Relación Entre Parámetros.	46
8 Conclusiones	54
9 Referencias.....	56

Resumen

El objetivo de este trabajo fue conocer las características de las cenizas volcánicas del Popocatepetl emitidas en el periodo de 2016 - 2018. Fueron determinados los componentes de las cenizas (forma, tamaño y abundancia), la composición química total y de los principales minerales, así como la distribución de tamaño. Las muestras estudiadas forman parte de la colección de cenizas obtenidas de la Red de Monitoreo de Cenizas del Popocatepetl.

Los componentes principales de las cenizas son los líticos vítreos oscuros angulosos, partículas de vidrio volcánico claro, cristales de plagioclasa (andesina y labradorita) de diferentes generaciones con tamaños de ~0.032 a 0.4 mm y cristales de piroxeno rotos (augita y enstatita) con tamaños de ~0.032 a 0.6 mm. Las cenizas tienen líticos accidentales de colores grisáceos a rojizos, tienen forma de bloque con algunas caras angulosas. También fue posible identificar componentes como escorias de color gris claro con vesículas circulares a ligeramente ovaladas (18 de abril de 2016), olivinos (18 de abril de 2016), cristobalita (27 de septiembre 2017 y 31 de julio de 2018).

Las cenizas del volcán tienen una composición andesítica rica en sílice (58.65 – 61.38% SiO₂). La fracción fina (5Φ), con mayor contenido de materiales claros, es de composición dacítica (63.16% SiO₂).

Las cenizas asociadas a emisiones constantes (tren de exhalaciones) presentan mayor número de partículas pequeñas (<0.062 mm) y contienen más cristales de plagioclasas y partículas de vidrio claro. Estas cenizas han sido emitidas durante periodos importantes de tremor armónico.

Durante 2016 – 2018, se formaron y destruyeron 19 domos de lava. En las explosiones, las cenizas tienden a tener tamaños de grano grandes (>0.063 mm) y mayor abundancia de líticos vítreos del domo, lo que se relaciona con los eventos de destrucción total o parcial de los domos.

1 Introducción

El volcán Popocatepetl (5452 msnm) es un estratovolcán que reinició su actividad en diciembre de 1994 y, a partir de 1996, se ha caracterizado por la formación y destrucción de domos de lava. El volcán pertenece a la Faja Volcánica Transmexicana y se sitúa entre los Estados de México, Puebla y Morelos (Martin del Pozzo et al., 2008, Fig. 1).

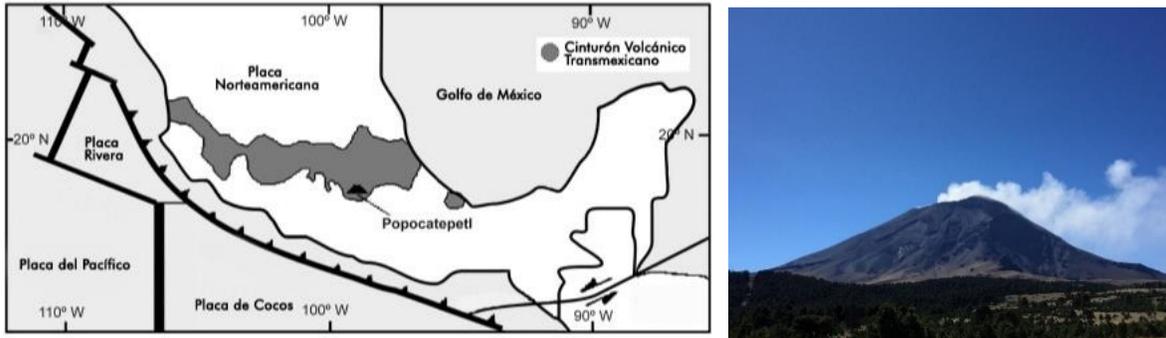


Fig. 1. Mapa de localización del volcán Popocatepetl (izquierda, mod. Martin Del Pozzo et al., 2008) y fotografía del norte hacia el volcán (derecha).

Actualmente el Popocatepetl presenta emisiones de cenizas y gases que afectan a las poblaciones principalmente dentro de un radio de 60 km del volcán (Nieto Torres y Martin Del Pozzo, 2021). En este radio se encuentra la Ciudad de México donde habitan 9.2 millones de personas y la Ciudad de Puebla a ~ 42 km con 1.6 millones de habitantes, además de numerosos pueblos y asentamientos pequeños de los estados de México, Puebla, Morelos y Tlaxcala (INEGI, 2020).

Las cenizas volcánicas son partículas con tamaños menores a 2 mm formadas por fragmentos de roca, cristales y vidrio, y son un producto común en las erupciones volcánicas explosivas. Entre las características más importantes de las cenizas se encuentra el tamaño de grano, el tipo y la abundancia de componentes que la conforman (líticos, cristales y vidrio), su composición química mineral, forma y tamaño (Heiken y Wohletz, 1985; Gaunt et al., 2016).

Conocer las características de las cenizas nos permite entender los procesos físicos que tienen lugar en los volcanes como son la formación y destrucción de domos, el grado de fragmentación, el origen del magma y la dinámica de distribución de las cenizas en la atmosfera (Heiken y Wohletz, 1985). Por tal motivo, se llevó a cabo la caracterización de las cenizas del Popocatepetl emitidas en el periodo de 2016-2018.

La red de monitoreo de cenizas del volcán Popocatepetl fue instalada en 1994 y se mantiene operando hasta la fecha por el grupo de trabajo de la Dra. Ana Lillian Martin Del Pozzo, investigadora del Instituto de Geofísica, UNAM. Esta red consta de más de 200 captadores de cenizas que varían entre automáticos (con la capacidad

de mantener muestra seca y húmeda por separado), y no automáticos (Martin Del Pozzo et al., 2008; Nieto y Martin Del Pozzo, 2021).

La red tiene estaciones cercanas proximales sobre el edificio volcánico y distales hasta 100 km del volcán (Fig. 2). Las cenizas colectadas en estos equipos son muestreadas y analizadas (textura, componentes, geoquímica, lixiviados y petrogénesis).

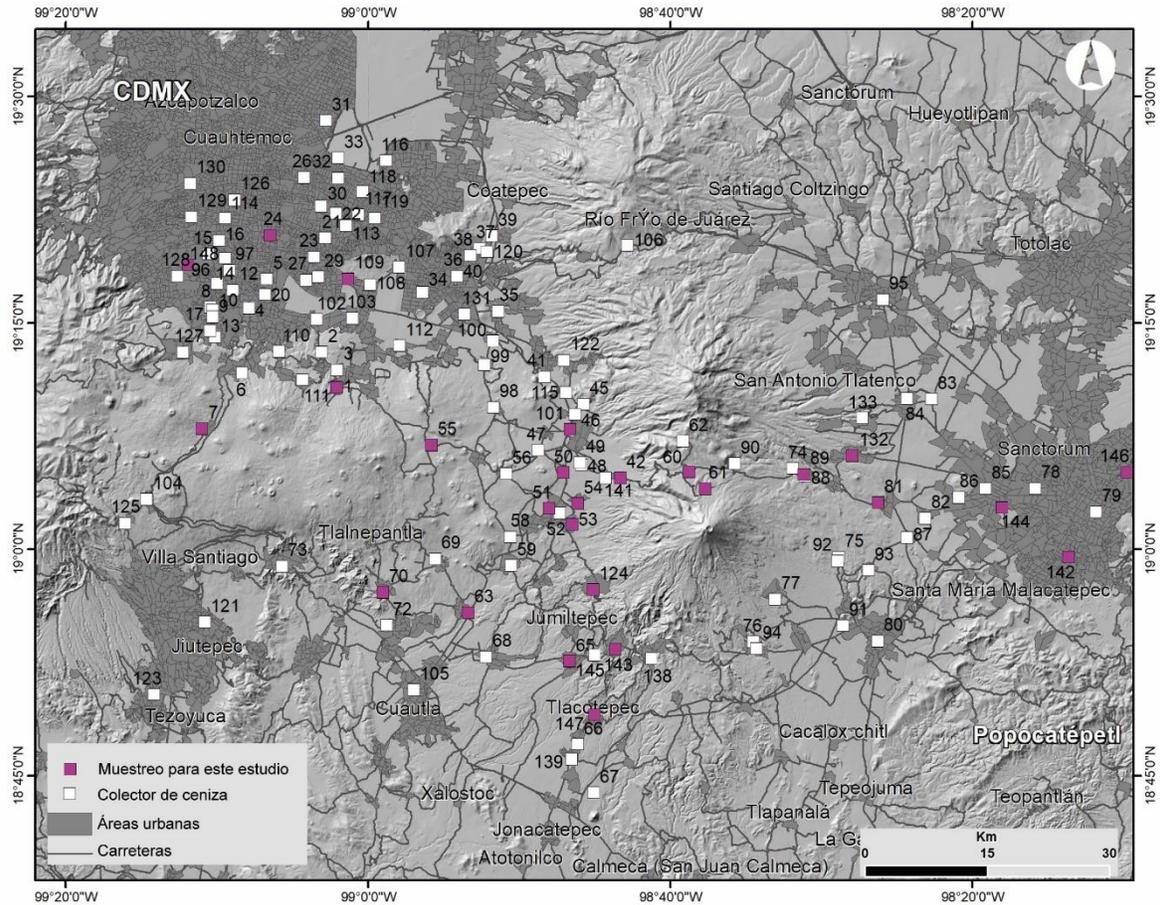


Fig. 2. Red de monitoreo de cenizas volcánicas del Popocatepetl. Sitios de recolección de las cenizas estudiadas en este trabajo.

2 Objetivos

- Caracterización macroscópica y microscópica de las cenizas volcánicas emitidas por el volcán Popocatepetl de 2016 - 2018.
- Determinación de la variación en los componentes de las cenizas volcánicas en el periodo del 2016 – 2018.
- Identificación de los procesos asociados a las emisiones de ceniza más representativas del periodo 2016 – 2018.

3 Monitoreo de las Cenizas Volcánicas

El monitoreo de los volcanes ha permitido identificar cambios en su comportamiento previos a su reactivación y cambios en su estilo eruptivo (Cashman y Hoblitt, 2004, Martin Del Pozzo, 2012, Miwa et al., 2013, Paredes et al., 2019).

El monitoreo de las cenizas volcánicas forma parte del monitoreo multiparámetros (señales vulcanomagnéticas, muestreo y análisis de manantiales y su correlación con la sismicidad) que se lleva a cabo para evaluar la actividad volcánica en el Popocatepetl y otros volcanes (Martin Del Pozzo et al., 2002, 2003, 2008).

La caracterización de las cenizas se ha vinculado con otros parámetros de monitoreo en varios volcanes como Sakurojima (Wina et al., 2009), Copahue (Hantusch et al., 2021) y Cotopaxi (Gaunt et al., 2016).

En el volcán Sakurojima se han realizado diversos estudios que involucran las características de las cenizas volcánicas y su relación con la sismicidad y su origen (Miwa, et al., 2009), y su dispersión con relación a los gases volcánicos (Poulidis, et al., 2018). Las cenizas del volcán Copahue, han sido estudiadas por análisis de lixiviados y su relación con los gases volcánicos (Paez et al., 2021), sus componentes, elementos dañinos a la salud (Gómez, et al., 2002; Smichowski et al., 2003) y su origen (Hantusch et al., 2021). En el volcán Cotopaxi se han relacionado las cenizas con la actividad sísmica (Gaunt et al., 2016).

Un ejemplo importante que ha permitido conocer el monitoreo constante de las cenizas en los diversos volcanes, es la variación de sus componentes en sus diferentes fases eruptivas. Durante la reactivación de la actividad volcánica, generalmente no se presentan componentes juveniles. Conforme la actividad eruptiva continua, las cenizas tienden a enriquecerse de material juvenil (Cashman y Hoblitt, 2004; Martin Del Pozzo et al., 2008; Gaunt et al., 2016).

El estudio de las cenizas volcánicas es importante para conocer los procesos magmáticos que ocurren dentro de un sistema volcánico y también por qué implican un riesgo para la salud de la población debido al tamaño de sus partículas, sus componentes y la forma (Horwell y Baxter, 2006; Horwell, 2007; Nieto y Martin Del Pozzo, 2021; Rojas et al., 2001), pueden contaminar los cuerpos de agua circundantes (Cronin et al., 2014; Armienta et al., 1998) y afectar la aviación y las vías de comunicación (Langmann et al., 2012; Rodríguez, 2004).

3.1 Características de las cenizas volcánicas

Una erupción volcánica explosiva expulsa material piroclástico que se forma por la fragmentación del magma. Este proceso depende de la composición, temperatura y contenido de volátiles inmersos en el magma, lo que a su vez controla la viscosidad, la tensión superficial y la tasa de descompresión del magma. Los piroclastos se clasifican de acuerdo con su tamaño: se les denomina bomba o bloque cuando tienen un tamaño mayor a 64 mm, lapilli si miden entre 2 a 64 mm y cenizas volcánicas si su diámetro es menor a 2 mm (Tabla 1) (Schmid, 1981; Heiken y Wohletz, 1985). La ceniza se considera de grano grueso cuando su diámetro se encuentra entre 2 a 1/16 mm (62.5 μm), y de grano fino cuando sus dimensiones son menores a 62.5 μm (Fisher, 1961).

Tabla 1. Clasificación de tamaño de partículas en material volcánico (Modificado de Schmid, 1981).

Tamaño de grano	Piroclasto	Depósito piroclástico	
		Sin consolidar: tefra	Consolidado: rocas piroclásticas
64 mm	Bomba, bloque	Aglomerado	Aglomerado, brecha piroclástica
	Lapilli	Capa, cama de lapilli (Lapilli tefra)	Lapillistone
2 mm	Ceniza grueso	Ceniza gruesa	Toba gruesa
	Ceniza fina	Ceniza fina	Toba fina

El comportamiento de la fase gaseosa de un magma determina en gran parte si este material sale a la superficie en forma de lava (si el gas escapa durante el ascenso), o de forma explosiva (los gases no logran escaparse fácilmente y ocurre la fragmentación y producción de material piroclástico). En el caso de que los gases llegaran a escapar antes de que el material ascienda, este podría formar un cuerpo intrusivo o un domo (Cashman y Scheu, 2015).

La fragmentación del magma es un punto clave en las erupciones magmáticas y en la formación de las cenizas volcánicas. La fragmentación es el proceso a través del cual un magma pasa de una fase líquida continua con gases dispersos, que puede o no contener cristales, a una fase gaseosa con fragmentos piroclásticos dispersos (Cashman y Scheu, 2015; Heiken y Wonletz, 1985).

Cuando la fragmentación magmática ocurre por un ascenso rápido del magma, se relaciona con erupciones de tipo hawaiana y pliniana, por otro lado, cuando la fragmentación se da por una descompresión rápida, se asocia con el colapso del edificio volcánico o de un domo de lava (Cashman y Scheu, 2015).

De acuerdo con los tipos de erupciones volcánicas, existen tres tipos de mecanismos básicos para la formación de las cenizas: erupciones magmáticas, freatomagmáticas y fréaticas (Heiken y Wohletz, 1985).

En las erupciones magmáticas los gases son liberados debido a la descompresión del magma conforme asciende a la superficie y pueden formar vesículas. (Zimanowski et al., 2015).

Las erupciones freatomagmáticas tienen lugar cuando hay enfriamiento y fragmentación explosiva del magma al estar en contacto con agua subterránea, agua superficial, hielo o nieve.

Las fréaticas ocurren cuando hay trituración y expulsión de partículas desde las paredes o del cráter durante erupciones de vapor o agua caliente.

La caracterización de las cenizas proporciona una muestra del sistema volcánico interno y su estudio continuo nos puede brindar información sobre los procesos que generan la actividad eruptiva (Nurfiani y Bouvet de Maisonneuve, 2018). La caracterización de las cenizas incluye la granulometría, clasificación de sus componentes, composición química, morfología de los granos, cristalinidad y vesicularidad de las partículas.

3.1.1 Componentes

Las características petrológicas, mineralógicas y texturales, y sus variaciones pueden proporcionar información sobre la naturaleza de las explosiones, sus propiedades de origen, el tiempo de formación desde el reservorio de magma hasta la superficie y la velocidad a la que el magma asciende (Gaunt et al., 2016).

Cook (1965) estableció una clasificación para los materiales piroclásticos la cual consiste en un triángulo equilátero donde se representa el porcentaje de los componentes de líticos, cristales y vidrio (Fig. 3).

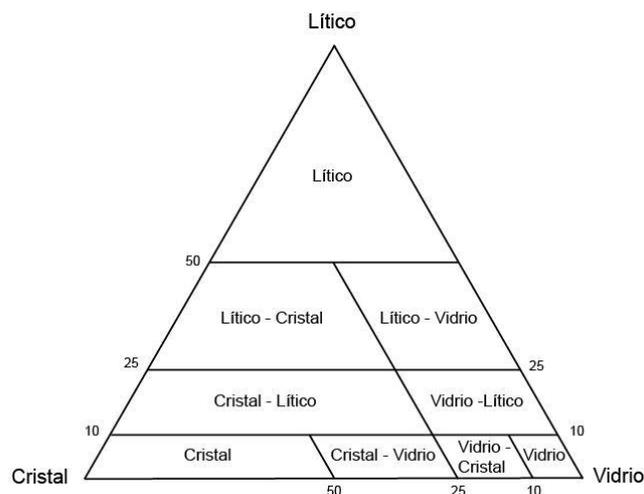


Fig. 3. Clasificación piroclástica de Cook (modificado de Heiken & Wohletz, 1985).

Los piroclastos del volcán Popocatepetl son de composición andesítica rica en sílice a dacítica (58 - 65% de SiO₂) (Straub y Martin del Pozzo, 2001; Arana et al., 2010; Sosa-Ceballos et al., 2012).

En las cenizas de composición andesítica y dacítica se pueden encontrar los siguientes componentes: fragmentos líticos, cristales, vidrio volcánico, partículas hidrotermales o alteradas, y sublimados (Heiken y Wohletz, 1985; Gaunt et al., 2016; Martin Del Pozzo et al., 1995, 2008; Straub y Martin Del Pozzo, 2001; Martin Del Pozzo y Mendiola, 2002). Estos componentes pueden ser material juvenil (formado recientemente) o antiguo (formado en eventos pasados).

Gaunt et al., (2016) describe a los fragmentos líticos como partículas generalmente de color gris, opacos, sin aparente alteración y con forma de bloque a irregular. Estas partículas contienen cristales y carecen de la presencia de vidrio volcánico.

Los líticos vítreos son generalmente material juvenil de color gris oscuro a negro con lustre vítreo, tienen forma de bloque, pueden presentar poca vesicularidad y no muestran alteración. Están constituidos por vidrio y cristales de diferentes tamaños (Heiken y Wohletz, 1985; Gaunt et al., 2016; Martin Del Pozzo et al., 2008). El material juvenil puede ser difícil de identificar cuando las rocas más antiguas del edificio volcánico son similares en composición o cuando los fragmentos juveniles son muy cristalinos, por lo que, las cenizas altamente cristalinas y ricas en microlitos son consideradas como juveniles (Watanabe et al., 1999; Gaunt et al., 2016).

Los cristales en las cenizas pueden encontrarse completos o rotos. Su forma y el tamaño de los cristales están determinada por los procesos de descompresión, desgasificación, enfriamiento y por los patrones de fractura de los minerales (Heiken y Wohletz, 1985; Gaunt et al., 2016). Entre más rápido se enfrió un magma, la nucleación de cristales domina sobre el crecimiento y como resultado se generan muchos cristales de tamaños pequeños (Gaunt et al., 2016).

El vidrio volcánico suele ser de color claro a oscuro. Su color está asociado a la composición del magma, entre más máfico o basáltico, más oscuro será. Sin embargo, hay un vidrio claro y uno oscuro que tienen la misma composición en el Popocatepetl (Martin Del Pozzo, 2008, Heiken y Wohletz, 1985). El vidrio puede ser homogéneo o heterogéneo cuando ocurre una mezcla de magmas (Heiken y Wohletz, 1985).

Las partículas alteradas o hidrotermales presentan una superficie alterada y con cierto grado de oxidación. Estas partículas tienen colores blanco y rojo, y lustre metálico. Las partículas pueden tener en su superficie o en sus vesículas minerales secundarios (Gaunt et al., 2016).

3.1.2 Morfología

La forma de las partículas volcánicas refleja numerosos parámetros eruptivos como la viscosidad del magma, el contenido de volátiles, el grado de interacción con el

agua externa, el transporte de partículas y la sedimentación (Nurfiani y Bouvet de Maisonneuve, 2018).

La forma y la textura de las partículas volcánicas varía de subesféricas no vesiculares hasta altamente vesiculares e irregulares (Folch et al., 2009). Shoji et al. (2018) clasificó la forma de las cenizas en cuatro categorías típicas: bloque, vesicular, alargada y redondeada (Fig. 4).

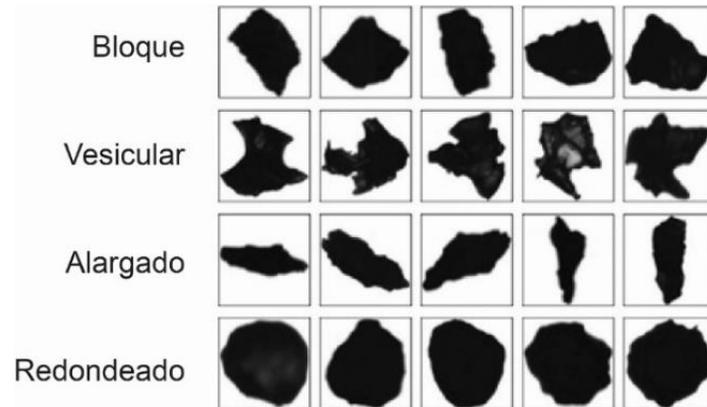


Fig. 4. Forma de los componentes de ceniza (modificado de Shoji et al., 2018).

Las partículas con forma de bloque y vesicular se asocian a la fragmentación y enfriamiento el magma. La forma alargada y redondeada se relacionan con la deformación dúctil de un material fragmentado.

Las cenizas en forma de bloque son casi rectangulares. Sus bordes forman ángulos de casi 90°. Se forman por la fragmentación frágil del magma en el conducto volcánico (Shoji et al., 2018).

Las cenizas vesiculares tienen forma cóncava e irregular. Se forman al romperse el magma vesiculado en el conducto durante una explosión (Shoji et al., 2018).

La forma alargada incluye a las cenizas largas y delgadas que se forman debido al estiramiento de un magma con viscosidad baja que le permite deformarse (Shoji et al., 2018).

Las partículas redondeadas tienen forma esférica causada por la tensión superficial dentro de una gota de fluido antes de enfriarse (Shoji et al., 2018).

Una partícula es a menudo una mezcla de más de dos formas, ya que las cenizas volcánicas se generan por múltiples procesos durante la fragmentación del magma y el transporte de los piroclastos.

Dentro de las partículas de cenizas, pueden observarse diferentes tipos de vesículas (Fig. 5)

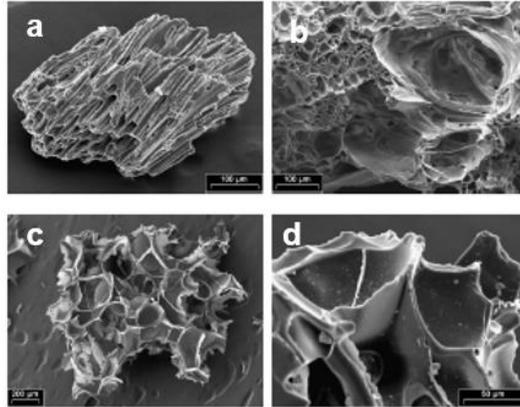


Fig. 5. Forma de fragmentos de pómez: (a) vesículas tubulares (b) sección trasversal de las vesículas tubulares; (c) y (d) vesículas esféricas o burbujas separadas por zonas de vidrio (Modificado de Daga et al., 2006).

3.1.3 Granulometría

La distribución del tamaño de grano de los depósitos de caída es un parámetro eruptivo crucial para inferir la fragmentación y el estilo eruptivo al vincular el tamaño de partícula al contenido inicial de gas y los procesos de interacción agua-magma, entre otras cosas (Bonadonna y Houghten, 2005)

La distribución del tamaño de partículas de los materiales piroclásticos es producto de la eficacia de la fragmentación primaria hasta su transporte. La fragmentación primaria genera una distribución de tamaño inicial, la cual puede experimentar una mayor reducción de tamaño a través de procesos secundarios que actúan sobre las partículas grandes durante la colisión o abrasión de clastos frágiles dentro del conducto o fuera de él (Cashman y Scheu, 2015; Paredes-Mariño et al., 2019).

La fragmentación secundaria puede observarse en los experimentos con piroclastos del Monte Santa Helena, donde estos tienen formas angulares, mientras que en la lejanía son redondeados, indicando así una pérdida de material durante su transporte (Dufek y Magna, 2008), e incluso en el laboratorio donde el tamizado mecánico puede romper los fragmentos (Bustillos et al., 2018).

Los depósitos de caída comprenden partículas de diferentes materiales, en su mayoría de fragmentos juveniles y líticos.

El tamaño de los cristales está determinado por las condiciones de crecimiento en el magma y se modifica poco por la posterior ruptura. Los cristales de diferentes minerales pueden tener distribuciones de tamaño muy diferentes dentro del mismo magma (Walker, 1971). Al ocurrir un enfriamiento relativamente rápido, descompresión y/o pérdida de H₂O, los cristales de nucleación dominan sobre el crecimiento del resto y resultan en numerosos cristales de tamaño pequeño (Gaunt et al., 2016).

Las obstrucciones en el conducto volcánico pueden causar una reducción en el diámetro promedio de los clastos individuales e incrementar la generación de ceniza fina ($>63\ \mu\text{m}$) (Paredes-Mariño et al., 2019).

Después de una explosión, los fragmentos se asientan a través del aire y se clasifican de acuerdo con sus velocidades de caída. La velocidad de caída a su vez depende principalmente del tamaño y densidad del fragmento, de la forma y rugosidad de su superficie (Walker, 1971).

Los depósitos de caída de ceniza pueden verse afectados por la deposición de múltiples emisiones de ceniza que ocurren al mismo tiempo o por la agregación de partículas (Bustillos et al., 2018).

El tamaño de las partículas en la vulcanología física se caracteriza regularmente por medio del tamizado mecánico, análisis de difracción laser y/o análisis dinámico de imagen (DIA). Estos permiten una rápida descripción de una dimensión de la forma: longitud, media de las partículas, diámetro equivalente de una esfera y longitud promedio. El tamizado mecánico se realiza comúnmente a partículas $>63\ \mu\text{m}$, mientras que la difracción laser y DIA entre 0.1 y $30\ \mu\text{m}$ (Cashman y Rust, 2016).

3.1.4 Geoquímica

La geoquímica de las cenizas volcánicas es una herramienta importante para estudiar diferentes procesos asociados con erupciones volcánicas. Los análisis químicos de las rocas se expresan en porcentaje en peso de óxidos para los elementos mayores como el Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K y P, mientras que los elementos traza se expresan en parte por millón (ppm) (Cox et al., 1979).

El diagrama de Total Alkali Silica (TAS) se emplea en la identificación de rocas volcánicas de material fino, con alto contenido en vidrio o que no puede ser determinado su contenido mineral por lo que se emplean análisis químicos. Los valores de SiO_2 para una roca basáltica son $45 - 52\%$, basalto andesítico $52 - 57\%$, andesita de $57 - 63\%$ y dacita $>63\%$ (Le Maitre et al., 2002).

La composición geoquímica de los fragmentos de vidrio volcánico refleja la composición del material fundido en el momento de la erupción. (Daga et al., 2006).

3.1.5 Dispersión y Caída de Cenizas

Durante las erupciones explosivas, el material piroclástico y los gases ascienden a través de la atmosfera generando columnas eruptivas. El proceso principal que controla este ascenso es la incorporación del aire circundante a la columna eruptiva, generando corrientes de convección por el contraste de densidad (Woodhouse et al., 2013). Cuando la densidad de la columna eruptiva es igual a la de su entorno, esta alcanza el nivel de flotabilidad neutra, donde el material piroclástico comenzara a dispersarse de manera lateral (Carey y Bursik, 2015; Woodhouse et al., 2013).

Estas columnas pueden tener una forma vertical (fuerte) o inclinada (débil). La columna eruptiva inclinada se forma en eventos explosivos débiles y está asociada

a depósitos estrechos y alargados en función de la dirección del viento. Por otro lado, las columnas verticales generan depósitos alargados y anchos (Bonadonna et al., 2015).

Las columnas eruptivas se diluyen conforme se alejan de la fuente ya que las partículas comienzan a dispersarse a través de la atmosfera, pasando a un régimen de transporte pasivo dominando por las condiciones atmosféricas (Bonadonna et al., 2015).

El tamaño de las partículas juega un papel fundamental en su dispersión. Las partículas más grandes y densas caen cerca de la fuente. Mientras que las partículas más pequeñas ascienden en la columna eruptiva y su deposición estará influenciada por los vientos y la velocidad de sedimentación. Las partículas entre centímetros y milímetros permanecen en la atmósfera por minutos a un par de horas, por lo que se depositan a unos kilómetros de la fuente. Las partículas más finas, del orden de micrómetros y más pequeñas, pueden permanecer en la atmosfera por días e incluso meses alcanzando una distancia de dispersión mayor (Folch et al., 2009; Folch, 2012).

4 Área de Estudio

El volcán Popocatepetl es un estratovolcán formado por numerosos flujos de lava andesíticos y dacíticos interestratificados con material piroclástico de erupciones plinianas, sobre los vestigios de los edificios volcánicos previos de Nexpayantla y Ventorrillo. El ultimo cambio geomorfológico que ha sufrido el volcán ocurrió durante la erupción de la ceniza negra, donde el volcán quedó cubierto casi en su totalidad por una capa de varios metros de espesor de lapilli y ceniza de color gris oscuro, llamada Ceniza negra (Espinasa y Martin Del Pozzo, 2006).

El actual periodo de actividad del Popocatepetl comenzó el día 21 de diciembre de 1994 con emisiones de ceniza que continúan hasta el presente (Martin Del Pozzo et al., 1995; 2002b; 2008). A partir de entonces se han registrado diversos eventos eruptivos importantes que han generado grandes emisiones de ceniza que han afectado a los Estados de México, Puebla, Morelos y Ciudad de México principalmente.

La actividad volcánica en el Popocatepetl comenzó con una fase freatomagmática que generó la emisión de cenizas volcánicas y balísticos, debido a esto, la población en riesgo fue evacuada por un tiempo. Al observarse una disminución en la actividad volcánica la población regresó a sus hogares (Martin Del Pozzo et al., 1995). Esta baja en la actividad se mantuvo hasta marzo de 1996, donde la actividad eruptiva aumentó asociada a la formación del primer domo de lava (Martin Del Pozzo et al., 2002).

Entre los eventos más importantes del volcán destacan las erupciones de marzo 1996 y 30 de junio de 1997 que provocaron la caída de ceniza en la Ciudad de México y amplias zonas del sureste de Puebla, así como la suspensión de las

actividades del aeropuerto de la Ciudad de México (Martin Del Pozzo et al., 2008; Valdés et al., 2002).

El 23 de mayo y 3 de octubre del 2000, cayó ceniza en algunas poblaciones del Estado de México y Puebla por explosiones que generaron columnas eruptivas de 6 km de altura (Miranda et al., 2008). El incremento en la actividad volcánica del Popocatepetl en diciembre del 2000 hizo que más de 40,000 personas fueran evacuadas (Martin Del Pozzo et al., 2003).

El 22 de enero de 2001, ocurrió una erupción con un VEI 3-4 que produjo una columna eruptiva de 18 km de altura. La ceniza de esta explosión se dispersó hasta el Golfo de México (Martin Del Pozzo et al., 2003).

El 29 de abril de 2003, ocurrió un cambio en el semáforo de Alerta Volcánica, pasando a Amarillo Fase 3. El 19 de julio de 2003 se produjo una erupción que generó la caída de ceniza en el Sur de la Ciudad de México, haciendo que las actividades del Aeropuerto Internacional Benito Juárez fueran suspendidas (Rodríguez, 2004).

En 2004, 2006, 2012 y 2013 el Semáforo de Alerta Volcánica cambio entre Amarillo fase 1, fase 2 y fase 3 atendiendo a las incrementos o disminución en la actividad volcánica. Durante este periodo (2004-2013) se produjeron diversas erupciones con columnas eruptivas de hasta 5 km de altura. Entre los años 2014 y 2015, las columnas eruptivas alcanzaron hasta 3 km de altura (Nieto y Martin Del Pozzo, 2017).

4.1 Cenizas volcánicas del Popocatepetl previas a 2016.

El volcán ha presentado dos fases eruptivas: freatomagmática y magmática. La fase freatomagmática comprendió de diciembre de 1994 a principios de marzo de 1996, mientras que la fase magmática se ha mantenido desde entonces caracterizada por la formación de domos de lava (Martin Del Pozzo et al., 2008; Straub y Martin Del Pozzo, 2001).

En la fase freatomagmática las cenizas estaban constituidas principalmente de cristales de plagioclasa y piroxeno (20-50%), líticos andesíticos (20-80%), sin material juvenil (Martin Del Pozzo et al., 2008; Nieto-Torres y Martin Del Pozzo, 2021). La cristobalita fue detectada hasta en un 3.5% de cantidad en algunas muestras de cenizas (Rojas et al., 2001; Nieto-torres y Martin Del Pozzo, 2021).

La fase magmática comenzó en marzo 1996 con la formación de domos de lava. Sus cenizas se caracterizaron por la presencia de vidrio juvenil andesítico y escoria vesicular, con un tamaño de grano más grueso respecto a las cenizas de erupciones pasadas. Entre sus otros componentes se encontraban líticos vítreos (20-83%), cristales (5-70%) y el vidrio (2-70%) (Martin Del Pozzo et al., 2008). Los porcentajes de los componentes varían dependiendo de la erupción.

La formación de las cenizas en el Popocatepetl está relacionada a procesos de limpieza del conducto (presencia de cristales y líticos), obstrucción del conducto (incremento de líticos), y ascenso de magma (Martin Del Pozzo et al., 2008). El comportamiento de los gases antes y después de las explosiones aisladas en el volcán se relaciona con cantidad de ceniza emitida (Campion et al., 2018). Las explosiones con mayor contenido de ceniza pueden generarse por una acumulación de gases en la superficie del conducto vinculadas con la presencia de los domos de lava (Campion et al., 2018).

Las cenizas del Popocatepetl colectadas de las erupciones recientes y previas a este estudio (desde 1994) muestran una composición andesítica rica en sílice hasta dacítica, con variaciones entre 58 y 65% de SiO₂ (Straub y Martin Del Pozzo, 2001). Estas cenizas están constituidas principalmente por líticos de composición andesítica de color oscuro, cristales y vidrio volcánico (Martin Del Pozzo et al., 1995, 2008; Straub y Martin Del Pozzo, 2001; Martin Del Pozzo y Mendiola, 2002). Se han encontrado partículas muy pequeñas silíceas en algunas cenizas (Martin Del Pozzo et al., 2008).

Los cristales de plagioclasa, que son andesinas y labradoritas, tienen una composición de % SiO₂ entre 51.66 - 60.32. El contenido de álcalis varía de 3.85 a 7.68 % (Straub y Martin Del Pozzo, 2001). Los piroxenos (clinopiroxenos y ortopiroxenos) en el Popocatepetl comienzan a formarse a una profundidad de 40-50 km y tienen una composición de % SiO₂ entre 51.95 – 55.39 y MgO 14.39 a 29.96% (Straub y Martin Del Pozzo, 2001).

La actividad reciente del volcán, en el periodo 2016-2018 se describe en la sección 3.1.

5 Metodología

Las emisiones de cenizas volcánicas del Popocatepetl se monitorearon para esta tesis a partir de enero de 2016 hasta diciembre de 2018. Las cenizas se muestrearon inmediatamente después de las emisiones con columnas de más de 1 km de altura.

Se realizó una revisión periódica cada hora de las cámaras en tiempo real ubicadas en Tlamacas, Altzomoni, Amecameca, Hacienda Panoaya, San Nicolas de los Ranchos y Puebla Volcanes (CENAPRED Y Webcams). Estas observaciones permitieron identificar la dirección de dispersión de las emisiones de cenizas del volcán. La caída de cenizas en los diferentes sectores era confirmada por colaboradores de la Red de Monitoreo de Cenizas.

Se incluyó la actividad sísmica registrada en las estaciones Canario y Chipiquixtle (CENAPRED) como apoyo en el monitoreo.

5.1 Muestreo y Selección de Cenizas

Las cenizas del Popocatepetl en el periodo 2016 - 2018 fueron colectadas de la Red de Muestreo de Cenizas. Esta red actualmente consta de 143 equipos colectores con contenedores de material seco y húmedo. Están ubicados en la Ciudad de México, Estado de México, Puebla y Morelos-

En campo, las cenizas se colectaron dentro de bolsas de plástico herméticas o de papel encerado. Fueron membretadas con la fecha, sitio y detalles de la recolección. Posteriormente se vaciaron en viales para su almacenamiento, pesado y manejo.

Se preparó una base de datos que contiene la información del día de muestreo, sitio, recolector, peso, color, tamaño y observaciones de cada muestra. En 2016 se recolectaron un total de 77 muestras, 270 muestras en 2017 y 253 en 2018.

Las cenizas que se estudiaron a mayor detalle en esta tesis fueron seleccionadas con base en los siguientes criterios:

1. Tipo de emisión. Se eligieron muestras de los diferentes procesos que emiten cenizas en el volcán: explosiones (aisladas/independientes) de diferente intensidad y emisiones continuas. Las muestras fueron seleccionadas con base en los eventos eruptivos más representativos por año. Para 2016 fueron seleccionadas 1 evento explosivo y 3 emisiones continuas, para 2017 se eligieron 8 explosiones y 3 eventos de emisión continua, y para 2018 fueron 11 y 4, respectivamente.

2. Cantidad de material y distribución de las cenizas. La cantidad de cenizas fue diferente entre los sitios de muestreo en una misma erupción debido al tipo de emisión y a su distribución con base en la dirección de los vientos. Por este motivo, se seleccionaron las muestras de los sitios que tuvieran la mayor cantidad de ceniza.

Se eligieron 52 muestras para estudiar el periodo de 2016 a 2018 (Tabla 2). En 2016, se escogieron ocho muestras correspondientes a los días 24 de enero, 4 y 18 de abril, y 1° de agosto de 2016. Las muestras de 2017 son 11 de los días 12 de junio; 2, 7 y 9 de julio, 21 y 26 de agosto, 27 de septiembre; 1° y 12 de octubre; 18 de noviembre y 10 de diciembre. En 2018 se eligieron 30 muestras correspondientes al 30-31 de enero, 31 de julio, 21 de noviembre y al periodo julio-diciembre debido a un aumento en la actividad durante ese tiempo.

Tabla 2. Lista de muestras estudiadas en este trabajo y su clave de sitio (Fig. 2).

Fecha	Clave (Sitio)	Lugar de colecta	Fecha	Clave	Lugar de colecta
24/01/16	PO240116 SJT (54)	S.J. Tehuixtltlán	04/09/18	PO040918 OZ (51)	Ozumba
04/04/16	SX050416 (89)	S. Xalitzintla	11/09/18	PO110918 PSC (60)	Paso de Cortes
18/04/16	PO180416 AMX (146)	Amozoc	17/09/18	PO170918 PSC (60)	Paso de Cortes
18/04/16	PO180416 SPCH (144)	S. P. Cholula	17/09/18	PO170918 OZU (51)	Ozumba
18/04/16	PO180416 CAL (132)	Calpan	19/09/18	PO190918 OZU (51)	Ozumba
01/08/16	PO010816 OZU (51)	Ozumba	19/09/18	PO19IX18 SPN (42)	S. P. Nexapa
01/08/16	PO010816 AMC (101)	Amecameca	19/09/18	PO190918 JUC (55)	Juchitepec
01/08/16	PO010816 ZOY (50)	Amecameca	20/09/18	PO200918 MA (1)	Milpa Alta
12/06/17	PO120617 TLC (147)	Tlacotepec	20/09/18	PO200918 JUC (55)	Juchipetec
12/06/17	PO120617 TV (143)	T. del Volcán	21-23/09/18	PO21230918 PSC (60)	Paso de Cortes
02/07/17	PO020717 AMC (101)	Amecameca	24/09/18	PO240918 ATT (53)	Atlautla
07/07/17	PO070717 OZU (51)	Ozumba	24/09/18	PO240918 OZU (51)	Ozumba
09/07/17	PO090717 SPN (42)	S. P. Nexapa	29/09/18	PO290918 ATT (53)	Atlautla
21/08/17	PO210817 TLAY (70)	Tlayacapa	29/09/18	PO290918 SPN (42)	S. P. Nexapa
26/08/17	PO260817 PSC (60)	Paso de Cortés	29/09/18	PO290918 THA (109)	Tláhuac
27/09/17	PO270917 ATlh (63)	Atlaltlahucan	29/09/18	PO290918 CUL (24)	Culhuacán
01/10/17	PO011017 OCU (65)	Huecahuasco	05/10/18	PO051018 OZU (51)	Ozumba
12/10/17	PO121017 SPN (42)	S.P. Nexapa	16/10/18	PO061018 OZU (51)	Ozumba
12/10/17	PO121017 CNP (148)	CENAPRED	11/10/18	PO111018 SPN (42)	S. P. Nexapa
18/11/17	PO181117 TV (143)	T. del Volcán	12/10/18	PO121018 OZU (51)	Ozumba
10/12/17	PO101217 PUE (142)	PUE	21/11/18	PO211118 TL (61)	Tlamacas
10/12/17	PO101217 SPCH (144)	S. P. Cholula	21/11/18	PO211118 PSC (60)	Paso de Cortes
31/01/18	PO30310118PSC (60)	Paso de Cortes	21/11/18	PO211118 NEA (81)	Nealtican
20/07/18	PO200718 AMC (101)	Amecameca	08/12/18	PO081218 XAL (89)	S. Xalitzintla
31/07/18	PO310718 ECT (124)	Ecatzingo	15/12/18	PO151218 MET (145)	Metepec
31/07/18	PO310718 OZ (51)	Ozumba	15/12/18	PO151218 B	Canario
31/07/18	PO310718 PRR (7)	Tlalpan			(balístico)

5.2 Granulometría

El análisis granulométrico se realizó a muestras de ceniza con contenido mayor a 5 g. Estas muestras fueron PO240116 SJT, PO18IV16 AMX, PO010816 OZU, PO010816 AMC, PO020717 AMC, PO210817 TLAY, PO270917 TV, PO30310118 PSC, PO310718 ECT y PO211118 TL.

El tamizado mecánico se realizó en el Laboratorio de Sedimentología Volcánica “A” en el Instituto de Geofísica. Las muestras se homogeneizaron para después dividir las en cuatro partes iguales y hacer el tamizado de una de estas fracciones. La cantidad de muestra tamizada esté en función de la cantidad inicial de colecta, ya que cada evento eruptivo emitía una cantidad de material variable, desde un par de gramos hasta una centena de gramos de ceniza por sitio.

Fueron empleados los tamices de -1Φ , 0Φ , 1Φ , 2Φ , 3Φ , 4Φ y 5Φ de MONTINOX (Fig. 6). Posteriormente se llevaron a cabo los histogramas de distribución de tamaño para observar las variaciones en la cantidad de muestra dependiendo el tamaño de las partículas. El contenido de partículas finas (menores a 300 micras) en las muestras de PO180416 AMOX, PO010816 OZU y PO310718 ECAT fue obtenido por medio del Laser Particle Sizer Analysette 22.



Fig. 6. (A) Pesado de la muestra previo al tamizado. (B) Tamices empleados para la distribución de tamaño de grano.

5.3 Microscopía

La identificación de los componentes, forma y abundancia en las cenizas se realizó utilizando diferentes métodos de microscopía. De igual manera, se emplearon diferentes tipos de preparación para las muestras conforme a los requerimientos de los microscopios empleados.

Las cenizas enlistadas en la Tabla 3. fueron analizadas en el Microscopio Estereoscópico Leica S9D.

Se realizaron láminas delgadas de las muestras PO180416 CAL, PO010816 OZU, PO011017 OCU, PO121017 CNP, PO30310118 PSC, PO310718 ECAT y PO211118 TL y se observaron en el Microscopio Petrográfico Leica DM4500 (Fig. 7).



Fig. 7. Microscopio estereoscópico Leica S9D y microscopio petrográfico DM4500

Las láminas delgadas pulidas se recubrieron por grafito en el Laboratorio de Microscopia Electrónica en el Edificio Mario Molina de la UNAM para analizarse en la Microsonda Electrónica de Barrido (EPMA) en el Laboratorio Universitario de Petrología del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía en la UNAM (Fig.8).



Fig. 8. Observación de láminas delgadas pulidas recubiertas en la Microsonda Electrónica de Barrido (EPMA) del Instituto de Geofísica.

En las cenizas gruesas se realizó el conteo de componentes en la fracción de tamaño más abundante (3Φ). En el material más fino se revisó la abundancia de componentes en una fracción de la muestra total.

Las muestras PO010816 OZU, PO120617 TV, PO270917 ATlh, PO121017 CNP, PO310718 ECT, PO290918 SPN y PO211118 TL se examinaron en los microscopios electrónicos de barrido (SEM-EDS) Hitachi TM 3030 Plus (Fig. 9) y JEOL JSM-6300. Las partículas de ceniza se adhirieron a la platina del

portamuestras del microscopio y para el equipo JSM-6300 las partículas fueron recubiertas con grafito en el equipo Agar Auto Carbon Coater. En el microscopio ZEISS EVO MA10 fueron observadas las cenizas PO010816 OZU, PO30310118 PSC, PO310718 ECT y PO211118 TL.



Fig. 9. Microscopio Electrónico de Barrido SEM-EDS Hitachi TM3030 Plus.

El análisis cuantitativo de la composición química de los minerales más abundantes se realizó con la Microsonda Electrónica de Barrido (EPMA) en el equipo JEOL JXA 8900-R en el Laboratorio Universitario de Petrología en la UNAM de las láminas delgadas pulidas antes mencionadas (Fig. 9). Los elementos de los cristales fueron analizados con un voltaje de aceleración de 20 kV, corriente de 20 nA (2.0×10^{-8} A) y un diámetro de haz de 1 micra. El tiempo de adquisición fue de 40 s; para Na y K se utilizaron 10 s.

Mediante análisis de Fluorescencia de Rayos X se determinaron los elementos mayores en 9 muestras: 6 cenizas (PO010816 ZOY, PO010816 OZU, PO310718 ECAT, PO190918 OZU y PO21-230918 ECAT) y un balístico (PO151218 B). Una fracción de material fino de la muestra de cenizas PO310718 ECAT fue analizada con el fin de conocer la composición del material fino (5 Φ , PO310718 ECAT F). El balístico fue colectado cerca de la estación sísmica de Canario el 15 de diciembre de 2018 y fue dividido para su análisis considerando su parte máfica (PO151218 O) y félsica (PO151218 C). Las cenizas fueron analizadas en el espectrómetro Rigaku Primus II en el Laboratorio de fluorescencia de Rayos X del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía del Instituto de Geología de la UNAM.

5.4 Correlación con la Actividad Volcánica

Las características de las cenizas volcánicas del Popocatepetl (distribución de tamaños, componentes y abundancias, y composición química mineral) se correlacionaron con los eventos eruptivos asociados y los parámetros sísmicos del volcán. Para esto, se procesó la información de la n de la actividad volcánica (VTs, tremor, explosiones, exhalaciones y altura de la columna eruptiva) en el periodo 2016-2018 en una gráfica.

En las gráficas de las Fig. 33, 34 y 35 se muestran las alturas de las columnas eruptivas, los periodos de construcción y destrucción de los domos de lava con base en la interpretación de este trabajo y con apoyo de los reportes de CENAPRED. También se graficaron los sismos volcanotectónicos, minutos de tremor, exhalaciones y explosiones obtenidos de CENAPRED.

6 Resultados

6.1 Granulometría

El tamaño de las partículas de ceniza durante 2016 se encuentra en el rango de 1Φ (0.25 mm) a $>5\Phi$ (<0.032 mm, Fig. 10). La ceniza del 24 de enero (P240116 SJT) colectada cerca del volcán a 15.8 km, muestra un mayor contenido de partículas en el rango de 4Φ , con un bajo contenido de material fino. En la ceniza del 18 de abril (PO180416 AMX), a 61 km de distancia del volcán, la distribución de tamaño es amplia: hay material desde 1Φ a $>5\Phi$, sin embargo, su distribución es bimodal con mayor concentración de partículas de 3Φ y 5Φ . El 1 de agosto la distribución de tamaño de las cenizas es diferente: la colectada en Ozumba (PO010816 OZU, Fig. 11) tiene la mayor concentración de partículas de 3Φ , mientras que la colectada en Amecameca (PO010816 AMC) tiene una distribución casi homogénea entre 3 a 5Φ , donde cada tamaño disminuye un poco respecto al anterior.

La distribución del material fino (4Φ a 12Φ) entre las muestras PO180416 AMX y PO010816 OZU es diferente. Ambas muestras tienen mayor cantidad de partículas entre 4Φ – 6Φ , sin embargo, la disminución en partículas más finas es abrupta en PO010816 OZU.

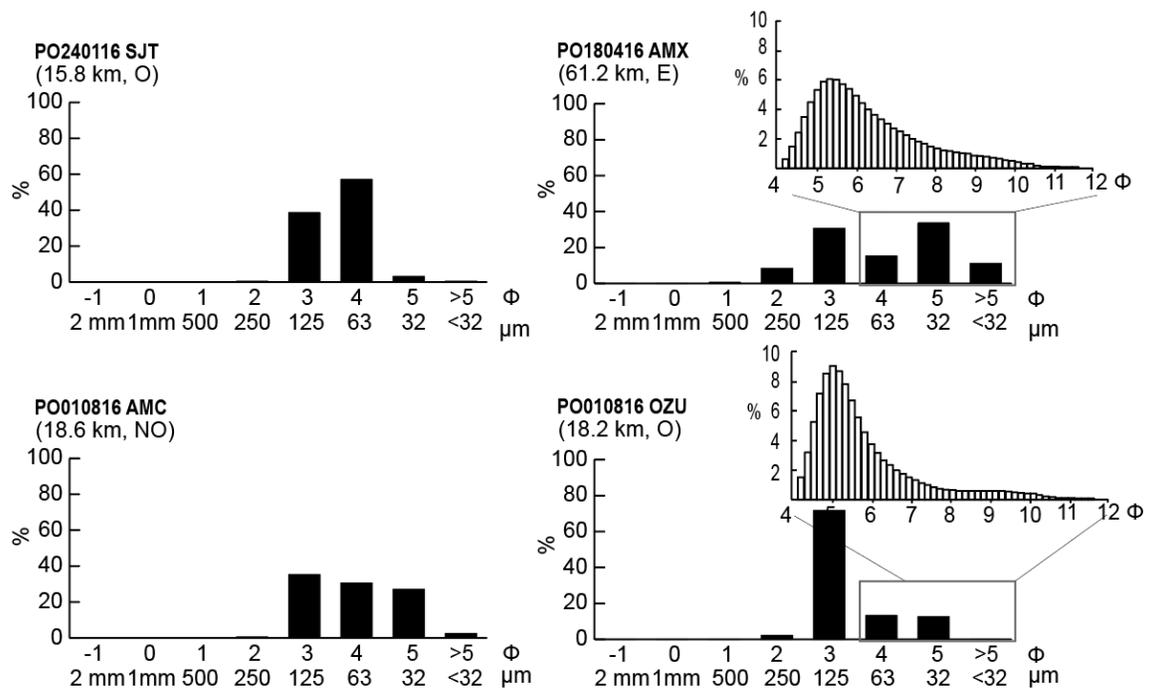


Fig. 10. Gráficas de distribución de tamaño en las cenizas de 2016. Entre los paréntesis se encuentra la distancia y dirección a la que fue colectada la muestra respecto al volcán).

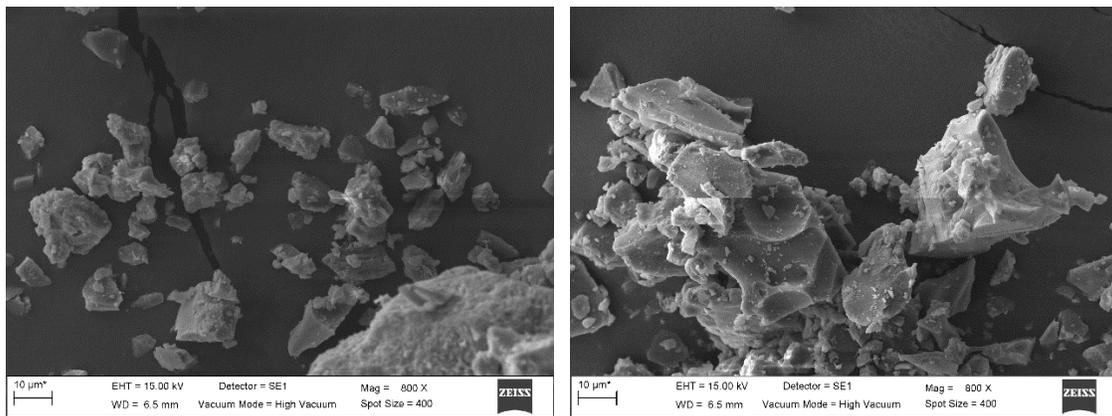


Fig. 11. Cenizas del 1 de agosto de 2016 (PO010816 OZU) donde se observa el material fino (<20 μm) y grueso (>70 μm).

En 2017 las cenizas mantienen la distribución de tamaño entre 1 a >5Φ (Fig. 12). Durante este periodo el tamaño predominante en las partículas de ceniza fue en 3Φ. El 2 de julio (PO020717 AMC) el tamaño de las cenizas se concentró en 3Φ y fue disminuyendo hasta el 5Φ. Las cenizas del 21 de agosto (PO210817 TLAY) tienen mayor contenido de material en 3Φ, la abundancia de tamaños de 4 a >5Φ fueron similares. En el último trimestre, las cenizas del 27 de septiembre (PO270917

ATLH), 1 de octubre (PO011017 OCU) y 18 de noviembre (PO181117 TV) tuvieron un pico en el tamaño 3 Φ (Fig. 12).

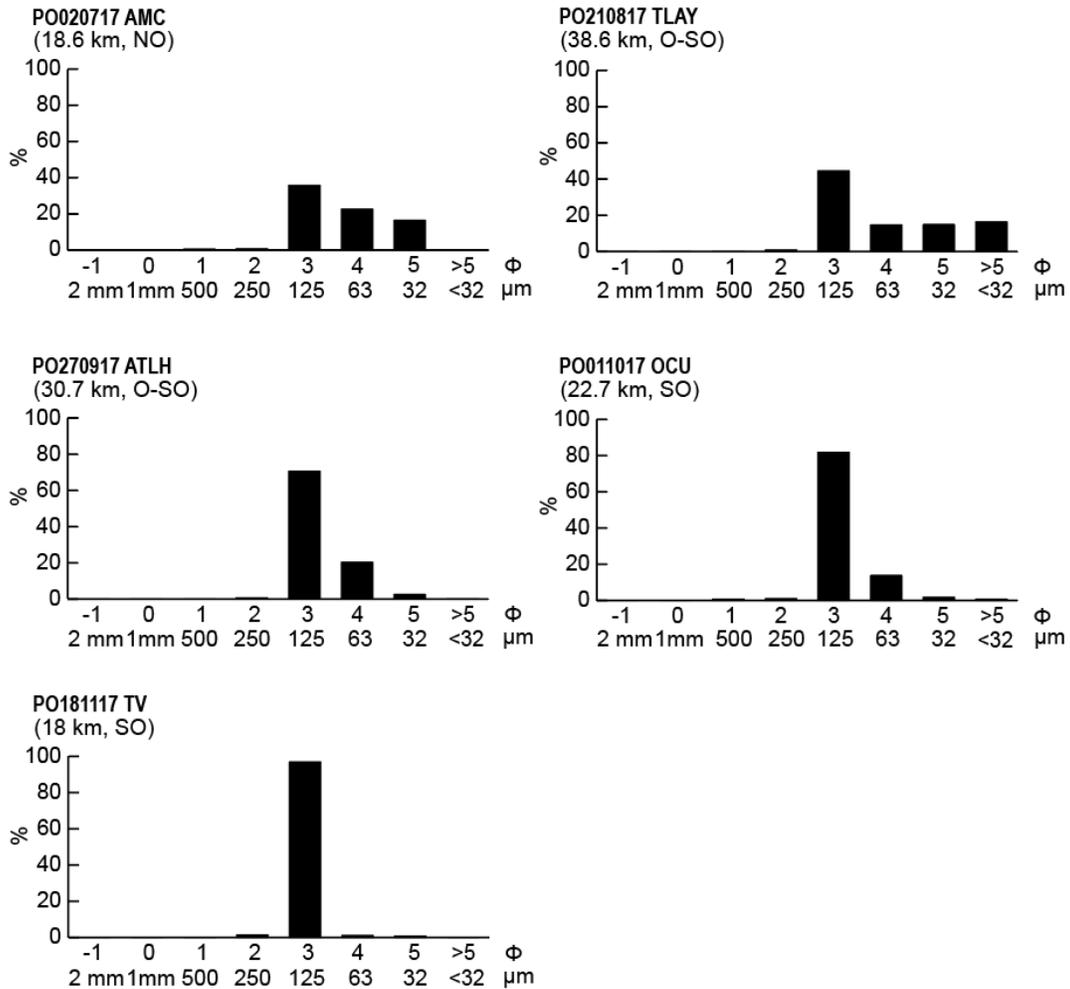


Fig. 12. Distribución de tamaño en las cenizas de 2017. Entre los paréntesis se encuentra la distancia y dirección a la que fue colectada la muestra respecto al cráter).

La distribución de tamaños en 2018 fue de -1 a >5 Φ . Las cenizas del 30-31 de enero tienen la distribución más amplia, la mayor cantidad de partículas se encuentra entre 0 Φ y 4 Φ . El 31 de julio (PO310718 ECT) el tamaño de las partículas también es variable, su moda se encuentra en 3 Φ , pero tiene una importante abundancia de material entre 5 Φ y >5 Φ . El tamaño de las cenizas el 21 de noviembre (PO211118 TL) se encuentra principalmente entre 3 y 4 Φ (Fig. 13 y 14).

Las partículas finas de PO310718 ECT tienen un comportamiento similar a las de PO180416 AMC. En esta muestra las cenizas tienen una mayor abundancia entre 4 Φ y 6 Φ .

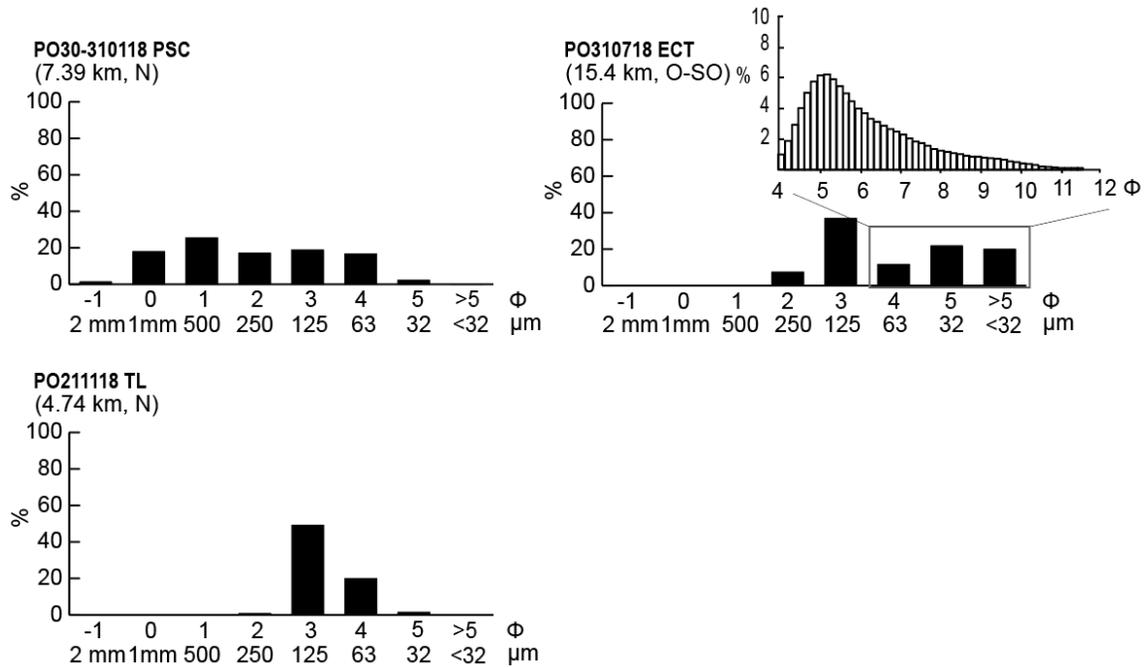


Fig. 13. Distribución de tamaño de las cenizas generadas en 2018. Entre los paréntesis se encuentra la distancia y dirección a la que fue colectada la muestra respecto al cráter.

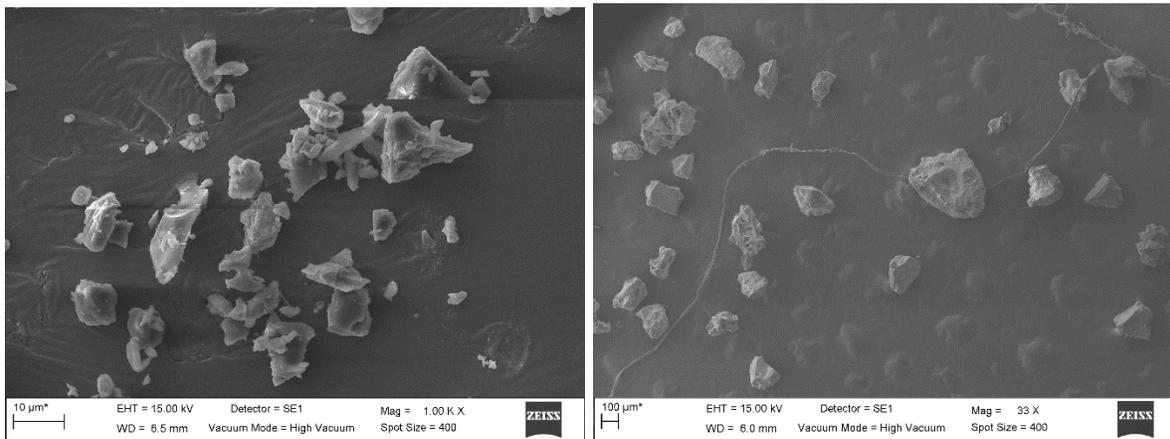


Fig. 14. Diferencia en el tamaño de las partículas entre las cenizas del 31 de julio de 2018, colectadas a 15 km del volcán (PO310718 ECT; izquierda), y 21 de noviembre de 2018 a 5 km (PO211118 TL; derecha).

Las cenizas tienden a tener una mayor abundancia de tamaños de partículas en 3Φ , excepto por las muestras P240116 SJT, PO180416 AMX y PO30310118 PSC, donde dominan las partículas 4Φ , 5Φ y 1Φ , respectivamente (Tabla 3, Fig.15.). Las muestras PO180416 AMX y PO310718 ECT contienen la mayor cantidad de material fino del periodo estudiado con 44.91% y 41.88%, respectivamente. Cabe resaltar que PO180416 AMX es la muestra más distal y con mayor contenido de material fino. La muestra del 30310118 PSC es la muestra con la distribución más

amplia en el periodo estudiado y con los tamaños de partícula más grandes. Las muestras donde se tiene mayor contenido de partículas de tamaño grueso son PO270917 AT LH, PO01102017 OCU, PO181117 TV, PO30310118 PSC y PO211118 TL (Tabla 3).

Tabla 3. Granulometría.

Muestra/phi	-1	0	1	2	3	4	5	>5	Total
P240116 SJT				0.08	38.72	57.20	3.16	0.12	99.28
PO180416AMX	0	0	0.12	8.33	30.60	15.29	33.75	11.16	99.25
PO010816 OZU				2.24	71.78	13.37	12.62		100.00
PO010816 AMC	0	0	0	0.62	35.33	30.58	27.11	2.52	96.18
PO020717 AMC			0.41	0.81	35.84	22.69	16.60		76.35
PO210817 TLAY				0.93	44.63	14.80	15.07	16.47	91.90
PO270917 AT LH				0.77	70.67	20.47	2.70	0.1	94.70
PO011017 OCU	0	0	0.04	1.11	81.89	13.95	1.82	0.44	99.26
PO181117 TV				1.47	97.01	1.20	0.11	0.00	99.78
PO30310118 PSC	1.36	17.92	25.43	17.10	18.82	16.65	2.26	0.01	99.56
PO310718 ECT				7.45	36.91	11.64	21.85	20.03	97.89
PO211118 TL				0.8	49.15	19.9	1.45	0.005	71.31

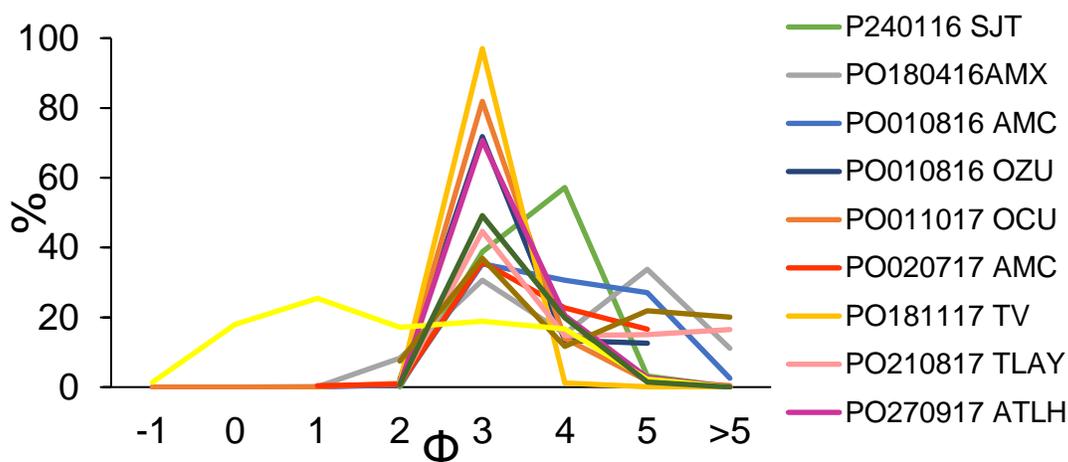


Fig. 15. Granulometría en el periodo 2016-2018.

La Media (Md) obtenida para estas distribuciones se muestran en la Tabla 4. Las cenizas de 2016 mantienen una Md entre 2.67 a 3.69. La ceniza que se mantiene por debajo de Md 3 es la colectada en Ozumba el 1 de agosto (PO010816 OZU), lo cual podría estar influenciado por la dirección inicial y preferencial de la columna eruptiva.

En 2017 la Md es de 2.59 a 3.05. Las emisiones que mantienen una Md entre 2.59 – 2.66 tienen la mayor parte de su contenido en tamaño 3Φ , mientras que las cenizas con Md 3.03-3.05 muestra una distribución más amplia (Tabla 4).

Las cenizas de 2018 tienen una Md de 1.3 a 3.39. En Md 1.43 se encuentra la ceniza con mayor distribución de tamaño en el periodo estudiado (PO30310118 PSC, Tabla 4).

Tabla 4. Media de la distribución de tamaño de grano de las cenizas estudiadas.

Muestra	Media	s	Muestra	Media	s	Muestra	Media	s
P240116 SJT	3.19	0.69	PO020717 AMC	3.05	0.98	PO181117 TV	2.5	0.35
PO180416 AMX	3.69	1.31	PO270917 ATLH	2.66	0.6	PO30310118 PSC	1.3	1.68
PO010816 AMC	3.4	1.05	PO011017 OCU	2.59	0.42	PO310718 ECT	3.39	1.5
PO010816 OZU	2.67	0.78	PO210817 TLAY	3.03	1.4	PO211118 TL	2.71	0.64

6.2 Tipo y Forma de los Componentes

Las cenizas fueron clasificadas en 3 grupos de componentes principales: líticos, cristales y vidrio

- Líticos.

Los líticos encontrados en las muestras se clasificaron en líticos vítreos (LitV) y líticos accidentales (LitA) (Fig. 16).

Los líticos vítreos son fragmentos de roca de color negro con un lustre vítreo. Tienen una forma de bloque, con bordes angulares. Su tamaño es variable. Suelen encontrarse partículas entre 0.2 a 2 mm. Los líticos vítreos menores a 0.2 mm son poco frecuentes y generalmente están asociados a muestras donde su abundancia es poca (<3%) respecto a otros componentes como los cristales y vidrio.

Algunos líticos vítreos contienen cristales visibles de plagioclasa y piroxeno con tamaños hasta de 450 μm . Sin embargo, también se pueden encontrar estos cristales en tamaños de microlitos. Estos líticos presentan en ocasiones pocas vesículas circulares menores a 100 μm .

Los líticos accidentales son fragmentos de rocas angulares, algunos con caras subangulares, de colores variables entre rojizos, naranjas, rosados o grises opacos consecuencia de su alteración. Los tamaños de estas partículas oscilan entre 0.2 a 2 mm. El tamaño de los cristales de plagioclasa y piroxeno que forman parte de este tipo de líticos son similares a los que se encuentran en los líticos vítreos.

- Cristales.

Las cenizas contienen principalmente cristales de plagioclasa y piroxenos. Estos cristales se encuentran “suelos” o dentro de los líticos, y algunos se pueden observar a simple vista.

Las plagioclasas son de color blanco a incoloro con forma tabular. Su tamaño varía entre ~30 – 450 μm . Algunos cristales se observan rotos, con zoneamiento o carcomidos (Fig.17).

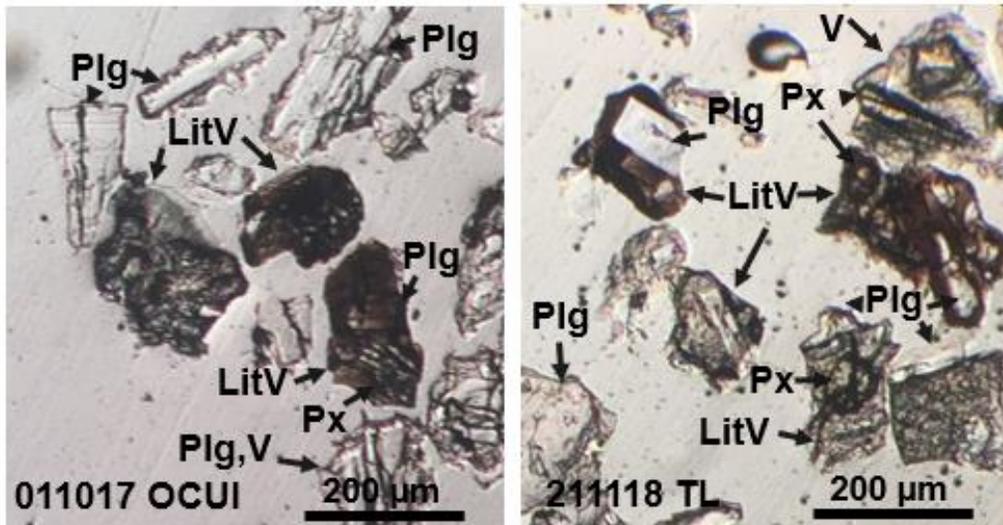


Fig. 16. Imagen vista a través del microscopio petrográfico. Líticos vítreos (LitV) con cristales de plagioclasa (Plg) y piroxeno (Px) en su interior. En los cristales de plagioclasa se pueden observar bordes de vidrio claro.

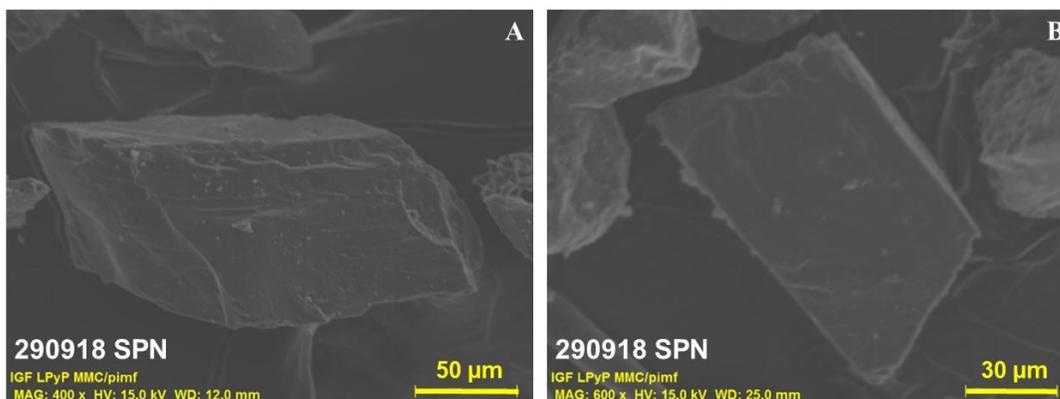


Fig. 17. Imagen de plagioclasas observadas en SEM. A) Longitud de ~160 µm. B) Longitud de 110 µm.

Los piroxenos se encuentran en tonalidades verdes o negras con formas prismáticas. Poseen tamaños de hasta 600 µm. En su interior se observan pequeños óxidos de hierro, como la titanomagnetita con tamaños menores a 15 µm (Fig. 18).

Las plagioclasas y piroxenos suelen tener una fracción de vidrio claro de diferentes tamaños en sus bordes.

También se encontraron cristales de olivino (Fig. 19 A), cristobalita (Fig. 19 C), wollastonita (Fig. 20C) y titanomagnetita (Fig. 19 D). Los olivinos fueron identificados en muestras específicas de los días 18 de abril de 2016, la titanomagnetita el 1 de agosto de 2016, y cristobalita los días 27 de septiembre de 2017 y 31 de julio de 2018.

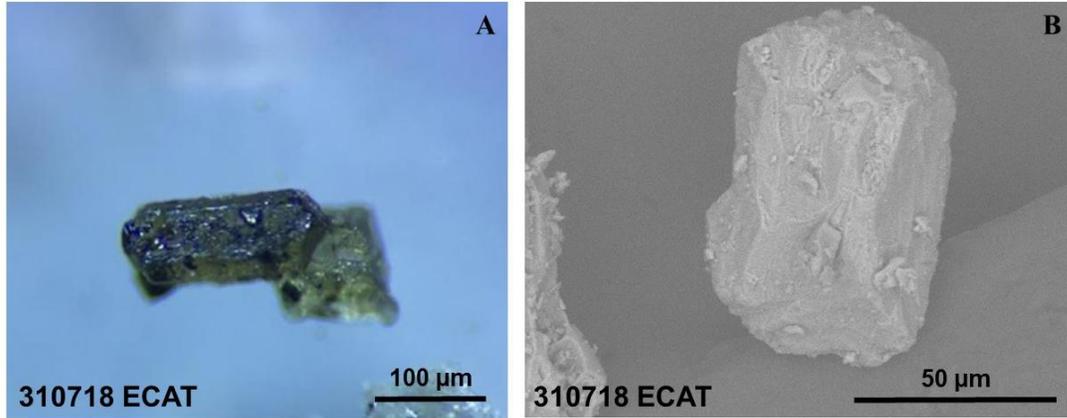


Fig. 18. Piroxenos del 31 de julio de 2018. (A). Imagen en microscopio estereoscópico. Cristal adherido a un vidrio pequeño. Se pueden observar los óxidos que contiene en su interior. (B) Imagen en SEM. Cristal de piroxeno cubierto con algunas partículas pequeñas.

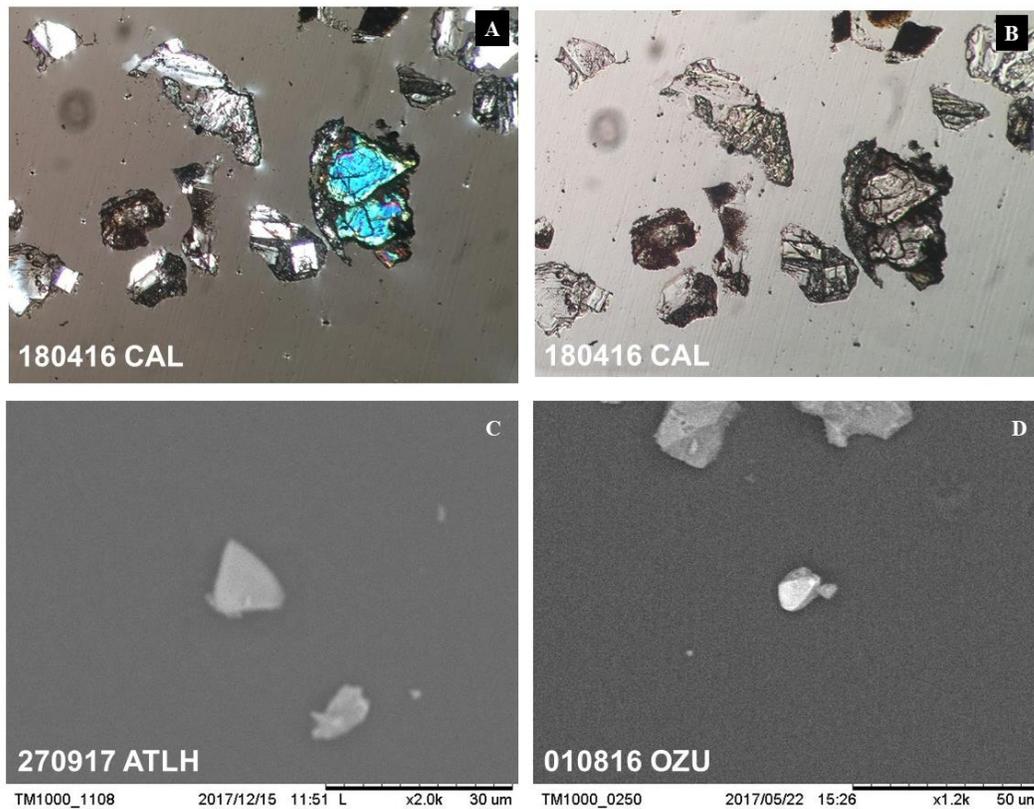


Fig. 19. (A-B). Olivinos en las cenizas del 18 de abril de 2018 vistos en lámina delgada. (C) Cristobalita del 27 de septiembre de 2017. (D) Titanomagnetita de ~15 µm el 1 de agosto de 2016 (Imágenes en SEM).

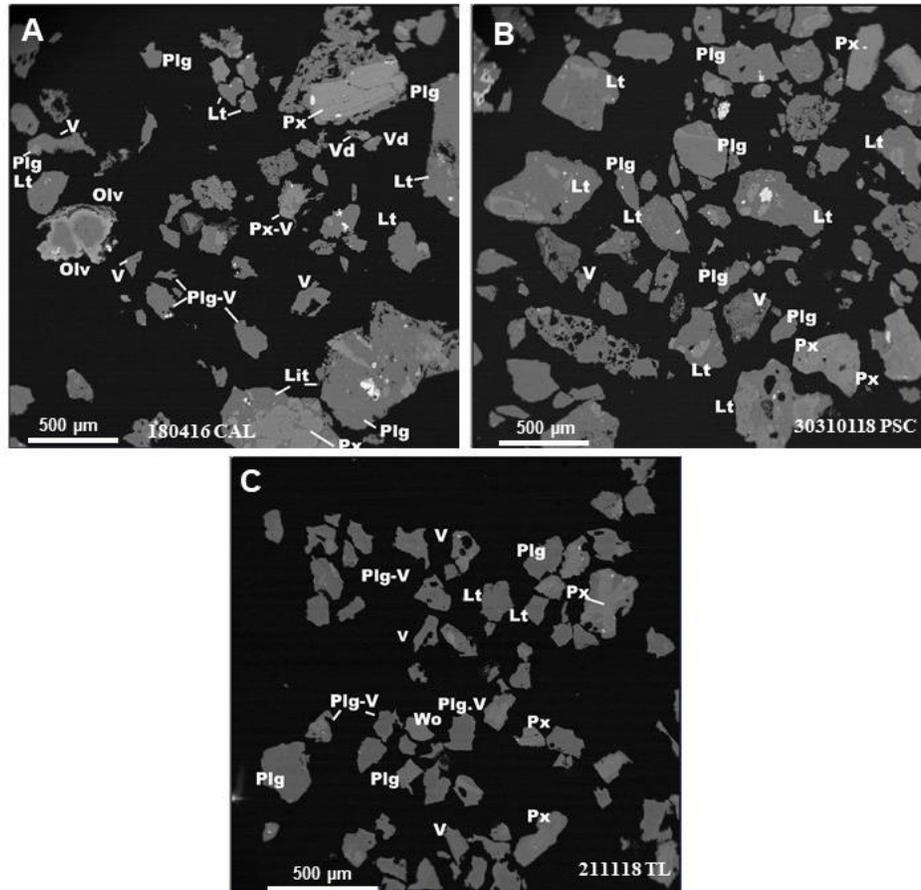


Fig. 20. Cristales y vidrio encontrados en las muestras del (A) 18 de abril de 2016, (B) 30-31 de enero de 2018 y 11 de noviembre de 2018. Se pueden observar cristales de plagioclasa (Plg), piroxenos (Px) y olivinos (Olv), vidrio (V), líticos (Lt) y wollastonita (Wo).

- Vidrio.

El vidrio volcánico en las cenizas es principalmente de color claro (inoloro) y oscuro (negro) y tiene una forma irregular (Fig. 21).

En ocasiones el vidrio contiene de bajo a alto nivel de vesicularidad. Estas vesículas, indicativas del contenido de gases en el magma, generalmente son circulares (Fig. 21A y E) pero llegan a encontrarse ovaladas (Fig. 21 E y 21 F) y tienen tamaños de hasta 50 µm. El vidrio suele encontrarse “suelto” pero también está en los bordes de los cristales. En algunas emisiones fue posible identificar material escoraseo como el 18 de abril de 2016 (PO180416 CAL) y 31 de julio de 2018 (PO310718 ECT).

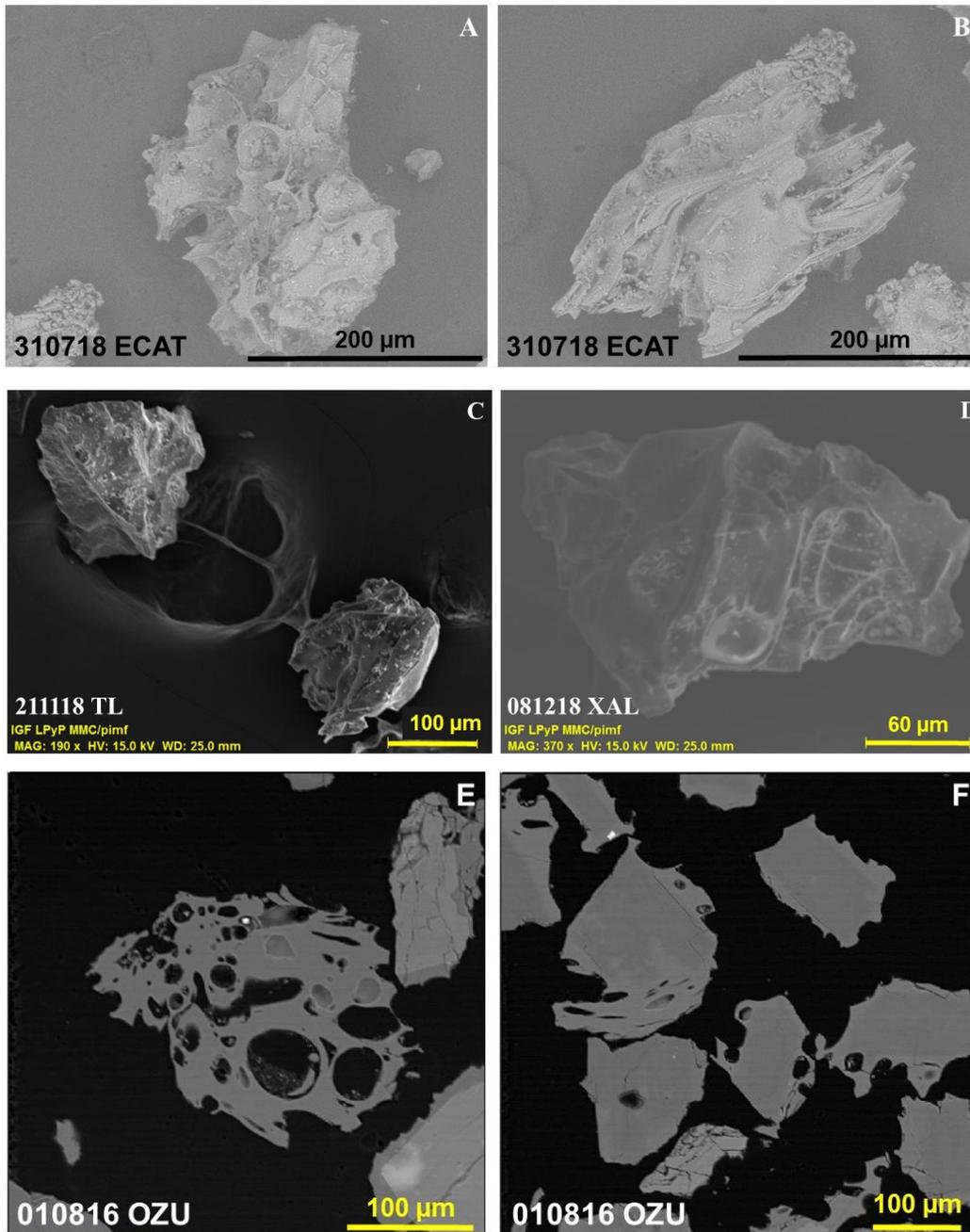


Fig. 21. Vidrios observados en SEM. (A) Vidrio escoraseo del 31 de julio de 2018 con alto contenido en vesículas circulares separadas por una capa delgada de vidrio y con estructuras en forma de Y. (B) Vidrio del 31 de julio de 2018 forma irregular y posibles vesículas tabulares. (C-D) Vidrios irregulares del 21 de noviembre y 8 de diciembre de 2018. (E) Vidrio volcánico con vesículas circulares y cristales cubiertos por vidrio del 1 de agosto de 2016. (F) Cristales cubiertos de vidrio donde se pueden ver algunas vesículas alargadas indicando el movimiento al momento de enfriarse el 1 de agosto de 2016.

El 18 de abril de 2016 la cantidad de material escoracio fue considerable con respecto al resto de emisiones (~70% de la muestra). Estas partículas son de color gris claro con tamaños entre 2 a 5 mm. Contienen los cristales más grandes encontrados en este periodo: plagioclasas de 450 μm y piroxenos de 600 μm (Fig. 22).

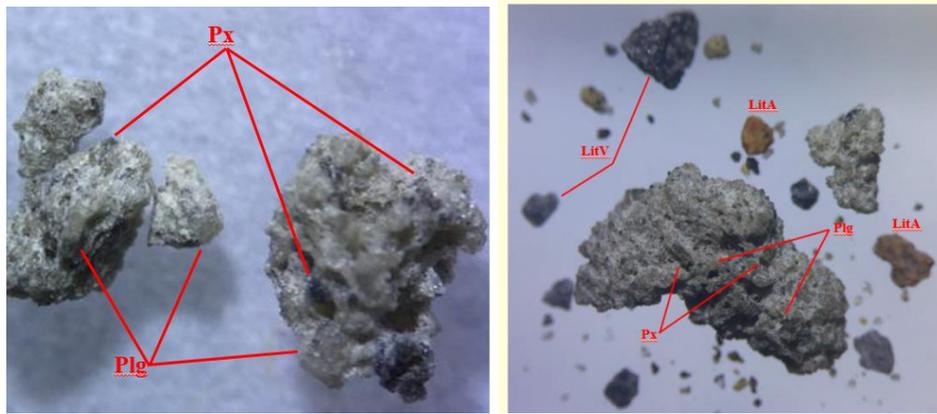


Fig. 22. Imagen vista en microscopio estereográfico. Escorias encontradas en la muestra del 18 de abril de 2016. (LitV: Líticos Vítreos; LitA: Líticos accidentales; Plg: Plagioclasa; Px: Piroxeno)

El vidrio oscuro es el constituyente principal de los líticos vítreos. En su interior se encuentran inmersos cristales de diferentes tamaños de plagioclasa y piroxenos. También presenta pocas vesículas en ocasiones.

6.3 Abundancia de los Componentes

Los componentes en las emisiones de ceniza de 2016 se agrupan en 3: las cenizas con mayor contenido de vidrio, las cenizas con contenido alto de cristales y las cenizas con alto contenido de líticos vítreos (Tabla 5).

El primer grupo consta de 50% a 80% de contenido en vidrio. El contenido de cristales va de 20 a 30%, mientras que el contenido de líticos es escaso con <21% (Fig. 23). Las cenizas del segundo grupo están constituidas de mayor número de cristales entre 50 - 65%, seguido por 25 - 35% de vidrio y pocos líticos (10%). Dentro de estos grupos se encuentran las cenizas de los días 24 de enero, 18 de abril y 1 de agosto. Los líticos dominan en el tercer grupo con casi su totalidad (98%) y poco contenido de cristales (2%) y corresponde a las cenizas del 4 de abril (SX050416, Fig. 23).

A partir de esta sección se hace la distinción de los componentes encontrados en las cenizas de explosiones y de emisiones continuas. Esta distinción es explicada con mayor detalle en la sección 6.5 *Actividad volcánica* y en la discusión de este trabajo.

Tabla 5. Abundancia (%) de los componentes en las cenizas de 2016. LV: Lítico vítreo del domo; PL: Plagioclasa; PX: Piroxeno; VC: Vidrio claro; VO: Vidrio oscuro; Σ LI: Total de líticos, Σ CX: total de cristales, Σ VD: total de vidrio).

Muestra	LV	PL	PX	VC	VO	Σ LI	Σ CX	Σ VD
PO240116 SJT	21	15	14	41	9	21	29	50
SX050416	98	2	0	0	0	98	2	0
PO180416 AMX 4.75 Φ	3	25	3	69	0	3	28	69
PO180416 AMX >4.75 Φ	2	22	1	75	0	2	23	75
PO180416 CAL	8	15	5	69	0	8	21	71
PO180416 SPCH	10	45	10	35	0	10	55	35
PO010816 AMC	1	6	18	75	1	1	24	75
PO010816 ZOY	5	18	8	69	0	5	26	69
PO010816 OZU 3 Φ	10	44	18	25	1	10	62	26

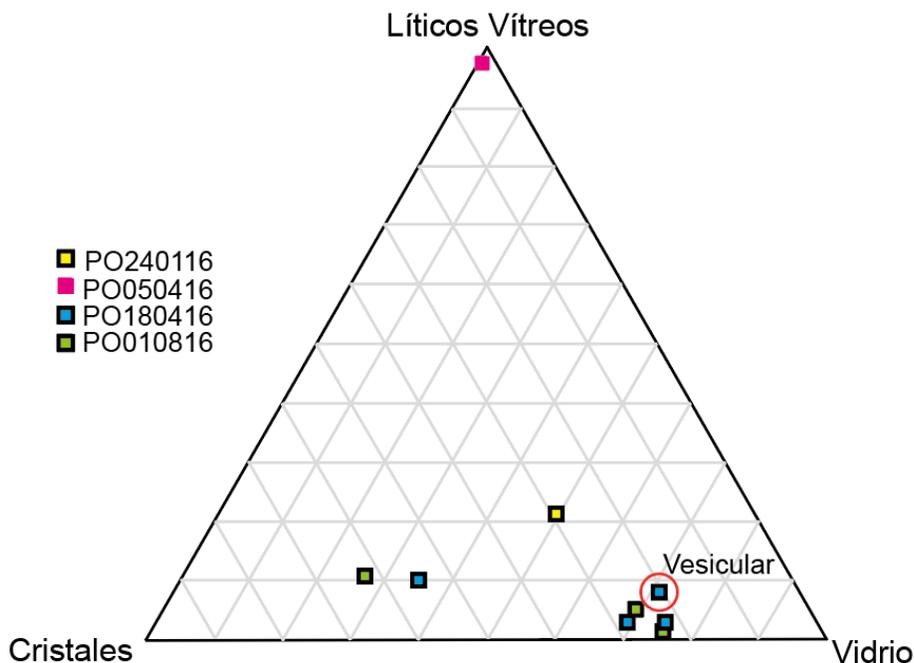


Fig. 23. Componentes de las cenizas en 2016 (Borde negro: cenizas producto de emisión continua).

En las cenizas de 2017, se observan los mismos grupos que en 2016 y un grupo adicional con contenido similar entre líticos vítreos y cristales (Tabla 6; Fig.24).

El grupo con mayor contenido de líticos vítreos está constituido por 65-90% de este componente y poco contenido de cristales (5-20%) y vidrio (1-15%, Fig.24). Las cenizas que forman parte de este grupo son del 12 de junio, 2 y 7 de julio, 21 de agosto, 12 de octubre y 18 de noviembre. Las cenizas que contienen una proporción similar de líticos vítreos (40-50%) y cristales (25-45%) corresponden a los días del 9 de julio, 26 de agosto y 1 de octubre. Las cenizas del 10 de diciembre constituyen

al tercer grupo con mayor contenido de cristales (60-70%). Tiene poco contenido de líticos vítreos (20%) y vidrio (15%, Fig.24).

El cuarto grupo corresponde a la muestra del 27 de septiembre, con un alto contenido de vidrio (76%) y pocos cristales (18%) y líticos (6%, Fig.24).

Tabla 6. Abundancia (%) de los componentes en las cenizas de 2017.

Muestra	LV	PL	PX	VC	VO	Σ LI	Σ CX	Σ VD
PO120617 TLC	85	4	6	5	0	85	10	5
PO120617 TV	78	7	6	6	3	78	13	9
PO020717 AMC	67	11	7	12	3	67	18	15
PO070717 OZU	85	8	5	2	0	85	13	2
PO090717 SPN	45	35	6	14	0	45	41	14
PO210817 TLAY	84	3	6	7	0	84	9	7
PO260817 PSC	46	27	1	17	9	46	28	26
PO270917 ATLH	6	10	8	74	2	6	18	76
PO011017 OCU	44	31	9	13	3	44	40	16
PO121017 SPN	87	5	3	5	0	87	8	5
PO121017 CNP	77	12	2	8	1	77	14	9
PO181117 TV	89	4	4	0	2	89	9	2
PO101217 PUE	20	44	20	15	0	20	65	15
PO101217 SPCH	19	53	12	15	0	19	65	15

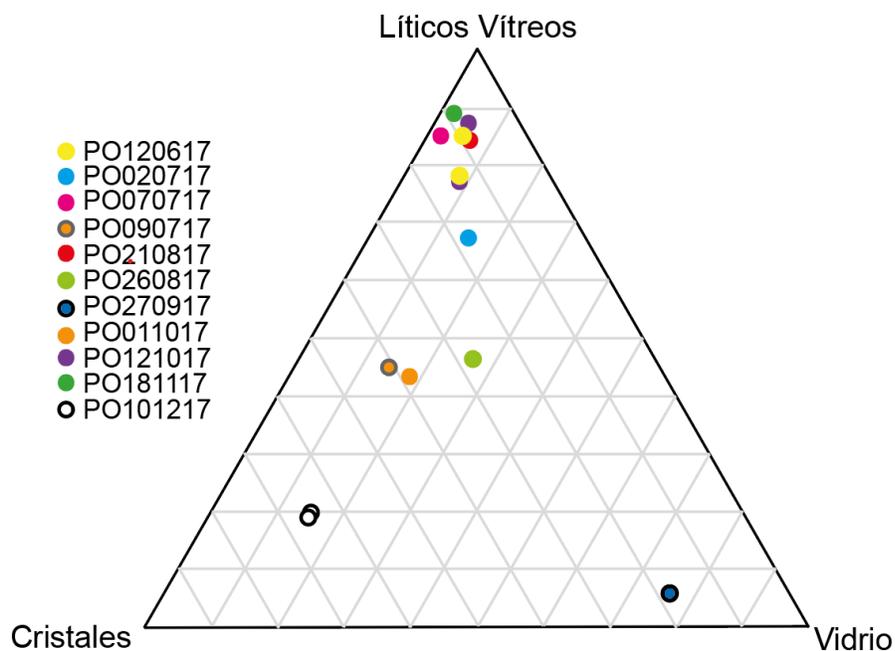


Fig. 24. Componentes de las cenizas en 2017. Borde negro: cenizas producto de emisión continua.

En 2018 las cenizas se dividen en los mismos 4 grupos que el año anterior, con la diferencia en que el contenido de vidrio es menor respecto a los años pasados. El primer grupo tiene mayor contenido de líticos vítreos y el segundo grupo tiene contenido similar de líticos vítreos y cristales. El tercer grupo contiene más cristales respecto a los líticos vítreos y un poco más vidrio, y el cuarto grupo tiene mayor contenido de vidrio (Tabla 7; Fig. 25).

En el primer grupo, donde los líticos vítreos son el componente dominante (61%), están las cenizas de los días 30-31 de enero; 4, 11, 24 y 29 de septiembre; 5, 6 y 12 de octubre, y 8 de diciembre.

El segundo grupo engloba a cenizas con contenido de líticos entre 30 - 60% y cristales entre 20 - 55%. Las cenizas tienen una amplia variación entre las abundancias y son las cenizas del 20 de julio, 17, 19, 20, 21-23, 29 de septiembre y, 11 y 12 de octubre, y 21 de noviembre.

Las cenizas del 31 de julio conforman el tercer y cuarto grupo con variaciones de componentes diferente. En el tercer grupo los cristales son el componente abundante (62%). El cuarto grupo consta de las cenizas con mayor contenido en vidrio casi el 50% de vidrio del 31 de julio y 17 de septiembre.

En este periodo estudiado tenemos cenizas del mismo día con diferentes abundancias de componentes. Esto se debe al sitio de muestreo y la dirección preferencial en la que se desplazó la nube de cenizas.

Una clara disminución en el contenido de vidrio y enriquecimiento en cristales y líticos vítreos puede observarse en el transcurso del periodo de 2016 - 2018.

Tabla 7. Abundancia (%) de los componentes en las cenizas de 2016.

Muestra	LV	PL	PX	VC	VO	Σ LI	Σ CX	Σ VD
PO30310118 PSC	80	11	4	5	0	80	15	5
PO200718 AMC	44	20	5	31	0	44	25	31
PO310718 ECT	6	35	5	54	2	6	40	56
PO310718 OZU	8	50	12	30	0	8	62	30
PO310718 PRR	32	52	1	16	0	32	53	16
PO040918 OZU	85	5	0	5	5	85	5	10
PO110918 PSC	74	14	0	6	6	74	14	12
PO170918PsC	46	38	6	8	1	46	44	10
PO170918 OZ	33	11	11	44	0	33	22	44
PO190918 SPN	35	38	6	21	0	35	44	21
PO190918 OZ	56	29	3	11	1	56	32	12
PO190918 JUC	44	42	0	14	0	44	42	14
PO200918 MA	67	12	0	18	2	67	12	20
PO200918 JUC	46	39	0	13	1	46	39	14
PO21-230918 PSC	47	27	6	20	0	47	33	20
PO240918 ATT	88	6	3	3	0	88	9	3
PO240918 OZ	88	8	0	4	0	88	6	4
PO290918 ATT	63	25	0	12	0	63	25	12
PO290918 SPN	72	14	0	14	0	72	14	14
PO290918 THA	51	34	2	13	0	51	36	12
PO290918 CUL	51	30	5	14	0	51	35	14
PO051018 OZU	74	13	0	8	4	74	13	12
PO061018 OZU	79	9	2	8	2	79	11	10
PO111018 SPN	50	20	7	18	5	50	27	23
PO121018 OZU	62	19	2	12	5	62	21	18
PO211118 TL	40	25	4	29	1	40	29	30
PO211118 PSC	42	23	11	22	2	42	34	24
PO211118 NEALT	41	26	4	27	1	41	30	28
PO081218 XAL	71	13	3	9	3	71	16	12

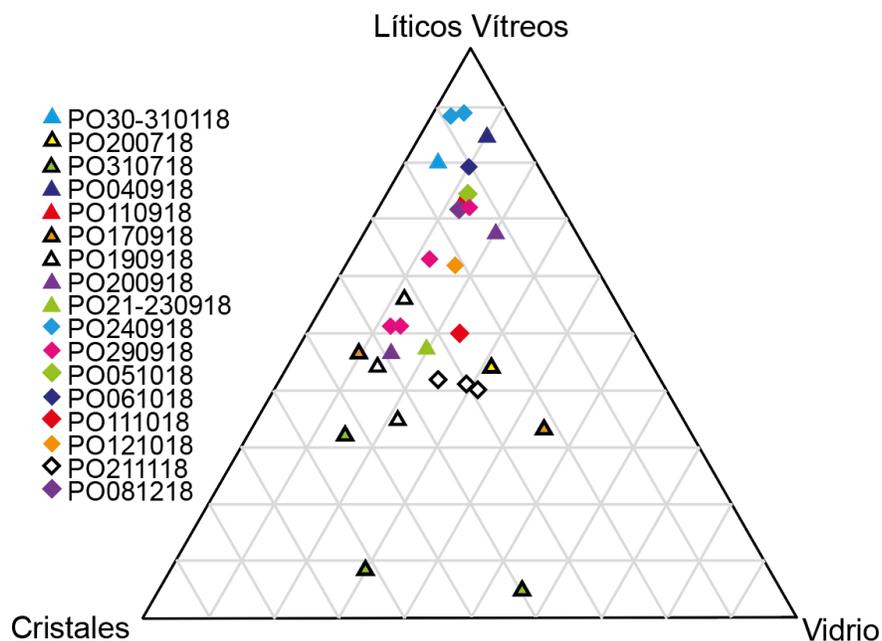


Fig. 25. Variación en los componentes de las cenizas en 2018. Borde negro: cenizas producto de emisión continua.

6.4 Química Mineral

Las cenizas del Popocatépetl estudiadas muestran diferentes variaciones de composición con el tiempo (Tabla 8).

Tabla 8. Datos de química de elementos mayores por FRX (*Balístico).

Muestra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PXC	Suma
PO180416 AMX	60.10	0.87	16.39	5.95	0.10	4.05	5.78	4.34	1.62	0.23	0.57	100
PO010816 ZOY	59.06	0.86	16.42	5.99	0.10	4.16	6.18	4.29	1.55	0.23	1.17	100
PO010816 OZU	60.07	0.89	16.49	5.67	0.09	3.84	5.78	4.43	1.64	0.21	0.89	100.002
PO010816 ATL	58.86	0.77	17.22	5.71	0.10	4.52	7.01	4.27	1.34	0.19	0.01	100
PO011017 OCU	58.65	0.78	17.04	5.93	0.10	4.84	6.63	4.21	1.27	0.20	0.36	100.001
PO310718 ECT	60.38	0.85	16.74	5.20	0.08	3.48	5.95	4.65	1.59	0.19	0.40	99.515
PO310718 FINA	63.16	0.99	16.42	4.67	0.06	1.79	4.53	4.91	2.24	0.23	0.38	99.387
PO190918 Ozu	60.07	0.89	16.49	5.67	0.09	3.84	5.78	4.43	1.64	0.21	0.89	100.002
PO21230918PSC	60.22	0.84	16.07	5.84	0.09	4.58	5.89	4.23	1.54	0.19	0.50	100.000
PO151218 C*	65.75	0.55	16.90	3.35	0.05	1.50	4.21	4.79	2.08	0.12	0.70	99.999
PO151218 O*	61.95	0.77	17.21	4.69	0.07	3.23	5.59	4.61	1.68	0.17	0.03	99.998

Las cenizas en el periodo estudiado tienden a tener una composición andesítica, al igual que la parte máfica del balístico del 15 de diciembre de 2018 (PO151218 O). La muestra PO310718 F, correspondiente exclusivamente al material fino de las cenizas del 31 de julio de 2018, es de composición traquítica, mientras que la parte clara del balístico (PO151218 C) es de composición dacítica (Tabla 8).

La ceniza del 18 de abril de 2016 (PO180416 AMX) tiene un alto contenido de SiO₂ (60.10 %). El 1 de agosto de 2016 (PO010816), las cenizas mostraron una variación en el contenido de SiO₂ entre 58.86 y 60.07 %. Las cenizas del 1 de octubre de 2017 (PO011017 OCU) tienen 58.65 % de SiO₂. Para el 31 de julio de 2018 (PO310718 ECT), las cenizas mostraron un incremento en el contenido de SiO₂ respecto a 2017 con 60.38%. En septiembre, la composición disminuyó a 60.07-60.22 de SiO₂ (Fig. 26)

La fracción de material fino del 31 de julio de 2018 (PO310718 FINA) tiene 63.16 % de SiO₂. El balístico colectado el 15 de diciembre de 2018, tuvo en su fracción clara (PO151218 C) la concentración más alta de SiO₂ (65.75 %) y su fracción oscura (PO151218 O) un 61.95 % (Fig. 26).

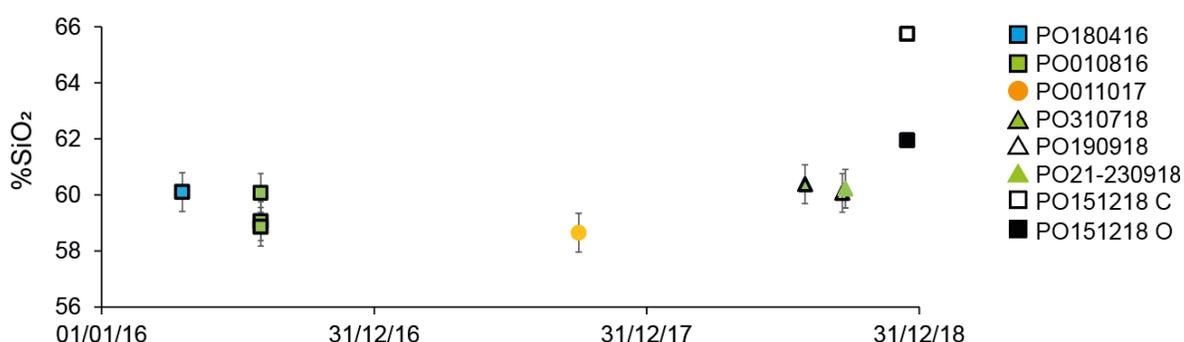


Fig. 26. Composición silícica de muestras de ceniza y el balístico analizado en su parte clara (C) y oscura (O).

Los cristales de olivino de la muestra PO180418 CAL tienen una composición de Forsterita (Fo) que varía entre Fo₈₉₋₈₇.

Las plagioclasas de las cenizas son andesinas y labradoritas, en mayor abundancia las primeras. De los cristales de plagioclasas analizados del 18 de enero de 2016 (PO180418 CAL), son andesinas de tamaños variados. En las cenizas del 1 de agosto de 2016 (PO010816 OZU), los cristales tienden a ser pequeños con composiciones de andesina en centros y bordes, y labradorita en sus bordes. El 1 de octubre de 2017 (PO011017 OCU), 30-31 de enero de 2018 (PO30310118 PSC) y 21 de noviembre de 2018 (211118 TL) tiene cristales de tamaños variables con bordes y centros de andesina y labradorita (Fig. 27 y 29).

La composición de las plagioclasas es variable. En la muestra PO180416 CAL aumenta y disminuye el CaO de manera oscilatoria. En PO30310118 PSC hay un aumento de CaO hacia el centro del cristal, mientras que en PO211118 TL hay plagioclasas que aumentan en su contenido de CaO hacia sus bordes (Fig. 27 A, B, C, D). De manera general, el álcalis en las plagioclasas varía de 4.53 a 7.74%.

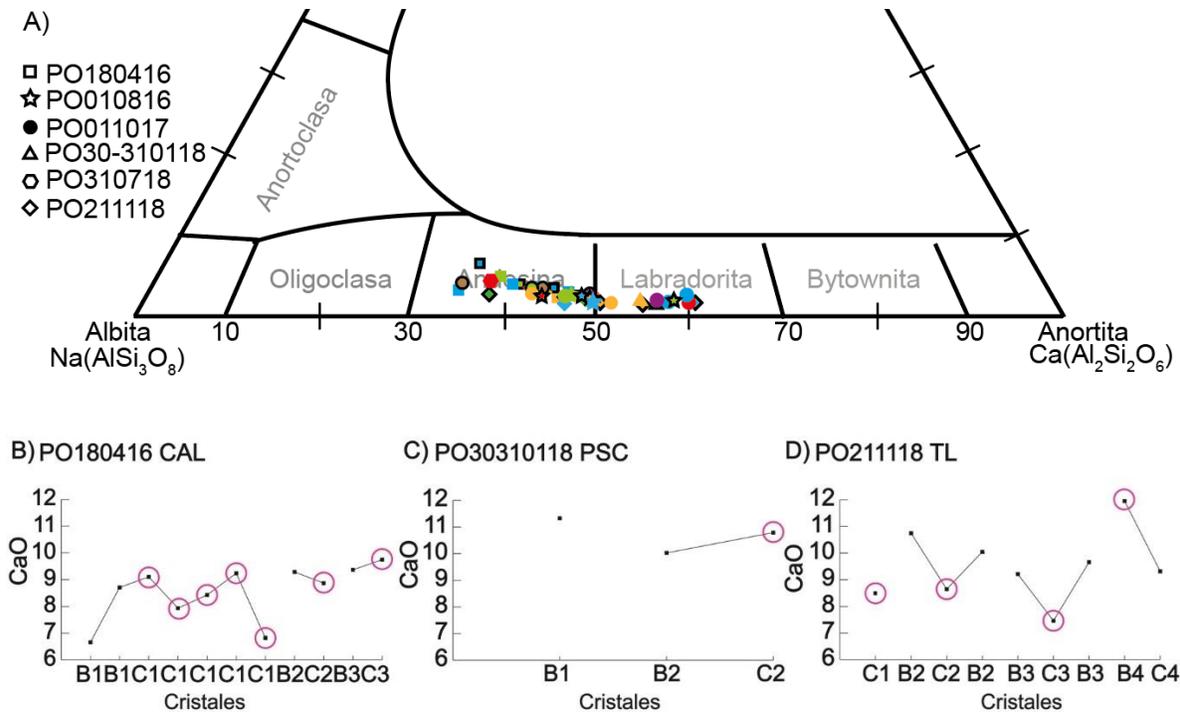


Fig. 27. A) Composición de plagioclasas. Cada color corresponde a los análisis de mismo cristal. (centro: sin borde; borde negro: borde). Cambios en el contenido de Ca en cristales del (B) 18 de abril, 2016, (C) 30-31 de enero, 2018 y (D) 21 de noviembre, 2018.

La mayoría de los piroxenos que constituyen a las cenizas son augitas y enstatitas. Los piroxenos grandes en la muestra PO180416 CAL son enstatitas en centro y borde, mientras que los cristales pequeños son en sus bordes augitas. El 1 de agosto (PO010816 OZU), los piroxenos son pequeños con una composición de augita en centros y bordes. Otros cristales pequeños con composiciones de augita y enstatita en centros y bordes fueron identificados en las cenizas del 1 de octubre de 2017 (PO011017 OCU) y 31 de julio de 2018 (PO310718 ECT). Los cristales grandes y pequeños con composiciones variadas en sus centros y bordes de augita y enstatita corresponden a los días de 18 de abril de 2016 (PO180416 CAL), 30-31 de enero de 2018 (PO30310118 PSC) y 21 de noviembre de 2018 (PO211118 TL). En estas últimas cenizas (PO211118 TL), fue analizado un cristal de Wollastonita (Fig. 28 y 29).

Los cristales de piroxeno muestran una variación en el contenido de MgO. Aunque el Mg tiende a disminuir en sus bordes, algunos muestran tendencias osciladoras (Fig. 28 A, B, C, D). Esto es indicativo de una mezcla de magmas.

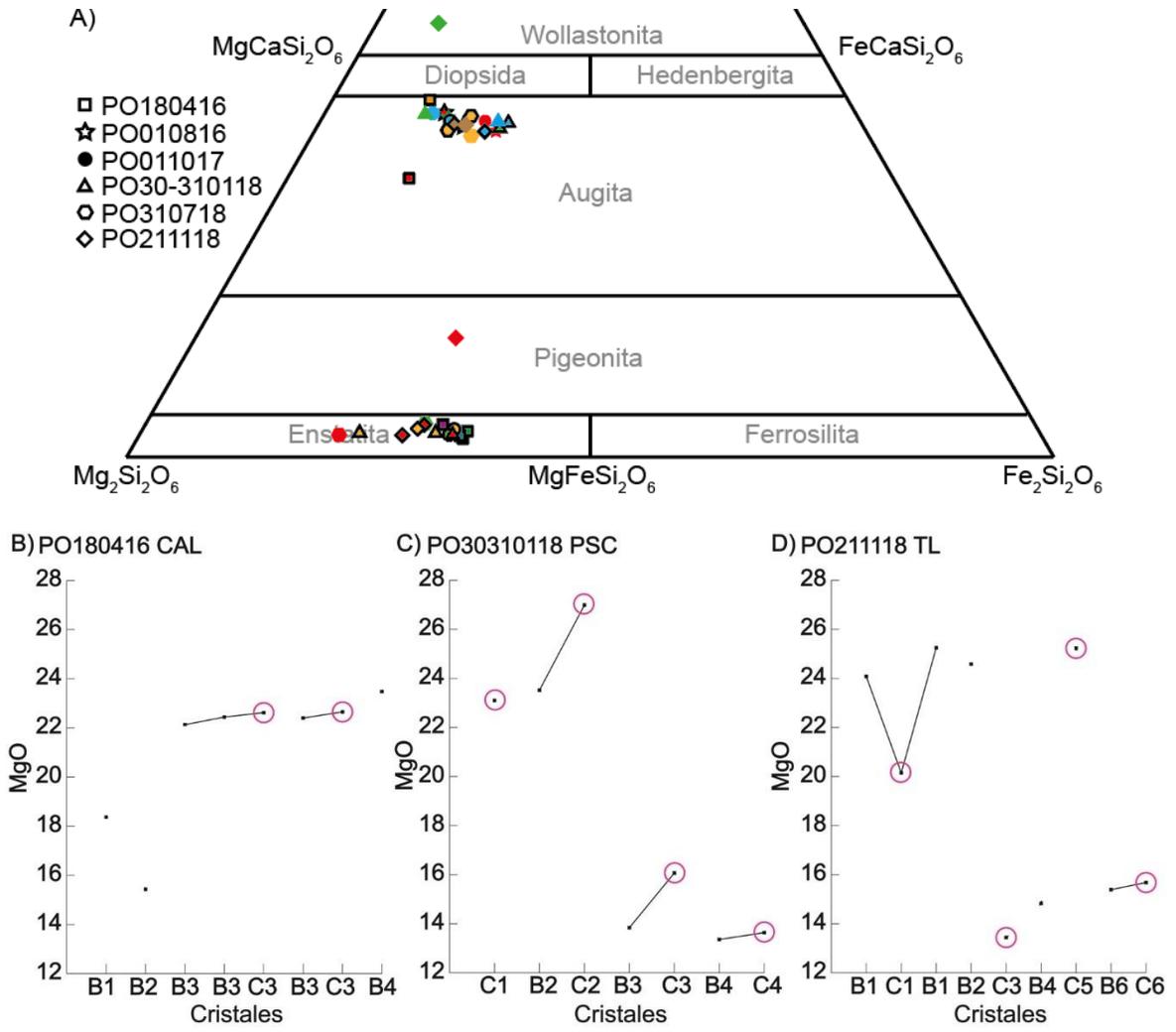


Fig. 28. (A) Composición de piroxenos (centro: sin borde; borde negro: borde). Variación de los cristales del (B) 18 de abril, 2016, (C) 30-31 de enero, 2018 y (D) 21 de noviembre, 2018. Los centros se marcaron con círculo rosa.

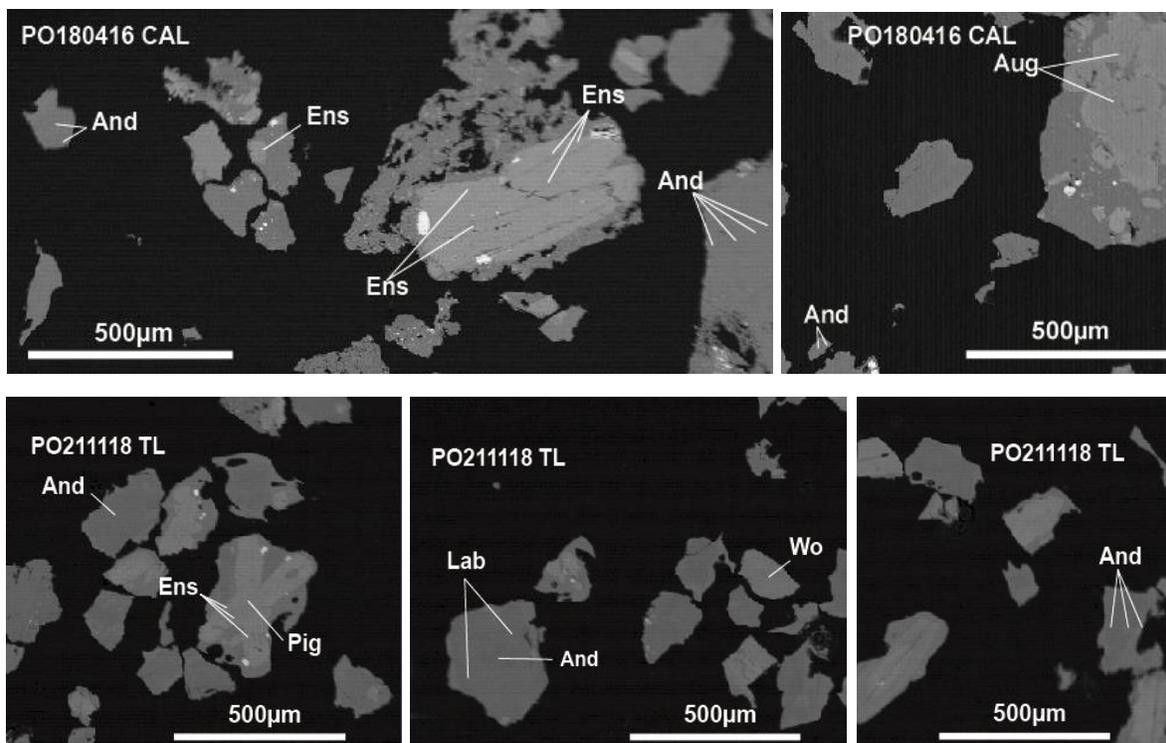


Fig. 29. Cristales de piroxeno y plagioclasa de las muestras PO180416 CAL y PO211118 TL.

6.5 Actividad volcánica

Durante el periodo 2016-2018 la actividad volcánica en el Popocatepetl mostró bajas y altas en los diferentes parámetros sísmicos como son VT's y tremor armónico, así como en sus emisiones de ceniza.

En 2016 destacaron los eventos de emisión continua de ceniza ocurridos entre el 23 y 25 de enero, así como los del 18 de abril y 1 de agosto, donde las alturas de columnas eruptivas alcanzaron un máximo de 3 km. El 30 de agosto los VTs registraron el máximo de eventos en 24 horas con 303 eventos. Una explosión ocurrida el 25 de noviembre generó una columna eruptiva de 5 km de altura, la más alta en este periodo (Fig. 30).

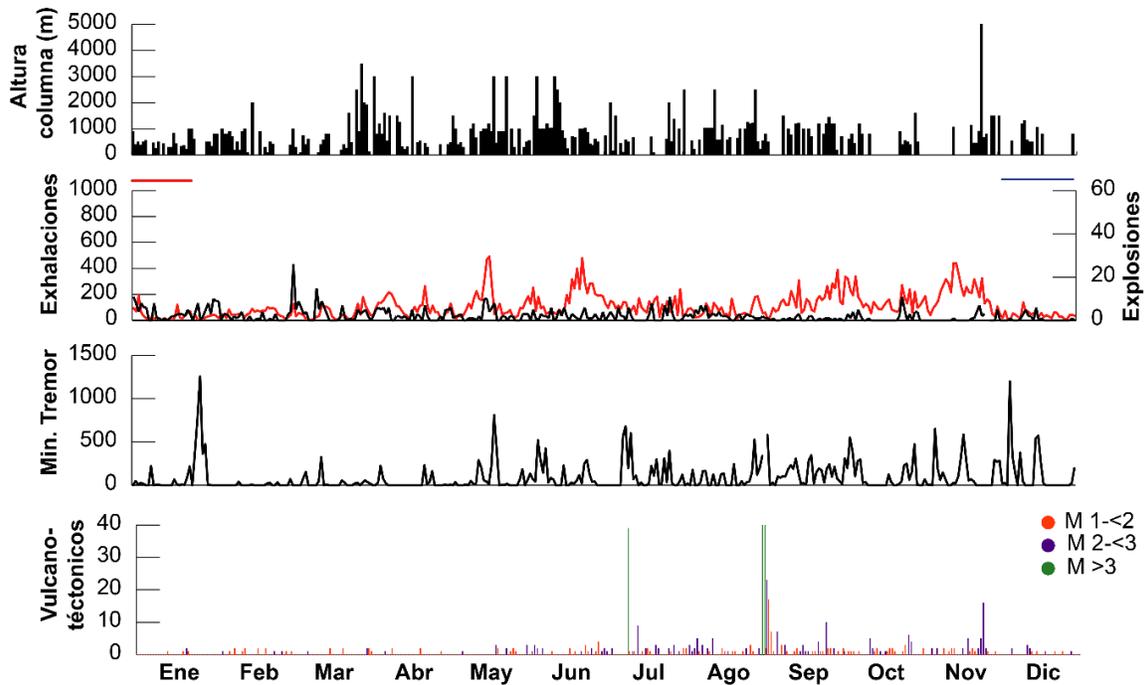


Fig. 30. Actividad volcánica en el año 2016.

La actividad volcánica en el Popocatepetl durante 2017 aumentó a partir de la primera quincena de abril con un mayor número de minutos de tremor y explosiones. El 21 de agosto se presentó una explosión con una columna eruptiva de 4 km, la más alta en este año. Posterior a esto se incrementaron las exhalaciones y el tremor. El 19 de septiembre ocurrió un sismo de M7.1 entre los límites de Puebla y Morelos. Del 27 de septiembre en adelante diversos eventos de emisiones continuas y explosiones tuvieron lugar en el volcán con alturas de hasta 3 km (Fig. 31).

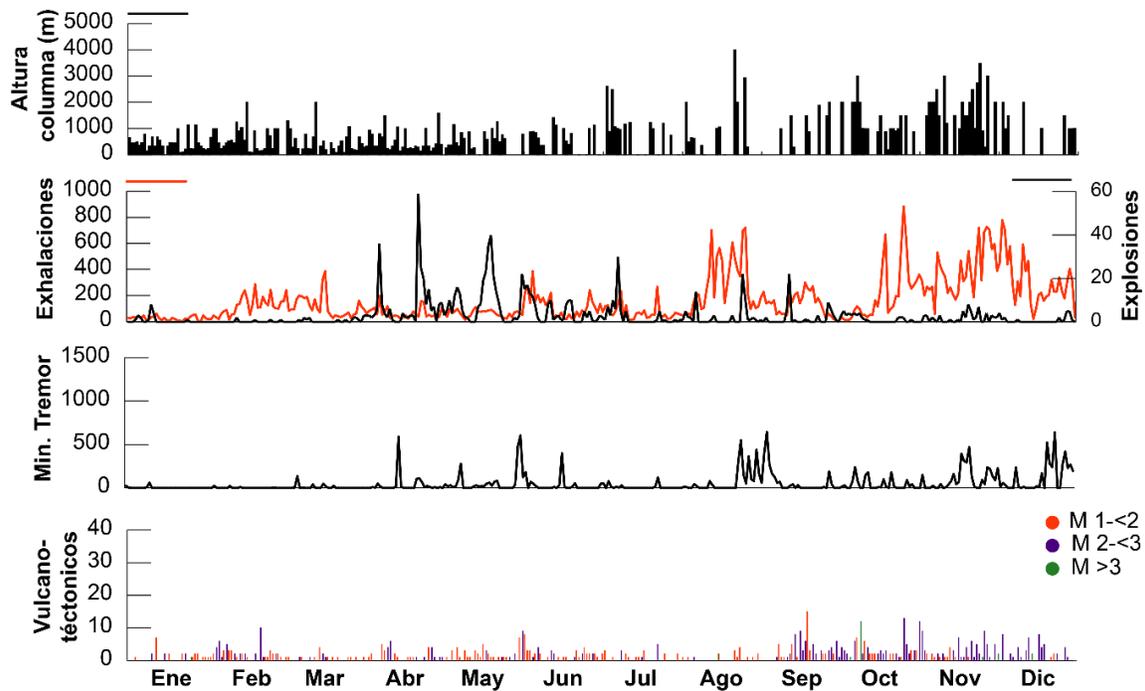


Fig. 31. Actividad volcánica en el Popocatépetl durante 2017.

En 2018 la actividad disminuyó a partir de enero. Durante julio ocurrieron un par de eventos de tren de exhalaciones, donde destacó el corrido el día 31 con una altura de 2 km sobre el cráter. En septiembre la actividad comenzó a incrementar el registro de tremor armónico, explosiones, exhalaciones y las columnas eruptivas alcanzaron hasta 3.5 km de altura (Fig. 32).

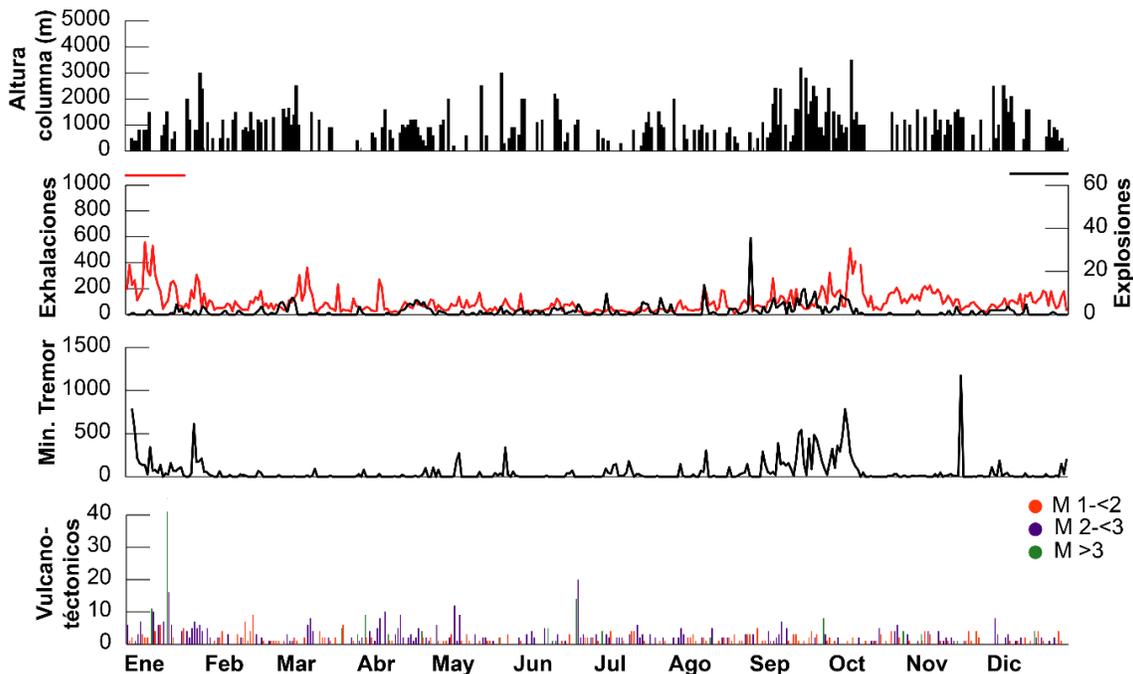


Fig. 32. Actividad volcánica en el 2018.

Durante el periodo 2016 – 2018, las emisiones de ceniza se produjeron con base en dos mecanismos: emisiones continuas acompañadas de tremor armónico y explosiones con contenido de ceniza y alturas variables, y de explosiones que generaron columnas eruptivas superiores a un km de altura. En algunas fechas no fue posible determinar la altura de las columnas debido a las condiciones de nubosidad en el momento del evento eruptivo (Tabla 10). En la Tabla 10. se enlistan la información de la altura de la columna eruptiva alcanzada y el mecanismo de producción de las muestras analizadas en este trabajo.

Tabla 10. Mecanismo de formación de ceniza y altura de la columna eruptiva en metros (- Sin dato).

Muestra	Tipo de emisión	Altura de la columna	Muestra	Tipo de emisión	Altura de la columna
P240116 SJT	Constante	1200	PO110918 PsC	Explosión	2000
SX050416	Explosión	2000	PO170918PsC	Constante	-
PO180416 4.75 PHI	Constante	3000	PO170918 OZ	Constante	-
PO180416 >4.75 PHI	Constante	3000	PO190918 SPN	Constante	-
PO180416 SPCH	Constante	3000	PO190918 OZ	Explosión	-
PO180416 CAL	Constante	3000	PO190918 JUCH	Constante	-
PO010816 AMECA	Constante	3000	PO200918 MA	Explosión	3200
PO010816 ZOYAT	Constante	3000	PO200918 JUCHI	Explosión	3200
PO010816 OZU 3Φ	Constante	3000	PO21-230918 PsC	Explosión	2800
PO120617 TLACO	Explosión	1000	PO22-230918 ATT	Explosión	1900
PO120617 TV	Explosión	1000	PO21-240918 OZ	Explosión	2500
PO020717 AMECA	Explosión	2000	PO240918 ATT	Explosión	2500
PO070717 OZU	Explosión	2000	PO240918 OZ	Explosión	2500
PO090717 SPN	Constante Explosión	1200	PO290918 ATT	Explosión	2500
PO210817 TLAY	Explosión	4000	PO290918 SPN	Explosión	2500
PO260817 PSC	Constante	1500	PO290918 THA	Explosión	2500
PO270917 ATLH	Constante	2000	PO290918 CULH	Explosión	2500
PO011017 OCUI	Explosión	2000	PO051018 OZU	Explosión	1000
PO121017 SPN	Explosión	-	PO061018 OZU	Explosión	1000
PO121017 CNP	Explosión	-	PO111018 SPN	Explosión	1000
PO181117 TV	Explosión	2500	PO121018 OZU	Explosión	1000
PO310718 ECAT	Constante	2000	PO211118 TL	Constante	1200
PO310718 SPN	Constante	2000	PO211118 psc	Constante	1200
PO310718 OZ	Constante	2000	PO211118 NEALT	Constante	1200
PO310718 AMECA	Constante	2000	PO081218 Xalit	Explosión	2000
PO310718 PRR	Constante	2000	PO151218 MET	Explosión	1800
PO040918 OZ PYP	Explosión	1000			

A continuación, se presenta un resumen de la asociación de diferentes parámetros en la caracterización de las cenizas por fecha (Tabla 11).

Tabla 11. Relación de diferentes características de las cenizas volcánicas en el periodo 2016 - 2018.

Fecha	Altura de columna (m)	Origen	Componente principal	Md	SiO ₂
24/01/16	1200	Emisión constante	Vidrio	3.19	
04/04/16	2000	Explosión	Líticos vítreos		
18/04/16	3000	Emisión constante	Vidrio	3.69	60.1
01/08/16	3000	Emisión constante	Vidrio	2.67 / 3.40	58.86- 60.07
12/06/17	1000	Explosión	Líticos vítreos		
02/07/17	2000	Explosión	Líticos vítreos	3.05	
07/07/17	2000	Explosión	Líticos vítreos		
09/07/17	1200	Emisión constante / Explosiones	Lít. V. / Cristales		
21/08/17	4000	Explosión	Líticos vítreos	3.03	
26/08/17	1500	Explosión	Líticos vítreos		
27/09/17	2000	Emisión constante	Vidrio	2.66	
01/10/17	2000	Explosión	Líticos vítreos	2.59	58.65
12/10/17	-	Explosión	Líticos vítreos		
18/11/17	2500	Explosión	Líticos vítreos	2.5	
10/12/17	-	Emisión constante	Cristales		
30-31/01/2018	3000	Explosión	Líticos vítreos	1.30	
20/07/18	1200	Emisión constante	Líticos		
31/07/18	2000	Emisión constante	Vidrio / Cristales	3.39	60.38
04/09/18	1000	Explosión	Líticos		
11/09/18	2000	Explosión	Líticos		
17/09/18	-	Emisión constante	Lít. V. / Cristales / Vidrio		
19/09/18	-	Explosiones / Emisión constante	Líticos / Cristales		60.07
20/09/18	3200	Explosión	Líticos vítreos		
21-23/09/2018	2800	Explosión	Líticos vítreos		60.22
24/09/18	2500	Explosión	Líticos vítreos		
05/10/18	1000	Explosión	Líticos vítreos		
06/10/18	1000	Explosión	Líticos vítreos		
11/10/18	1000	Explosión	Líticos vítreos		
12/10/18	1000	Explosión	Líticos vítreos		
21/11/18	1200	Emisión constante	Líticos vítreos	2.71	
08/12/18	2000	Explosión	Líticos vítreos		
15/12/18	1800	Explosión	Líticos vítreos		61.95 - 65.75

7 Discusión. Relación Entre Parámetros.

Las variaciones más importantes en los componentes de las cenizas, su granulometría y composición están relacionados con el evento eruptivo magmático que las emitió: explosiones o periodos de emisión constante (o también llamados episodios de actividad estromboliana o trenes de exhalaciones y explosiones por CENAPRED).

Las cenizas volcánicas emitidas durante eventos de emisión constante que generaron columnas eruptivas entre 1.2 y 3 km de altura, inician con las muestras P240116, PO180416 y PO010816 correspondientes a 2016 (Fig. 32). Estas cenizas tienen un mayor contenido de material fino y corresponde con algunas de las Md de valores más altos en el periodo estudiado que son PO180416 AMX (Md 3.69) y PO01081 AMC (Md 3.4) (Tabla 4).

Existe una diferencia entre la Md obtenida para cenizas del mismo evento eruptivo colectadas en diferentes zonas. La diferencia entre las Md de PO010816 AMC (3.19) y PO010816 OZU (2.67) se asocia a la segregación de las partículas en función de la dirección preferencial de los vientos.

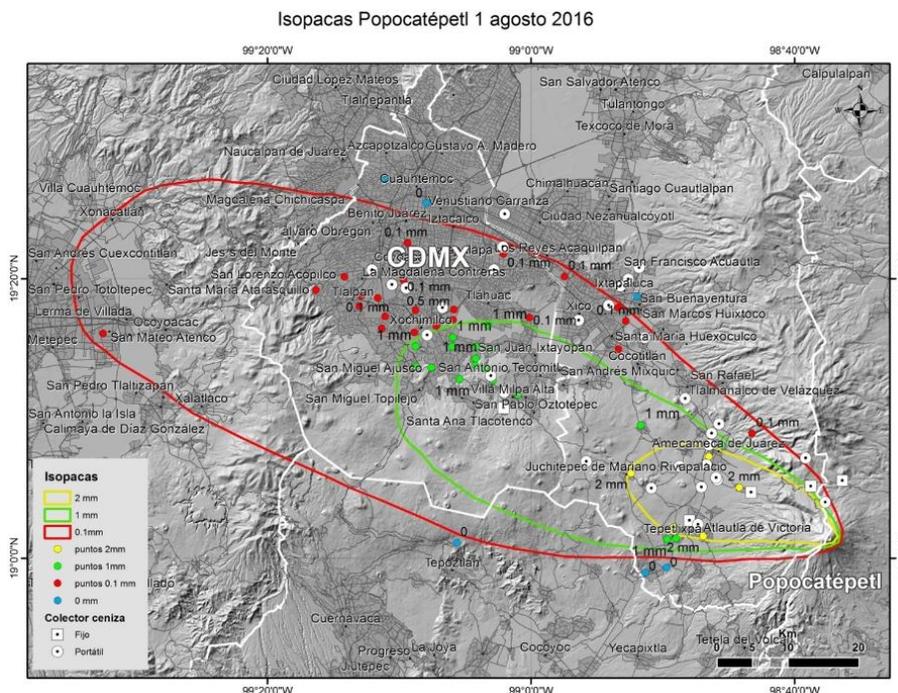


Fig. 32. Isopacas de la emisión del 1 de agosto de 2016 (Elaboración conjunta del grupo de trabajo de la Dra. Ana Lillian Martin Del Pozzo).

Un aspecto importante de estas cenizas de 2016 generadas en eventos de emisión constante, es que la abundancia de sus componentes está caracterizada por la presencia de cristales pequeños (plagioclasas y piroxenos rotos) y vidrio vesiculado (Fig. 19, 21 y 22). En el caso de las cenizas PO180416 y PO010816 hay una variación en la abundancia de vidrios y cristales, dada por la fracción de tamaño de

las partículas (Φ) revisadas, es decir, las cenizas en su fracción fina ($\Phi > 4.75$) están conformadas por un alto contenido de vidrio respecto a los otros componentes, mientras que la fracción gruesa (3Φ) o total tienen un mayor contenido de cristales (Tabla 5; Fig. 23). En estas cenizas el contenido de material juvenil lítico es muy bajo, mientras que los líticos accidentales fueron escasos (Tabla 5; Fig. 21 y 33). La emisión de PO180416 también se caracterizó por la presencia de pequeñas escorias gris claro en las cercanías del volcán y de olivino (Fig. 19 y 22).

Las cenizas colectadas a distancias similares de la fuente (PO010816 AMC y PO011816 ZOY), mantienen una abundancia semejante de los componentes (Tabla 5, Fig. 23). Sin embargo, hay variación con las cenizas PO010816 OZ 3ϕ , que tienen un mayor contenido de cristales (61%) respecto al vidrio dominante en las otras muestras. Esto se encuentra influenciado por el tamaño de las partículas analizada, ya que el material fino está constituido principalmente por vidrio.

Es importante mencionar que los componentes identificados en las cenizas estudiadas de 2016 (PO240116 SJT, PO180416 y PO010816) corresponden con los identificados con anterioridad en el volcán (líticos, cristales y vidrio). Los olivinos encontrados en las cenizas PO180416 CAL son producto de la emisión continua del 18 de abril de 2016.

Las escorias y el olivino presentes en PO180416 CAL, y el vidrio vesiculado de PO010816 OZU, indican la entrada de un pulso magmático con mayor contenido de gases y minerales ferromagnesianos (Fig. 17, 19 y 20). Este nuevo pulso magmático pudo provocar inestabilidad en el sistema volcánico, generando así la emisión continua de cenizas caracterizadas por abundante vidrio y vesículas debido a la rápida expulsión del material. La abundancia de material fino presente en estas cenizas refleja una fuerte explosividad (mayor fragmentación) en estos eventos (Fig. 10).

El contenido de SiO_2 varió entre 58.86 y 60.10% para las cenizas de 2016, indicando una composición andesítica, y se encuentra dentro del rango de SiO_2 analizado previamente (Tabla 8, Fig. 26).

Las tres fechas en que ocurrieron estos eventos de emisión constante estudiados de 2016, CENAPRED reportó, con apoyo de sobrevuelos y observaciones, el inicio de la formación de nuevos domos volcánicos. Estos domos, con información de CENAPRED y con la interpretación de los resultados, corresponderían con la formación del domo #63 a finales de enero, el domo #66 con el evento del 18 de abril y el domo #69 con la actividad eruptiva del 31 de julio y 1 de agosto (Fig. 33).

En la Fig. 33. se muestra la relación entre las columnas eruptivas, los componentes de las cenizas y los ciclos de destrucción de los domos de lava. La región en negro de los rectángulos corresponde con las fechas establecidas por CENAPRED para el inicio y/o destrucción de los domos de lava. Las regiones grises son las fechas de construcción y/o destrucción de los domos propuestas en este trabajo.

A diferencia de las cenizas de emisión constante, las cenizas analizadas correspondientes al evento explosivo del 4 de abril de 2016 (SX050416) tiene características diferentes. Está constituida por los mismos componentes, pero la proporción entre ellos varía. En estas cenizas predominan los líticos vítreos angulosos (98%) respecto a los otros componentes, indicando la fragmentación de un material solidificado y desgasificado (Tabla 5, Fig. 23 y 33). De acuerdo con CENAPRED, la explosión del 3 de abril ocurrió cuando el domo de lava había sido destruido por las explosiones previas ocurridas a finales de marzo y principios de abril. De tal manera que este pudo ser todavía una explosión de destrucción del domo #65 restante (Fig. 33).

Al considerar los eventos de emisión constante como periodos de alimentación de domos de lava y a las explosiones como eventos de destrucción de domos se interpretó la actividad volcánica para marcar los ciclos de formación y destrucción de los domos de 2016. En este periodo hubo la ocurrencia de 9 domos de lava, del #63 al #71 (Fig. 33).

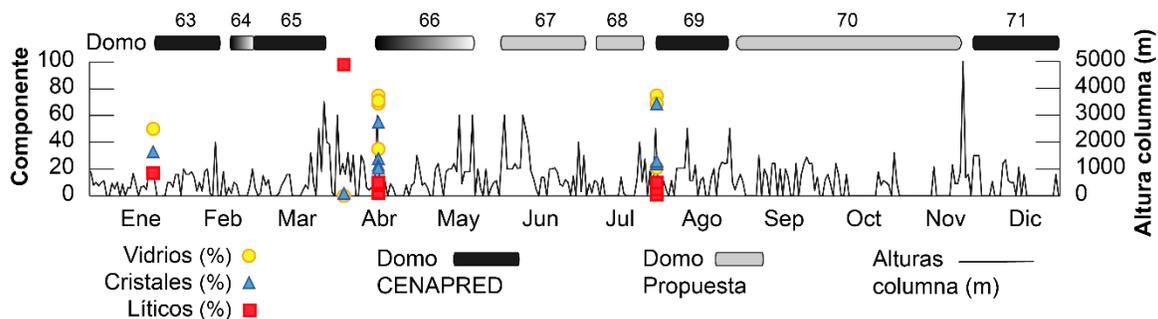


Fig. 33. Actividad volcánica, componentes de cenizas y ciclos de formación y destrucción de domos en 2016.

Las cenizas generadas durante episodios de emisión constante en 2017 corresponden a las cenizas PO090717, PO270917 y PO101217.

La muestra PO090717 SPN a diferencia de las muestras de 2016, tienen una mayor abundancia de componentes líticos vítreos angulosos (46%) respecto a los cristales (41%) y vidrio (14%, Tabla 6, Fig. 24). El día que fue recolectada PO090717 se registraron explosiones menores y trenes de exhalación (destrucción parcial del restante del domo #74 y formación del domo #75), lo que pudo influenciar en el contenido similar de cristales y líticos, y poco vidrio (Tabla 11).

Las cenizas PO270917 tienen una mayor abundancia de vidrio claro con 76%, causado por un rápido ascenso y enfriamiento del material magmático (Tabla 6, Fig. 24). Aunque la abundancia de sus componentes es similar a algunas de las cenizas PO180416 y PO010816 (de emisión constante), tiene un tamaño de partículas más gruesas. Su mayor concentración se encuentra en 3Φ y tiene una Md de 2.6, aunque este valor es similar al de PO010816 OZ, está muestra fue colectada más lejos de

la fuente y la altura de la columna eruptiva del evento es menor a las de 2016 alcanzando 2 km de altura (Tabla 10 y 11). Dada la lejanía al volcán, se esperaría que el material precipitado fuera más fino, lo cual puede ser el resultado de un evento eruptivo más energético.

Adicionalmente, en esta fecha (PO270917) fue posible identificar cristobalita de ~12 μm . Este evento eruptivo se asocia con un periodo de alimentación de crecimiento del domo de lava #76.

Las cenizas PO101217 tienen un mayor contenido de cristales pequeños (65% de cristales) y vidrio vesicular (15% de vidrio). Este tipo de componentes podría estar relacionado a la descomprensión. Sus porcentajes de abundancia y distancia de recolección son similares a las cenizas PO180416 SPCH.

Las dos muestras de ceniza de esta fecha (PO101217 SPCH/PUE) tienen una distancia de recolección considerable entre los puntos de muestreo que no genera un cambio significativo en la abundancia de sus componentes. La altura de la columna de este evento eruptivo es desconocida debido a la nula visibilidad mientras ocurría por la nubosidad y este evento podría estar relacionado con un aporte de material magmático al domo #77 (Fig 34).

Las cenizas de explosiones en 2017 son PO120617, PO020717, PO070717, PO210817, PO260817, PO011017, PO121017 Y PO181117. La mayoría de estas cenizas tienen un alto contenido de líticos vítreos superior al 77%, con excepción de PO260817, PO020717 y PO011017 (Tabla 6, Fig. 24).

En las cenizas del PO120617 (TLAC/TV), la muestra más lejana tiene un mayor contenido de líticos (88%, 27 km) sobre la más cercana (81%, 18 km).

Existen similitudes en los valores de Md en algunas muestras, sin embargo, pueden tener abundancia de componentes y distancia de recolección diferentes. Las cenizas PO020717 AMC (explosión de destrucción parcial del domo #74) y PO210817 TLY (la cual fue una explosión que generó una columna eruptiva de 4 km de altura y corresponde con la destrucción del domo #75) tienen una Md de 3.05 y 3.03, para PO020717 AMC tiene una menor cantidad de líticos que PO210817 TLY, su granulometría abarca de 3 a 5 phi y fue colectada a 18 km, mientras que PO210817 TLY tiene mayor contenido de líticos vítreos, una granulometría entre 3 a >5phi (con material más fino) y fue recolectada a una distancia de 38 km. Las cenizas de PO260817 PSC están asociadas a exhalaciones de baja a media intensidad. Tiene una cantidad similar de componentes líticos y cristales. (Tabla 3, 4 y 6; Fig. 24, 34).

Las cenizas PO011017 OCU, emitidas por una explosión de 2 km de altura se asocian a la destrucción parcial del domo #76, y PO181117 TV, la explosión de destrucción del domo #77, muestran una Md similar de 2.59 y 2.5, respectivamente, lo que indica un bajo grado de fragmentación del material (Tabla 4).

La abundancia de los componentes entre PO011017 OCU y PO181117 TV es variable entre sí. Las cenizas PO011017 OCU tienen un contenido de líticos vidrios grandes y angulosos (44%), mientras que PO181117 TV tiene 89% de líticos vidrios (Fig. 34).

Las cenizas que están compuestas principalmente por líticos vítreos oscuros (PO120617, PO020717, PO070717, PO210817, PO260817, PO011017, PO121017 Y PO181117) se considera que están relacionadas a un ascenso y enfriamiento menos rápido (Fig. 24 y 34).

Con base en la información de este año, se observa que las cenizas generadas en explosiones parciales tienen un mayor contenido de cristales que de líticos, mientras que las cenizas de destrucción total tienen más líticos. Además de que en este año se formaron los domos 71 a 77 (Fig. 34).

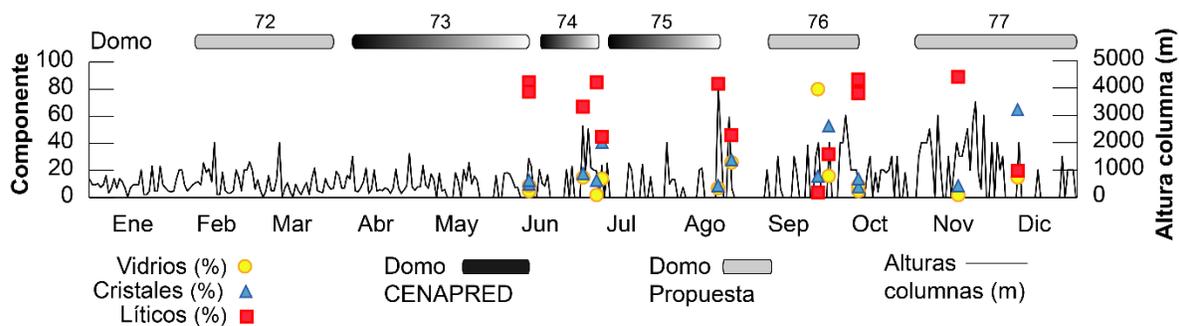


Fig. 34. Actividad volcánica, componentes de cenizas y ciclos de formación y destrucción de domos en 2017.

En 2018, las cenizas colectadas durante eventos de emisión constante corresponden a las muestras PO310718, PO170918, PO190918 y PO211118. Estas cenizas tienen una composición similar a las de 2017, hay más contenido de cristales y líticos vítreos respecto al vidrio (Tabla 7; Fig. 25 y 35).

Las cenizas PO310718 tienen una variación en sus componentes respecto a la orientación del punto de colecta y el volcán, y respecto a su cercanía. La altura de la columna en este evento fue de 2 km (Tabla 10).

Las cenizas PO310718 OZ y PO310718 ECT, colectadas al oeste-suroeste del volcán tienen una abundancia alta de cristales pequeños y vidrio vesiculado, además de que la muestra PO310718 ECT tiene una de las Md más alta (3.39) y su distribución es muy similar a PO180416 AMOX (Tabla 4; Fig. 13, 25).

La alta cantidad de partículas finas en las cenizas PO310718 se relaciona con un alto grado de fragmentación del material. A su vez, el material vesiculado sugiere que este evento eruptivo está relacionado con una mezcla de magmas que lo enriquece de gases y desequilibra el sistema generando una expulsión rápida de

material magmático (alto contenido de vidrio y cristales pequeños) de manera similar al 18 de abril de 2016 (PO180416).

Las cenizas colectadas al noroeste PO310718 PRR tienen bajo contenido de vidrio (16%), y mayor contenido de cristales (53%, Tabla 7). En ambas direcciones (oeste-suroeste y noroeste), las cenizas más lejanas al volcán están enriquecidas con un mayor contenido de cristales (PO310718 OZU y PO310718 PRR). Los piroxenos, con composiciones de augitas y enstatitas, tienen un % de SiO₂ de 50.99 a 55.07 (valor más alto en concentración de SiO₂ para piroxeno en el periodo estudiado), similar a los reportados por Straub y Martin Del Pozzo (2001). Este evento estuvo relacionado con un aporte magmático en la formación del domo #79 (Fig. 28 y 35).

En el caso de las cenizas PO170918 la muestra más lejana tiene un mayor contenido de vidrio, y de PO190918 la abundancia varía respecto a la orientación de la muestra respecto al volcán. Las cenizas al oeste tienen un mayor contenido de líticos, mientras que las cenizas al noroeste tienen mayor contenido de cristales. La altura de estos eventos eruptivos no pudo ser confirmada (Tabla 10; Fig. 25).

Las cenizas del periodo de septiembre y principios de octubre, tanto de emisiones constantes como explosiones, y las emisiones coinciden con incrementos en el temblor. Esto se vincula al ciclo de construcción y destrucción parcial del domo #80 (Fig. 35).

El contenido de SiO₂ en las muestras PO310718 ECT y PO190918 OZU, se encuentra un poco elevado respecto a los valores obtenidos para las muestras de 2016 correspondientes a eventos de emisión constante, coincidiendo con algunos de los valores más altos de SiO₂ en los cristales. Con esta información, sabemos que las cenizas mantuvieron una composición andesítica (Tabla 8). La muestra con mayor contenido de SiO₂ corresponde al análisis realizado únicamente de la fracción fina (PO310718 ECT FINA) constituida principalmente de vidrio y cristales de plagioclasa (Tabla 8, Fig. 26)

Las cenizas PO211118 TL, generadas en una columna eruptiva de 1.2 km y relacionada con un incremento en el temblor, tienen una abundancia de componentes muy similar entre sí a pesar de la distancia de recolección entre las muestras (4, 7 y 20 km de distancia). La abundancia de sus componentes es similar entre los 3 componentes líticos angulosos, cristales grandes (algunas plagioclasas zonadas y/o rotas) y vidrio, pero sí existe una mayor abundancia de líticos. Su Md (2.71) y distribución en el tamaño de grano es similar al evento de PO270917 ATLH (Fig. 11 y 12, Tabla 4). Las plagioclasas de composición andesina y, andesinas y labradoritas esta muestra tienen una composición similar de SiO₂ de 53.73 a 60 y álcalis de 4.53 a 7.12% (mismo rango que Straub y Martin Del Pozzo, 2001), y sus piroxenos (pigeonita, pigeonita y enstatita, y wollastonita) de 47.83 a 54.27, más bajos en SiO₂ (>51.95, Fig. 27, 28 y 29). Este evento está relacionado a la formación del domo #81 (Fig.35).

El evento que produjo las cenizas PO211118 TL, a diferencia de otros eventos de emisión continua tuvo una menor explosividad (menor fragmentación) generando una columna eruptiva de menor altura (1200 m) y menos cantidad de partículas finas (1.4% de material $>4\phi$, Tabla 10; Fig. 13). Sin embargo, la presencia de plagioclasas con zoneamiento inverso y su contenido de vidrio, nos indica una interacción con un magma menos evolucionado al igual que en cenizas de años pasados como PO180416.

Las cenizas generadas por explosiones, analizadas son PO30310118, PO040918, PO110918, PO200918, PO21230918, PO240918, PO290918, PO051018, PO061018, PO111018, PO121018 (Tabla 10 y 11).

La explosión que ocurrió el 30 de enero que generó una columna eruptiva superior a los 3 km de altura, y otras explosiones menores ocurridas posteriormente, todas relacionadas a la destrucción del domo #77, resultaron en cenizas PO30310118 PSC con un alto contenido de líticos vítreos angulosos (80%) y cristales grandes (Fig. 35). Las cenizas emitidas tienen la distribución de tamaño más amplia del periodo estudiado, con las partículas más grandes (-1Φ) y la Md más pequeña de 1.3 (Tabla 4). Esto se relaciona con un evento eruptivo que genere menor fragmentación del material y, al ser una explosión destructora de un domo, podemos encontrar líticos vítreos y cristales grandes y muy poco vidrio (Fig. 25).

En las cenizas PO30310118 PSC las plagioclasas tienen una variación de SiO₂ entre 54.24 a 61.91% y de álcalis de 5.03 a 5.94%. Los piroxenos cambian de 50.95 a 53.52% de SiO₂ (Fig. 27 y 28).

Las cenizas PO040918, PO110918, PO240918, PO051018, PO061018 y PO081218 tienen una abundancia de componentes similar entre sí con un predominio del componente lítico vítreo, que va de 67% a 89%. Las cenizas PO240918 ATT/OZ tienen una abundancia similar de componentes aun cuando hay una distancia considerable entre los puntos de muestreo (Fig. 25).

Las cenizas de PO21230918 tienen una abundancia equitativa entre el contenido de líticos y cristales, con una composición química similar (SiO₂ de 60.22%), a la obtenida por las emisiones constantes de este año (Tabla 8, Fig. 26).

Las cenizas de PO290918 que se generaron en una explosión y que provocaron la caída de cenizas en la CDMX, muestra una abundancia de componentes similar entre las muestras cercanas entre sí, es decir, las cenizas de OZ y SPN tienen una composición muy similar entre ellas, y las cenizas colectadas en la CDMX (THA y CUL), con mayor contenido de cristales, son similares entre sí. La ceniza de ATT, colectada en un punto medio, tiene una composición intermedia entre los dos pares mencionados con anterioridad. Recordemos que las explosiones de septiembre de 2018 están relacionadas a destrucción parcial del domo #80 (Fig. 35).

Las cenizas de PO200918 JUC y PO111018 tienen una composición similar a las de la CDMX de PO290919 y son las cenizas producidas por explosiones con menor contenido de líticos.

Las explosiones con un mayor contenido de líticos vitreos respecto a los otros componentes se relacionan con la destrucción parcial o total de domos de lava que se han formado por un ascenso lento de material magnético y su enfriamiento. El tamaño preferencial de las partículas tiende a ser grueso ($<4\phi$), por lo que la fragmentación de este material no es tan explosiva.

Con la información de las cenizas y la actividad volcánica, se puede decir que los domos que se presentaron en este año van del 77 al 81 (Fig. 34).

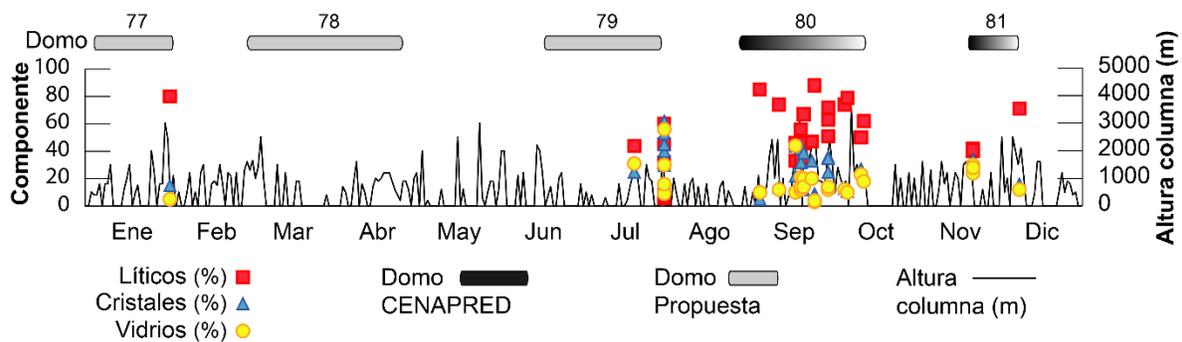


Fig. 35. Actividad volcánica, componentes de cenizas y ciclos de formación y destrucción de domos en 2018.

Las variaciones oscilatorias en el contenido de MgO y CaO de los cristales de plagioclasa y piroxeno pueden ser indicativos de la entrada de pulsos diferentes de magma en el sistema volcánico (Fig. 26, 27 y 28)

El balístico del 15 de diciembre de 2018 apoya la idea de la mezcla de magmas ya que cuenta con una parte clara y otra oscura que evidencian composiciones diferentes en el sistema volcánico. La parte clara tiene una composición dacítica, mientras que la oscura una composición andesítica (Fig.24 y 25).

8 Conclusiones

Las características principales de las cenizas volcánicas del Popocatepetl (granulometría, componentes, forma y composición química) se encuentran relacionadas con el evento eruptivo que las genera. En el volcán se identificaron dos mecanismos: explosiones y emisiones continuas (actividad estromboliana o trenes de exhalaciones y explosiones).

La ceniza volcánica del Popocatepetl está constituida principalmente de líticos vítreos, cristales de plagioclasa y piroxeno, así como de vidrio claro. Fueron identificados cristales de enstatita, pigeonita, augita, wollastonita, andesina y labradorita. Adicionalmente pueden encontrarse otros componentes como líticos del domo, líticos accidentales, olivino, cristobalita, vidrio oscuro y escoria grisácea.

La distribución del tamaño de grano de las cenizas está relacionada con los componentes de esta. Las cenizas con mayor cantidad de material fino, contienen mucho vidrio claro y cristales. Las cenizas con mayor contenido de grano medio – grueso y con fragmentos angulosos están constituidas principalmente por líticos.

Las cenizas con alto contenido en vidrio claro son generalmente producidas por un tren de exhalaciones (actividad estromboliana), los cuales generan grandes cantidades de material y que están ocasionalmente asociadas a tremor armónico. Las cenizas de eventos de emisión constante, aun cuando sean colectadas en las cercanías al volcán, tienden a ser de granos más finos que las generadas por explosiones.

La variación en la abundancia y tamaño de partículas puede cambiar respecto a la dirección preferencial de los vientos en el momento de la emisión y por mismos cambios en la dinámica eruptiva, es decir, en un mismo evento eruptivo podremos tener cenizas con características diferentes.

Los eventos de emisión constante se encuentran relacionados a inicios y aportes de material magmático durante la formación de un domo de lava. Mientras que las explosiones se vinculan a los eventos de destrucción parcial y total de los domos.

La composición química del volcán nos indica que las cenizas provienen de un magma andesítico, el cual tiene una composición que muestra también las variaciones reportadas por Straub y Martín del Pozzo (2001).

La presencia de material vesicular, plagioclasas con contenido oscilatorio de CaO y los cristales de olivino encontrados en cenizas generadas durante eventos de emisión continua pueden deberse a la entrada de un nuevo magma rico en gases y con mayor contenido de hierro, magnesio y calcio. El balístico de diciembre 2018 forma parte de la evidencia de mezcla de magmas con un componente andesítico y otro dacítico.

La mezcla de magmas desequilibra el sistema, lo que provoca una expulsión violenta y rápida de material generando así cenizas finas (tamaños pequeños) y abundante vidrio.

Los domos son destruidos por explosiones con bajo grado de fragmentación por lo que las partículas tienden a ser grandes. Al estar constituidas principalmente por líticos vítreos, no se relaciona con un desequilibrio en el sistema causado por la entrada de un nuevo magma.

Se puede concluir que las cenizas con un alto contenido de líticos y tamaños de partículas medias a gruesas estuvieron asociadas a explosiones destructoras de domos. Las cenizas con mayor contenido de cristales y/o vidrio, y con tamaños de partículas pequeños son producidas cuando hay aportes de material magmático durante la alimentación de magma y se asocia posiblemente a un conducto más abierto.

9 Referencias

1. Armienta, M.A., Martín Del Pozzo, A.L., Espinasa, R., Cruz, O., Cenicerros, N., Aguayo, A. y Butron, A. (1998). Geochemistry of ash leachates during the 1994-1996 activity of Popocatepetl volcano. *Applied Geochemistry*, 13 (7), 841-850.
2. Bonadonna, C. y Houghton, B.F. (2005). Total grain-size distribution and volume of tephra-fall deposits. *Bulletin of Volcanology*, 67 (5), 441-456.
3. Bonadonna, C., Costa, A., Folch, A., Koyaguchi, T. (2015). Chapter 33 - Tephra Dispersal and Sedimentation. En Sigurdsson, H (Ed), *The Encyclopedia of Volcanoes*, Academic Press, 587-597.
4. Bustillos, J., Romero, J.E., Guevara, A. y Díaz-Alvarado, J. (2018). Tephra fallout from the long-lasting Tungurahua eruptive cycle (1999-2014): Variations through eruptive style transition and deposition processes. *Andean Geology*, 45 (1), 47-77
5. Campion, R., Delgado-Granados, H., Legrand, D., Taquet, N., Boulestelx, T., Pedraza-Espitía, S., Lecocq, T. (2018). Breathing and Coughing: the extraordinarily high degassing of Popocatepetl volcano investigated with an SO₂ camera. *Frontiers in Earth Science*, 6: 163, 1-16.
6. Carey, S. y Bursik, M. (2015). Chapter 32 - Volcanic Plumes. En Sigurdsson, H (Ed), *The Encyclopedia of Volcanoes*, Academic Press, 571-585.
7. Cashman, K.V., Hoblitt, R.P. (2004). Magmatic precursors to the 18 May 1980 eruption of Mount St. Helens, USA. *Geology*, 32(2), 141-144.
8. Cashman K. y Rust A. (2016). Volcanic ash: Generation and Spatial Variations. En S. Mackie, K. Cashman, H. Ricketts, A. Rust y M. Watson (Ed.) *Volcanic Ash. Hazard Observation*. Elsevier. pp 5-22.
9. Cashman K. y Scheu, B. (2015). Magmatic Fragmentation. En Sigurdsson, H (Ed), *The Encyclopedia of Volcanoes*, Academic Press, 459-471.
10. Centro Nacional de Prevención de Desastres. <https://www.cenapred.unam.mx/reportesVolcanGobMX/>
11. Cook, E. (1965). Stratigraphy of Tertiary volcanic rocks in eastern Nevada. *Nev. Bur. Mines, Rept. 11*, 66 p.
12. Cox, K.G., Bell, J.D y Pankhurst, R.J. (1979). *The Interpretation of Igneous rocks*. Springer. 450 p.
13. Cronin, S.J., Stewart, C., Zernack, A.V., Brenna, M., Procter, J.N., Pardo, N., Christenson, B., Wilson, T., Stewart, R.B. e Irwin, M. (2014). Volcanic ash leachate compositions and assessment of health and agricultural hazards from 2012 hydrothermal eruptions, Tongariro, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 286, 233-247.
14. Daga, R., Ribeiro Guevara, S., Sánchez, M.L. & Arribére, M. (2006). Geochemical characterization of volcanic ashes from recent events in Northern Patagonia Andean Range by INAA. *Journal of Radionalytical and Nuclear Chemistry*, 270 (3), 677-694.
15. Dufek, J. y Manga, M. (2008). In situ production of ash in pyroclastic flows. *Journal of Geophysical Research*, 113, 1-17.

16. Espinasa-Pereña, R., Martín Del Pozzo, A.L. (2016). Morphostratigraphic evolution of Popocatepetl volcano, México. Geological Society of America, Special Paper 402, 115-137.
17. Fisher, R.V. (1961). Proposed classification of volcaniclastic sediments and rocks. The Geological Society of America Bulletin, 72 (9), 1409-1414.
18. Folch, A. (2012). A review of tephra transport and dispersal models: Evolution, current status, and future perspectives. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 235-236, 96-115.
19. Folch, A., Costa, A. y Macedonio, G. (2009). FALL 3D: A computational model for transport and deposition of volcanic ash. Computers & Geosciences, 35 (6), 1334–1342.
20. Gaunt, H. E., Bernard, B., Hidalgo, S., Proaño, A., Wright, H., Mothes, P., Criollo, E. y Kueppers, U. (2016). Juvenile magma recognition and eruptive dynamics inferred from the analysis of ash time series: The 2015 reawakening of Cotopaxi volcano. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 328, 134 – 146.
21. Gómez, D., Smichowski, P., Polla, G., Ledesma, A., Resnizky, S. y Rosa S. (2002). Fractionation of elements by particle size of ashes ejected from Copahue Volcano, Argentina. Journal of Environmental Monitoring, 4, 972-977.
22. Heiken, G., y Wohletz, K.H. (1985). Volcanic Ash. University of California Press, Berkeley, 245 p.
23. Horwell, C.J. (2007). Grain-size analysis of volcanic ash for the rapid assessment of respiratory health hazard. Journal of Environmental Monitoring, 9(10), 1107-1115.
24. Horwell, C.J. y Baxter, P.J. (2006). The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation. Bulletin of Volcanology, 69, 1-24.
25. Hantusch, M., Lacanna, G., Ripepe, M., Montenegro, V., Valderrama, O., Farias, C., Casilli, A., Gabellini, P. y Cioni, R. (2021). Low-Energy Fragmentation Dynamics at Copahue Volcano (Argentina) as Revealed by an Infrasonic Array and Ash Characteristics. Frontiers in Earth Science, 9, 1-15.
26. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). <http://www.inegi.org.mx/>
27. Langmann, B., Folch, A., Hensch, M. y Matthias, V. (2012). Volcanic ash over Europe during the eruption of Eyjafjallajökull on Iceland, April-May 2010. Atmospheric Environment, 48, 1-8-
28. Le Maître. (2002). Igneous Rocks: A classification and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge University Press. 256 p.
29. Martín Del Pozzo, A.L. (2012). Precursors to eruptions of Popocatepetl Volcano, Mexico. Geofísica Internacional, 51(1), 87-107.

30. Martin-Del Pozzo, A.L., Aceves, F., Espinasa, R., Aguayo, A., Inguaggiato, S., Morales, P. y Cienfuegos, E. (2002a). Influence of volcanic activity on spring water chemistry at Popocatepetl Volcano, Mexico. *Chemical Geology*, 190 (1-4), 207-229.
31. Martin Del Pozzo A. L., Cifuentes G., Cabral Cano E., Bonifaz R., Correa E. y Mendiola I. F. (2003). Timing magma ascent at Popocatepetl Volcano, Mexico, 2000-2001. *Journal of volcanology and Geothermal Research*, 125 (1-2), 107-120.
32. Martin Del Pozzo, A. L., Cifuentes-Nava, G., Cabral-Cano, E., Sánchez-Rubio, G., Reyes, M., Martínez-Bringas, A., García E. y Arango-Galván, C. (2002b). Volcanomagnetic signal during the recent Popocatépetl (México) eruptions and their relation to eruptive activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113 (3-4), 415 – 428.
33. Martin-Del Pozzo, A.L., Espinasa-Pereña, R., Armienta, M.A., Aguayo, A., Reyes, M., Sánchez, G., Cruz, O., Cenicerros, N., Lugo, J., González V., Butrón, M.A. y Villarreal, M. (1995). La emisión de cenizas y variaciones geoquímicas durante diciembre-marzo en el volcán Popocatépetl in *Volcán Popocatépetl Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995*. Centro Nacional de Prevención de Desastres, UNAM, México, DF, 285-294.
34. Martin Del Pozzo, A. L., González Moran, T., Espinosa Pereña R., Butron M. A. y Reyes M. (2008). Characterization of the recent ash emissions at Popocatepetl Volcano, Mexico. *Journal of volcanology and Geothermal Research*, 170 (1-2), 61-75.
35. Martin Del Pozzo, A.L. y Mendiola, F. (2002). Las cenizas volcánicas. En CENAPRED (Ed), *Las cenizas volcánicas del Popocatépetl y sus efectos para la aeronavegación e infraestructura aeroportuaria*. Centro Nacional de Prevención de Desastres - Instituto de Geofísica, UNAM. 164 p.
36. Miranda, J., Delgado, H., Huggel, C. y Kääb. A. (2008). Impact of the eruptive activity on glacier evolution at Popocatépetl Volcano (México) during 1994–2004. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170 (1-2), 86-98.
37. Miwa, T., Geshi. N. y Shinohara, H. (2013). Temporal variation in volcanic ash texture during a vulcanian eruption at the Sakurajima volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 260, 80-89.
38. Miwa, T., Toramaru, A. y Iguchi, M. (2009). Correlations of volcanic ash texture with explosion earthquakes from vulcanian eruptions at Sakurajima volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 184, 473-486.
39. Nieto Torres A. y A. L. Martin Del Pozzo. (2017). Actividad reciente en el Popocatépetl 1993-2016. En *Monografía 22*, Instituto de Geofísica. 60-70.
40. Nieto, A. y Martin Del Pozzo, A.L. (2021). Ash emission from a long-lived eruption at Popocatépetl volcano and mapped respiratory effects. *Bulletin of Volcanology*, 83(68), 1-17.

41. Nurfiani, D. y Bouvet de Maisonneuve, C. B. (2018). Furthering the investigation of eruption styles through quantitative shape analyses of volcanic ash particles. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 354, 102 – 114.
42. Paez, P.A., Gogliati, M.G., Caselli, A.T. y Monasterio, A.M. (2021). An analysis of volcanic SO₂ and ash emissions from Copahue volcano. *Journal of South American Earth Sciences*, 110, 1-15.
43. Paredes-Mariño, J., Scheu, B., Monranaro, C., Arciniega-Ceballos, A., Dingwell, D.B. y Perugini, D. (2019). Volcanic ash generation: Effects of componentry, particle size and conduit geometry on size-reduction processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 514, 13-27.
44. Poulidis, A., Takemi, T., Shimizu, A. y Iguchi, M. (2018). Statistical analysis of dispersal and deposition patterns of volcanic emissions from Mt. Sakurajima, Japan. *Atmospheric Environment*, 179, 305-320.
45. Rodríguez, H. (2004). Volcanic ash impact on international airport of Mexico City (AICM) due to emissions of Popocatepetl volcano in Proceedings of the 2nd international conference on volcanic ash and aviation safety, NOAA Office of the Federal Coordinator for Meteorology, Alexandria, 21–24 June 2004, 4/15–17.
46. Rojas M., Catalán M., Martin Del Pozzo A. L., Villalba J. y Pérez-Neria, J. (2001). Seven Month prospective Study of the Respiratory Effects of Volcanic Ash from Popocatepetl. *Environmental Geochemistry and Health* 23, 383–396.
47. Shoji, D., Noguchi, R., Otsuki, S. y Hino, H. (2018). Classification of volcanic ash particles using a convolutional neural network and probability. *Scientific Reports* 8.
48. Schmid, R. (1981). Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments. *Geologische Rundschau*, 70 (2), 794-799.
49. Smichowski, P., Gómez, D., Rosa, S. y Polla, G. (2003). Trace elements content in size-classified volcanic ashes as determined by inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Microchemical Journal*, 75, 109-117.
50. Sosa-Ceballos, G., Gardner, J.E., Siebe, C. y Macías, J.L. (2012). A caldera-forming eruption ~ 14,100 14C yr BP at Popocatépetl volcano, México: Insights from eruption dynamics and magma mixing. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 213-214, 27-40.
51. Straub, S. y Martin-Del Pozzo, A. (2001). The significance of phenocryst diversity in tephra from recent eruptions at Popocatepetl volcano (central Mexico). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140 (4), 487 – 510.
52. Valdés, C., De la Cruz, S., Martínez, A., Quaas Weppen, R., Guevara, E. (2002). Resumen de la actividad del volcán Popocatépetl de diciembre 1994 a mayo 2001. En las cenizas volcánicas del Popocatépetl y sus efectos para la Aeronavegación e infraestructura Aeroportuaria.
53. Walker, G. P. L. (1971). Grain-Size Characteristics of Pyroclastic Deposits. *The Journal of Geology*, 79 (6), 696-714.

54. Watanabe K., Danhara, T., Watanabe, K., Terai, K. y Yamashita T. (1999). Juvenile volcanic glass erupted before the appearance of the 1991 lava dome, Unzen volcano, Kyushu, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 89 (1-4), 113-121.
55. Woodhouse, M.J., Hogg, A.J., Phillips, J.C. y Sparks, S.J. (2013). Interaction between volcanic plumes and wind during the 2010 Eyjafjallajökull eruption, Iceland. *Journal of Geophysical Research*, 118, 92-109.
56. Zimanowski, B., Büttner, R., Dellino, P., White, J.D.L. y Wohletz K.H. (2015). Chapter 26 – Magma – Water Interaction and Phreatomagmatic Fragmentation. En Sigurdsson H., Houghton, B., Rymer, H., Stix, J. y McNutt, S. *The Encyclopedia of Volcanoes*, 473-484.