





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.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESTUDIO DE LOS DEPÓSITOS DE AVALANCHAS  
DEL DOMO NORTE DE “LAS DERRUMBADAS”,  
PUEBLA, MÉXICO: ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS Y  
COMPONENTES**

**T E S I S**

Que para obtener el título de:

**LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA  
TIERRA**

**P R E S E N T A**

**JULIO CÉSAR PINEDA SERRANO**



**DIRECTORA DE TESIS:**

**MARIE NOËLLE GUILBAUD**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2022.

Se perdió mucho en el camino, pero seguimos  
avanzando.

## Contenido

Agradecimientos .....	7
Resumen .....	8
Problemática y Objetivos .....	9
1. Marco teórico .....	10
1.1 Conceptos generales sobre la vulcanología .....	10
1.2 Domos volcánicos .....	13
1.2.1 Definición .....	13
1.2.2 Mecanismos de crecimiento.....	13
1.2.3 Tipos de domos de lava .....	15
1.2.4 Peligros asociados a las erupciones de domos de lava .....	15
1.3 Avalanchas volcánicas .....	17
1.3.1 Definición .....	17
1.3.2 Factores que propician y disparan el colapso de un edificio volcánico .....	18
1.3.3 Mecanismos de transporte.....	18
1.3.4 Estructura general de los depósitos .....	19
1.3.5 Diferentes tipos de depósito de avalancha.....	20
1.3.6 Descripción de los depósitos de avalancha de escombros .....	20
1.3.7 Peligros y riesgos asociados a las avalanchas de escombros .....	22
2. Marco geológico .....	23
2.1 Faja Volcánica Transmexicana.....	23
2.2 Cuenca Serdán-Oriental.....	26
2.2.1 Estratigrafía de la cuenca .....	30
3. Metodología .....	34
4. Resultados.....	38
4.1 Región NE: Avalancha Atexcac.....	39
4.2 Región NO: Depósitos de Lahares .....	48
4.3 Región O: Avalancha Emilio Portes Gil .....	52
4.4 Región NE: Avalancha Las Águilas .....	60
4.5 Petrografía .....	65
5. Análisis de resultados y discusión.....	71
6. Conclusiones. ....	76
Referencias .....	77
Anexo. ....	82

## Índice de tablas

1.1D. Distintos estilos eruptivos.....	12
1.1E. Clasificación de clastos por tamaño.....	13
1.2B. Tipos de domo.....	15
2.1C. Sectores de la FVTM.....	24
A1. Resultados de la granulometría.....	82
A2. Resultados del análisis de componentes.....	83

## Índice de figuras

1.1A. Clasificación química de las rocas ígneas según su contenido en sílice (SiO <sub>2</sub> ).....	10
1.1B. Viscosidad de un magma silicatado.....	11
1.1C. Solubilidad del gas en un magma silicatado.....	11
1.2A. Domo de lava del volcán Soufrière Hills, Montserrat.....	14
1.2C. Esquema de los peligros asociados a la actividad volcánica en general.....	16
1.3A. Fotografía del Monte Santa Helena en 1981.....	17
1.3B. Sección transversal que muestra las características tempranas de la avalancha.....	20
2.1A. Principales provincias magmáticas continentales de México.....	23
2.1B. Ubicación de los cuatro sectores de la Faja Volcánica Transmexicana.....	24
2.1D. Episodios magmáticos de la FVTM.....	26
2.2A. Localización del área de la Cuenca Serdán-Oriental.....	27
2.2B. Ubicación de Las Derrumbadas dentro de la Faja Volcánica Transmexicana.....	28
2.2C. Vista satelital de Las Derrumbadas.....	29
2.2D. Orden cronológico de los volcanes de la Cuenca Serdán-Oriental.....	31
3.1. Fotografía del trabajo de campo.....	35
3.2A, B y C. Horno de laboratorio, columna de tamices y balanza.....	36
3.3A y B. Máquina de ultrasonido y microscopio binocular.....	37
4. Mapa general de Las Derrumbadas y alrededores.....	38
4.1A. Fotografía aérea de la región norte del Domo Noroeste. Avalancha Atexcac.....	39
4.1B y C. Fotografías de la unidad brecha riolítica.....	40
4.1D y E. Fotografías del depósito de avalancha del sitio DER 19159 A y DER 19130.....	41
4.1F, G y H. Histogramas del análisis granulométrico de la unidad “brecha riolítica”.....	41
4.1I, J y K. Gráficas de pastel del análisis de componentes de la unidad “brecha riolítica”.....	42
4.1L. Fotografía del sitio DER 19136 donde aflora la unidad “toba café”.....	43
4.1M. Histograma del análisis granulométrico de la unidad “toba café”.....	43
4.1N. Gráfica de pastel del análisis de componentes de la unidad “toba café”.....	44
4.1Ñ. Fotografía de la unidad ignimbrita en el depósito DER 19131.....	44
4.1O y P. Histogramas del análisis granulométrico de la unidad ignimbrita sitio DER 19131..	45
4.1Q y R. Gráficas de pastel del análisis de componentes del sitio DER 19131.....	45
4.1S. Fotografía del depósito del sitio DER 1996.....	46
4.1T y U. Histogramas del análisis granulométrico del sitio DER 1996.....	46
4.1V y W. Gráficas de pastel del análisis de componentes del sitio DER 1996.....	47
4.2A. Fotografía aérea de la región noroeste del Domo Noroeste. Zona de lahares.....	48

4.2B y C. Fotografía del depósito de lahar del sitio DER19135 y DER 19137 .....	49
4.2D. Histograma del análisis granulométrico del sitio DER 19135.....	50
4.2E. Gráfica de pastel del análisis de componentes del sitio DER 19135.....	50
4.2F. Fotografía del cono de composición básica del sitio DER 19138.....	51
4.3A. Fotografía aérea de la región oeste del Domo Noroeste. Avalancha EP Gil.....	52
4.3B y C. Fotografías de los depósitos de los sitios DER 1887 y DER 1888.....	53
4.3D y E. Histogramas del análisis granulométrico de los sitios DER 1887 y DER 1888.....	53
4.3F y G. Gráficas de pastel del análisis de componentes de los sitios DER 1887 y DER 1888.	54
4.3H e I. Histograma y gráfica de pastel resultado de las pruebas del sitio DER 19169.....	54
4.3J. Fotografía del sitio DER 19139 de la unidad brecha riolítica.....	55
4.3K y L. Histograma y gráfica de pastel resultado de las pruebas del sitio DER 19139.....	55
4.3M. Depósito estratificado dentro de la avalancha Emilio Portes Gil (sitio DER 19148).....	56
4.3N y Ñ. Fotografías de los depósitos de los sitios DER 19140 y DER 19147.....	57
4.3O y P. Gráficas de pastel. Análisis de componentes de los sitios DER 19140 y DER 19147.	57
4.3Q y R. Fotografía del depósito del sitio DER 19141 y DER 19144.....	58
4.3S. Bloque de ceniza estratificada ubicado en el sitio DER 19142.....	59
4.3T y U. Bloque de lava del sitio DER 19145 y clastos de escoria del sitio DER 19146.....	59
4.4A. Fotografía aérea de la región noreste del Domo Noroeste. Avalancha Las Águilas.....	60
4.4B y C. Fotografía de brecha de mármol y textura en rompecabezas sitio DER 1861.....	61
4.4D. Fotografía del depósito del sitio DER 1880.....	62
4.4E. Fotografía de los depósitos estratificados del sitio DER 1882.....	63
4.4F. Fotografía del depósito del sitio DER 19160.....	64
4.4G. Fotografía del depósito del sitio DER 19164.....	64
P1. Imagen con luz polarizada simple de los componentes de la muestra DER 19131 A.....	65
P2. Imagen con luz polarizada simple de los componentes de la muestra DER 1996 B.....	66
P3. Imagen con luz polarizada simple de los componentes de la muestra DER 19131 B.....	66
P4. Imagen con luz polarizada simple de los componentes de la muestra DER 1996 C.....	67
P5. Imagen con luz polarizada simple de los componentes de la muestra DER 19136.....	68
P6. Imagen con luz polarizada simple de los componentes de la muestra DER 19136.....	68
P7. Imagen con luz polarizada simple de los componentes de la muestra DER 19136.....	69
P8. Imagen con luz polarizada simple de los componentes de la muestra DER 19146.....	70
P9. Imagen con luz polarizada simple de los componentes de la muestra DER 1704.....	70

## Agradecimientos

En estas pobres líneas no cabe el agradecimiento que le tengo a la Doctora Marie-Nöelle Guilbaud. Gracias por su tiempo, gracias por las llamadas de atención, gracias por cada palabra corregida, gracias por su dedicación en mi formación, gracias por su paciencia. Infinitas gracias por todo y perdón por la tardanza.

Agradezco enormemente al Doctor Claus Siebe, a la Doctora Lucia Capra Pedol, a la Doctora Ana María Lizeth Caballero García y a la Doctora María Dolors Ferres López. Gracias por su disposición y aportaciones que sin duda mejoraron la calidad de este trabajo.

Un gran agradecimiento al estimado equipo de trabajo conformado por el Doctor Corentin Chédeville-Monzo, al Maestro Kevin Gemali Pedroza Aldana y al Ingeniero Ángel Nahir Molina Guadarrama. Gracias por sus consejos, ayuda y por compartir sus conocimientos.

Un agradecimiento al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM IN103421 y a la DGAPA-UNAM por el apoyo económico recibido.

Estoy agradecido con el Instituto de Geofísica de la UNAM por permitirme el acceso a sus instalaciones, en especial al Laboratorio de Sedimentología Volcánica y la Sala de Microscopios donde llevé a cabo la parte práctica de este trabajo.

Llegó el momento de reflejar un poco aquí lo agradecido que estoy con mi familia, mi papá, mi mamá y mis hermanos, los puntos cardinales que guían mi vida. Además de los nuevos y bienvenidos integrantes. Salgo adelante por ustedes.

Agradezco a mis amigos de licenciatura Jaime González Moreno, Eduardo Daniel Ortiz Cajica y Mariana Peña Guerrero por su gran ayuda. Y en general agradezco al resto de mis amigos, familiares y a cada persona que me dijo “ya acaba tu tesis”.



## Resumen

Los domos de lava se forman por la acumulación de lava viscosa alrededor de una ventila volcánica. Las erupciones asociadas a la formación de domos pueden ser muy peligrosas pues producen, además de la salida de lava, otros fenómenos que van desde caída de ceniza volcánica a violentos colapsos del domo que pueden a su vez desencadenar otros tipos de peligros como oleadas piroclásticas o avalanchas de escombros.

El volcán monogenético Las Derrumbadas está conformado por dos domos de composición riolítica alineados en dirección noroeste-sureste, y es el volcán más voluminoso dentro de la Cuenca Serdán Oriental ubicada entre los estados de Veracruz, Tlaxcala y Puebla.

El área circundante a los domos está dominada por una topografía irregular, con una multitud de montículos asociados a depósitos de avalanchas volcánicas provenientes de los domos. Así mismo, los depósitos de avalancha se encuentran intercalados con depósitos de oleadas piroclásticas de ceniza gruesa y fina de composición similar a los domos de Las Derrumbadas, cubiertos por extensos depósitos de lahares, lo que señala la gran inestabilidad de las estructuras dómicas.

En el presente documento se presentan observaciones de campo de los depósitos de avalancha asociadas con el Domo Noroeste, así como los resultados del análisis de componentes, granulometría y petrografía de muestras seleccionadas. El propósito fue delimitar los distintos depósitos, así como definir las unidades litológicas principales que conforman la facies de bloque, y los componentes asociados. Esta información permitirá ayudar a esclarecer el origen de estas unidades, con base en la información disponible sobre los productos de volcanes circundantes de la cuenca y discutir los procesos involucrados durante la formación de las avalanchas y el crecimiento de los domos.

Los componentes principales de los depósitos de avalancha del Domo Noroeste de Las Derrumbadas son la riolita gris (incluida la obsidiana) y la riolita blanca (pómez) cuyo origen es el edificio volcánico. De la misma forma, los fragmentos de caliza son muy abundantes y proviene del basamento cretácico subyacente a Las Derrumbadas. Además, se han encontrado como facies de bloque sedimentos lacustres que se formaron antes de la erupción del domo y fueron incorporados a las avalanchas durante el transporte. Se observa como facies de bloque la presencia de depósitos provenientes de volcanes circundantes como depósitos de caída de ceniza de Cerro Pinto, lavas basálticas provenientes de un cono de escorias, e incluso material piroclástico de la Ignimbrita Zaragoza procedente de la lejana Caldera de Los Humeros.

La diversidad composicional de las avalanchas refleja la alta actividad volcánica que tuvo lugar dentro de la cuenca y que ha depositado una espesa capa de depósitos que fue levantada por los domos durante la erupción de Las Derrumbadas. La presencia de estos depósitos y la extensa cubierta de lahares, producto de la muy activa erosión de los domos, indica que el volcán de Las Derrumbadas sigue siendo un peligro latente para las comunidades cercanas, pues los domos no están exentos de sufrir más colapsos, debido a la gran cantidad de factores que facilitan la inestabilidad de estas estructuras.

## Problemática y Objetivos

El volcán monogenético “Las Derrumbadas” se encuentra dentro de la Cuenca de Serdán Oriental que se ubica en los estados de Puebla y Veracruz en el sector este de la Faja Volcánica Transmexicana. Está conformado por dos domos voluminosos (10 km<sup>3</sup> en total) de composición riolítica (Yáñez-García y García-Durán, 1982; Siebe y Verma, 1988) que se formaron durante el Holoceno tardío (AD20; Chédeville et al., 2020).

Las Derrumbadas representa el volcán más voluminoso dentro de la cuenca, sin embargo, debido a la poca cantidad de estudios, no se conoce a detalle como ocurrió el proceso de crecimiento y destrucción de los domos durante su erupción y después de ella, por lo cual se sabe poco sobre los peligros asociados con una erupción de este tipo e incluso el potencial de las estructuras de seguir siendo un peligro en la actualidad.

Los domos de Las Derrumbadas son estructuras inestables que sufrieron derrumbes muy importantes durante y después de su formación, los cuales formaron depósitos de avalancha que incorporan tanto material de los domos, como rocas del basamento aparentemente levantadas por los domos (Siebe et al., 1995; 1997). Las características de estos materiales no se conocen a detalle, aunque podrían proveer información muy importante sobre la naturaleza del subsuelo en esta área, así como sobre los primeros productos de la erupción de los domos (oleadas piroclásticas).

El objetivo general de este trabajo es describir y discutir el origen de los componentes de las avalanchas asociadas al Domo Noroeste de Las Derrumbadas (Puebla) a partir de estudios de campo y de laboratorio.

Los objetivos particulares son los siguientes:

- i. Realizar una cartografía preliminar de los depósitos de avalancha del Domo Noroeste de Las Derrumbadas, Puebla, México.
- ii. Describir las características de las distintas avalanchas e identificar sus unidades litológicas principales.
- iii. Realizar un análisis de los componentes principales que conforman las unidades litológicas de dichas avalanchas mediante estudios granulométricos y petrográficos.
- iv. Aportar elementos para esclarecer el origen de estas unidades y componentes.

# 1. Marco teórico

## 1.1 Conceptos generales sobre la vulcanología

La vulcanología es el estudio del origen, de la evolución química y física y del transporte y erupción del magma, así como de la formación de los depósitos volcánicos en la superficie del planeta (Sigurdsson et al., 1999).

El magma es una mezcla silicatada, parcialmente fundida, constituida por gases, cristales y líquido, formada a partir de la fusión parcial de las rocas del manto o la corteza. Al solidificarse el magma, constituye una roca ígnea, una roca extrusiva o volcánica, o una roca intrusiva o plutónica, según las condiciones en las que se solidificó (Grove, 1999; Gill, 2011; Toselli, 2009). La actividad volcánica se concentra en dos ambientes tectónicos, principalmente: las zonas de extensión (rifts continentales y dorsales oceánicas) y las zonas de subducción (Sigurdsson et al., 1999). En zonas de puntos calientes también se presenta actividad volcánica, sin embargo, no está asociada a los límites de las placas tectónicas. En las zonas de subducción hay una actividad volcánica intensa que da como resultado extensos arcos compuestos por grandes volcanes. Las erupciones volcánicas están condicionadas esencialmente por la composición, viscosidad, temperatura y el contenido de volátiles del magma (Toselli, 2009). Estas propiedades determinarán el tipo de vulcanismo o de actividad volcánica: El vulcanismo efusivo, donde el principal producto es el flujo de lava y el vulcanismo explosivo donde se expulsa principalmente material piroclástico (Gill, 2011).

Si el magma es expulsado efusivamente o explosivamente depende de dos propiedades interrelacionadas, ambas, consecuencia de la composición del magma: La primera es la viscosidad del magma que depende principalmente de la temperatura y del contenido en sílice ( $\text{SiO}_2$ ) (Figuras 1.1A y 1.1B), donde entre menos contenido en sílice, menos viscoso será el magma, y la segunda es el contenido de volátiles en el magma, ya que es más probable que un magma con un alto contenido en volátiles sea emitido de forma explosiva, porque puede ocurrir vesiculación y expansión masiva cuando el magma sufra descompresión al subir a la superficie (Gill, 2011).

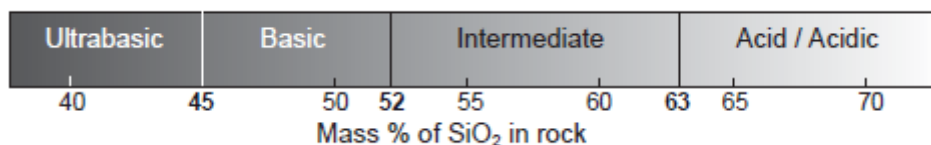


Figura 1.1A. Clasificación química de las rocas ígneas según su contenido en sílice ( $\text{SiO}_2$ ) (Gill, 2011).

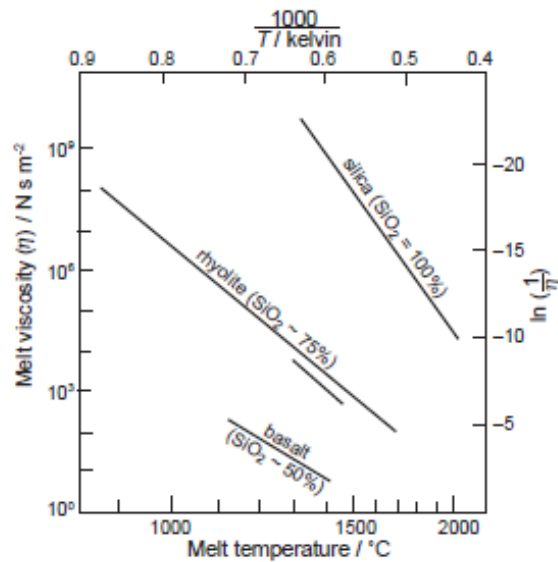


Figura 1.1B. Datos experimentales que ilustran cómo la viscosidad de un magma silicatado disminuye conforme aumenta la temperatura, e incrementa conforme el contenido en sílice ( $\text{SiO}_2$ ) es mayor. Modificado por Gill (1996), basado en datos de Scarfe (1977).

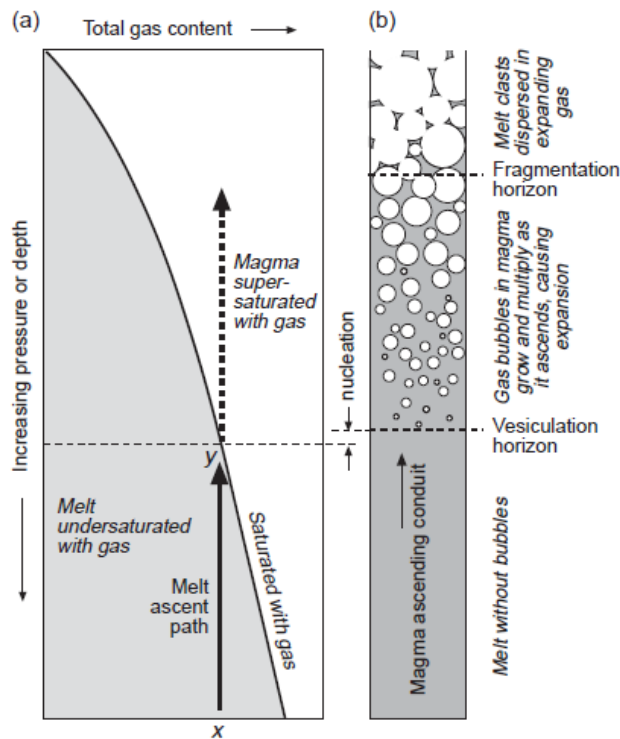


Figura 1.1C. (a) Solubilidad del gas en un magma silicatado en función de la presión. (b) Progreso de la vesiculación conforme disminuye la profundidad (presión litostática) del magma y conduce a la repentina expansión de los gases y por lo tanto la velocidad de ascenso se incrementa a medida que la densidad del magma, así como la presión litostática disminuyen (Gill, 2011).

Estas características (viscosidad y contenido volátil) rigen en gran manera la forma en la que se presentará la actividad volcánica y qué tan explosiva pueda llegar a ser una erupción. Por tales

razones, la actividad efusiva ocurre principalmente en volcanes de composiciones basálticas e incluso andesíticas. A este estilo eruptivo se le llama Hawaiano cuando se asocia a fuentes de lava y a un proceso de desgasificación pasiva. Cuando las erupciones son más explosivas comúnmente el magma es más ácido, es decir, tiene mayor contenido en sílice y es de composición andesítica, dacítica o riolítica y su actividad se expresa, de menor a mayor explosividad, en los estilos: estromboliano, vulcaniano, pliniano y ultrapliniano, dando como resultado una cantidad importante de material piroclástico eyectado.

Nótese que, como se describirá abajo, existen domos riolíticos o conos de escoria basálticos, lo cual demuestra que, bajo ciertas condiciones, otros parámetros controlan la efusividad o explosividad.

Estilos eruptivos	Fenómenos comunmente observados	Depósitos piroclásticos (Composición)	Estructuras volcánicas típicas
Hawaiano	Fuentes de lava > 100 m de altura, lago de lava y tubos de lava.	Pequeñas cantidades de cabello de Pelé. (basáltica).	Volcán de escudo basáltico, caldera, cono spatter, flujo de lava (pahoehoe, a'a) y levées.
Estromboliano	Erupciones periodicas emitiendo nubes de escoria o ceniza.	Estratos de escoria bien clasificada. (basáltica o basalto andesítica).	Cono de escoria.
Vulcaniano	Explosiones discretas y columna eruptiva de vida corta (5-10 km de altura).	Delgados estratos de ceniza, bombas y líticos. (intermedia/ácida).	Crater.
Sub-pliniano Pliniano y ultrapliniano	Columna eruptiva sostenida de 10-20 Km de altura (sub-pliniano), de 20-50 Km	Depósitos de caída de pómez, lapilli, toba o ignimbrita. (dacítica, riolítica o fonolítica).	Estratovolcán, crater y caldera.
Hidrovolcánico	Explosiones repetidas, nube de ceniza "cola de gallo" y nube de ceniza de oleada.	Delgados estratos de ceniza, líticos, depósitos de oleada con estatificación cruzada. (comunmente basáltica).	Anillo de toba o ceniza, crater o maar.

Figura 1.1D. Tabla de los distintos estilos eruptivos y sus características observadas, así como los productos característicos que se generan y los distintos tipos de edificios volcánicos que se pueden formar (Gill, 2011).

Los piroclastos se forman por la fragmentación del magma a altas temperaturas. La mayoría de ellos presentan un alto contenido de vesículas (Gil,2011). Están clasificados según su tamaño en bombas, lapilli y ceniza (Figura 1.1E).

<i>Piroclastos</i>		<i>D/mm</i>	<i>∅</i>
bloques o bombas	gruesos	256	-8.0
	finos		
lapilli		64	-6.0
		2	-1.0
ceniza	gruesa	1/16	+4.0
	finas		

Figura 1.1E. Tabla de la nomenclatura de los piroclastos según su tamaño (Gil, 2011).

## 1.2 Domos volcánicos

### 1.2.1 Definición

Los domos de lava son montículos de lava viscosa y rocas que se apilan y acumulan alrededor de una ventila volcánica. Se forman mediante el enfriamiento y la desgasificación del magma poco antes y después de su erupción a la superficie (Calder et al., 2015).

Las erupciones que forman domos son un estilo común del vulcanismo, especialmente en márgenes convergentes donde los domos pueden formarse individualmente en el cráter de un cono volcánico, o bien formar parte de un grupo o de un complejo de edificios (Fink, 1990).

Alrededor del 6% de las erupciones en todo el mundo forman domos de lava. (Calder et al, 2015).

Los domos de lava se pueden formar a lo largo de días o semanas, pero los episodios eruptivos se pueden extender hasta años o incluso décadas (Calder et al., 2015).

### 1.2.2 Mecanismos de crecimiento

La tasa de descarga asociada con erupciones de lava que llevan a la construcción de domos es generalmente baja cuando se compara con aquella que se relaciona con la emisión de flujos de lava o con erupciones explosivas y comúnmente, demuestra ciclicidad a múltiples escalas de tiempo (Voight et al., 1999; Chouet y Matoza, 2013).

Los domos generalmente presentan largos episodios (meses a años) de crecimiento constante alternados con periodos cuando las tasas de descarga difieren, e incluso periodos de quietud.

En escalas de días a semanas, los pulsos de crecimiento suelen ser atribuidos a episodios de propagación de diques alimentando magma dentro del domo.

En escalas de horas a días, las pulsaciones en el crecimiento del domo están asociadas con emisión de gas y ocasionalmente de ceniza desde la ventila (Barmin et al., 2002; Calder et al., 2015).

Investigaciones recientes han demostrado que los ciclos de crecimiento más largos reflejan la dinámica periódica del sistema magmático, mientras que ciclos más cortos y cambios en el comportamiento, pueden ser entendidos como el resultado de una competencia entre procesos químicos, petrológicos, reológicos y mecánicos que ocurren durante el ascenso del magma en el conducto cerca de la superficie (Calder et al., 2015).

La morfología de los domos es el resultado de la combinación de factores como son la reología del magma, la topografía, la dinámica del ascenso del magma, la tasa de descarga y el mecanismo de crecimiento del domo (crecimiento endógeno o exógeno). El crecimiento endógeno se refiere al agrandamiento del domo de lava provocado por la intrusión de nuevo magma. El crecimiento exógeno se refiere al agrandamiento del domo como resultado del magma abriéndose camino a través de una cubierta preexistente hacia la superficie o fluyendo directamente de la ventila formando discretos montículos de lava que se apilan uno encima del otro o de forma adyacente (Calder et al., 2015).

Finalmente, la estructura de un domo de lava está compuesta por un núcleo interno de lava distinguible por un comportamiento dúctil, el cual está cubierto por una capa más frágil (cáscara o caparazón) y que al final se encuentra flanqueado por un talud brechado compuesto por bloques, resultado del fracturamiento de la cáscara externa del domo (Figura 1.2A).

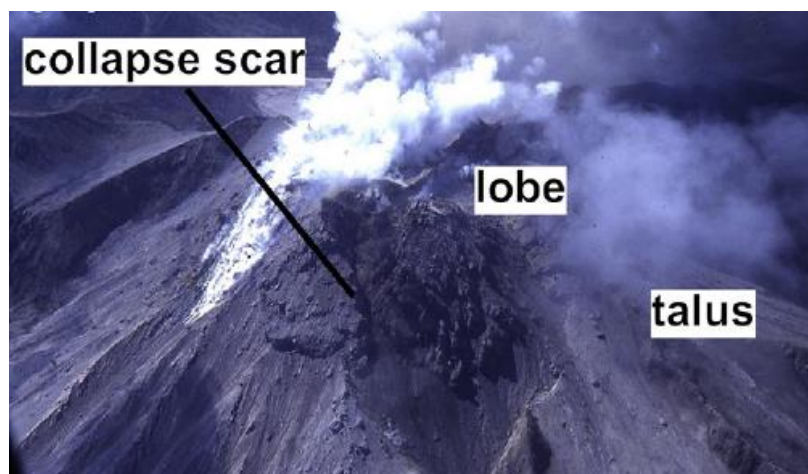


Figura 1.2A. Domo de lava del volcán Soufrière Hills, Montserrat que muestra un joven lóbulo de lava (“lobe”) relleno de la cicatriz de un colapso del domo previo (“collapse scar”) y un talud (“talus”) desarrollándose alrededor del domo (tomada de Calder et al., 2015).

### 1.2.3 Tipos de domos de lava

Considerando las clasificaciones de Francis (1993), Bardintzeff y McBirney (2000) y Calder et al. (2015) podemos considerar cuatro tipos fundamentales de domos: (1) domo de tipo tapón, (2) peleano o de espina, (3) criptodomo y (4) domo “coulée” o torta, cuyas características principales se reportan en la Figura 1.2B.

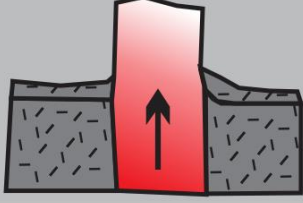
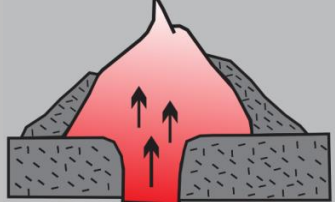

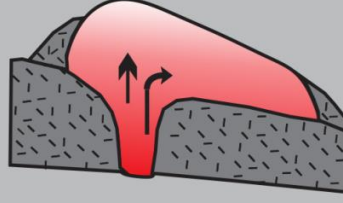
<p><b>Tapón</b></p>	<p>Se trata de una masa de roca empujada hacia arriba como un pistón, la cual tiene un alto límite elástico para no deformarse y que se extiende hacia afuera una vez estando en la superficie. Ej. Domo del Monte Pelée (Martinica).</p>	
<p><b>Peleano-espina</b></p>	<p>Es un domo típicamente de composición andesítica a dacítica caracterizado por una topografía escarpada y espigas de lava (llamados así por su forma), formadas en la cresta del domo. Ej. Domo Santiaguito (Guatemala).</p>	
<p><b>Criptodomo</b></p>	<p>Son similares al domo tapón que se va formando mediante intrusiones de lava, pero no extruye a la superficie, de manera que deforma la masa que lo envuelve. Ej. Criptodomo del Monte Santa Helena (1980) (EUA).</p>	
<p><b>Coulée o torta</b></p>	<p>Son extrusiones de lava que pueden ser muy espesas, (&gt;400 m), generalmente de composición dacítica a riolítica y representan la transición entre la formación de domos y flujos de lava. Ej. Domo Chillahuíta (Chile).</p>	

Figura 1.2B. Tabla de los diferentes tipos de domos, sus características representativas, modo de formación y ejemplos de domos recientes. Imágenes modificadas de Francis (1993).

### 1.2.4 Peligros asociados a las erupciones de domos de lava

Las erupciones de domos volcánicos pueden ser peligrosas. Las poblaciones circundantes pueden estar sujetas a periodos prolongados de peligros que pueden variar desde frecuentes caídas de ceniza, hasta la ocurrencia de peligros más graves, como violentos colapsos de domos de lava (Druitt y Kokelaar, 2002). Los peligros primarios asociados a los colapsos de domos de lava incluyen la formación de flujos y oleadas piroclásticas, y en ocasiones, explosiones laterales. Los peligros secundarios asociados pueden ser derrumbes y lahares. Domos de lava antiguos, inactivos e hidrotermalmente alterados también son propensos a



sufrir colapsos de un sector formando avalanchas de escombros (Figura 1.2C) (Calder et al., 2015).

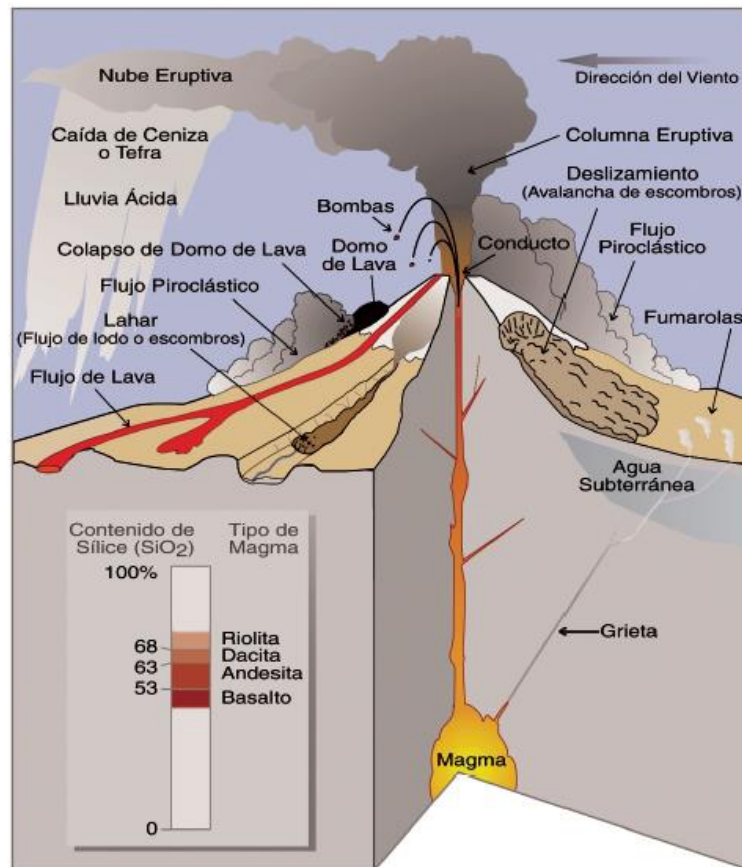


Figura 1.2C. Esquema de los peligros asociados a la actividad volcánica en general. Imagen producida por el Servicio Geológico de EUA (USGS) y diseñada por Myers y Dieger (2008).

Calder et al. (2015) resumen los procesos más comunes involucrados en la deformación de los domos. La caída de rocas representa el tipo de colapso de menor magnitud, pero que ocurre con mayor frecuencia alrededor de los domos, alcanzando hasta más de 200 eventos diariamente durante los periodos activos del crecimiento. La caída de rocas ocurre a lo largo de planos de falla de ángulo alto en el exterior del domo (en gran parte la cubierta desgasificada del domo de lava) y puede involucrar bloques discretos que ruedan, rebotan o se deslizan cuesta abajo, hasta formar avalanchas de tamaño significativo.

Calder et al. (2015) también mencionan que algunos mecanismos de colapso están directamente relacionados con la extrusión del magma: las fuerzas de empuje asociadas con la intrusión o extrusión de un domo de lava activo pueden empujar porciones adyacentes del domo; también la sobrepresurización del gas, especialmente en asociación con el rápido ascenso de un magma rico en gases propicia el autobrechamiento o el colapso explosivo del domo y cuando el domo está fluyendo sobre la pendiente, la propagación de fracturas provocadas por el cambio de temperatura se torna importante. Por otro lado, las fuerzas externas también pueden afectar la estabilidad del domo tal y como la desestabilización del domo durante un terremoto. Además, hay evidencia de que intensos episodios de lluvia

pueden iniciar la remoción del talud e inducir el fallamiento del domo y/o promover el fracturamiento por enfriamiento, lo cual facilita el debilitamiento estructural.

### 1.3 Avalanchas volcánicas

Los volcanes están contruidos a partir de rocas y su estructura se debilita por la combinación de fenómenos como la alteración hidrotermal, deformación volcano-tectónica y deformación relacionada con la intrusión de material. Por lo tanto, el edificio contiene muchas debilidades estructurales que pueden conducir a la desestabilización a través del aumento del peso, carga sísmica y la progresiva pérdida de resistencia por la alteración hidrotermal, deformación, intrusión y el incremento de la presión de poro en los sistemas hidrotermales. Esto significa que la propensión al colapso no necesariamente está relacionada a las erupciones o a la actividad magmática y puede ocurrir durante periodos de quietud e incluso cuando el volcán está extinto (van Wyk de Vries y Davies, 2015).

#### 1.3.1 Definición

Una avalancha volcánica de escombros se forma como producto del colapso de un sector del edificio volcánico, el cual se desplaza pendiente abajo con tal velocidad (por su volumen y energía potencial inicial) que la base de la masa rocosa pierde resistencia al movimiento, por lo que es capaz de viajar decenas de kilómetros desde la base del volcán (van Wyk de Vries y Davies, 2015). El ejemplo de colapso de sector y emplazamiento de avalancha volcánica mejor documentado a la fecha tuvo lugar durante la erupción del Monte Santa Helena (EUA) EN 1981, cuando la intrusión de un domo dentro del edificio volcánico causó la desestabilización y colapso de una gran parte de su flanco (Figura 1.3A).

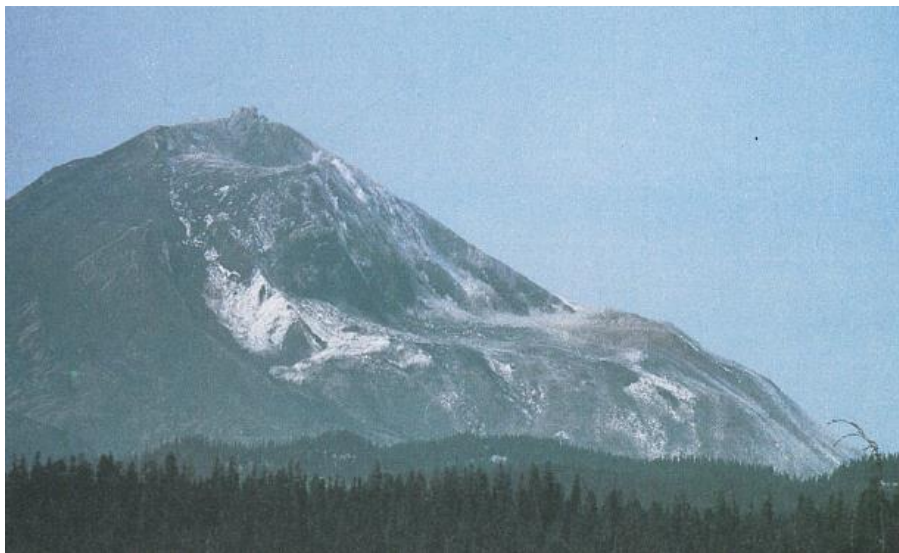


Figura 1.3A. Fotografía del Monte Santa Helena en 1981, justo después del colapso de un sector del volcán, el cual generó una de las avalanchas de escombros mejor documentadas hasta la actualidad (fotografía publicada por Lipman y Mullineaux, 1982).

### 1.3.2 Factores que propician y disparan el colapso de un edificio volcánico

Según van Wyk de Vries y Davies (2015), las condiciones para que un edificio volcánico colapse se pueden desarrollar a lo largo de toda la vida del volcán con sólo deformación lenta. Estos factores que propician los colapsos están ligados a la estructura misma del volcán por estar conformado por material pobremente consolidado, rocas fracturadas por enfriamiento y horizontes intemperizados. Sin embargo, distintos factores de disparo suelen estar involucrados en los deslizamientos y la generación de avalanchas de escombros. Estos factores son:

1. La intrusión de nuevo magma en forma de diques o criptodomas, que es capaz de deformar los flancos creando zonas de cizallamiento y brechamiento, lo cual debilita la roca y reduce su resistencia.
2. Cambios en la actividad hidrotermal por circulación de fluidos que inducen la alteración de rocas en arcillas, minerales que promueven el almacenamiento de agua. Su incremento puede generar el desarrollo de presiones de poro positivas desestabilizando la porción del edificio y su colapso.

Además de los factores que causan el debilitamiento rápido del edificio, existen otras condiciones que terminan por desencadenar la formación de avalanchas. Éstas principalmente incluyen terremotos o movimientos telúricos de fallas regionales cercanas al volcán que causan cambios en la distribución de esfuerzos dentro del volcán. Incluso, largos eventos de lluvia y derretimiento de hielo pueden contribuir al disparar pequeños colapsos (van Wyk de Vries y Davies, 2015).

### 1.3.3 Mecanismos de transporte

Las avalanchas de escombros viajan más lejos de lo que se esperaría, considerando la caída vertical, lo cual se debe a la alta masa total de material involucrado (Siebert 1984). Sin embargo, esta alta movilidad no se puede explicar considerando solamente las leyes de fricción granular. Por ello, se han desarrollado diversos modelos numéricos, analíticos y análogos desarrollados (Ej. Davies et al., 2010). Algunos de los mecanismos que se han propuesto son: la amortiguación de aire en la base, la lubricación por agua o la incorporación de arcillas ricas en agua a la base y fluidización por vibración y energía acústica. Incluso la liberación de energía elástica durante la intensa fragmentación basal podría tener un papel importante proporcionando una fuerza de dispersión para mantener el material granular en un estado dilatado (Davies et al., 2010). Sin embargo, estos estudios siguen inconclusos debido a la falta de caracterización precisa de los productos que componen las avalanchas de escombros, los cuales, suelen estar pobremente expuestos (Van de Wyk de Vries y Dvies, 2015).

#### 1.3.4 Estructura general de los depósitos

Como explican van Wyk de Vries y Davies (2015), un depósito de avalancha de escombros se puede dividir en cuatro regiones: proximal, medial, distal y marginal (Figura 1.3B). La región proximal se caracteriza por la cicatriz que deja el colapso del edificio que da lugar a la avalancha. Comúnmente, tiene forma de herradura o una geometría triangular (Siebert, 1984) y se puede extender hasta el pie de monte e incluso alcanzar el sustrato. La región en la base del volcán puede incluir bloques llamados “Toreva” (Reiche, 1937), que son bloques deslizantes rotados hacia atrás, que corresponden a la cabeza de la avalancha y están comúnmente preservados en colapsos de gran volumen que cortan dentro del sustrato del volcán, pero no son preservados cuando la pendiente del terreno más allá de los flancos del volcán es muy pronunciada.

En la región medial, la mayoría de los depósitos de avalancha tiene montículos o cerrillos llamados “hummocks”, cuyo tamaño típicamente disminuye conforme uno se aleja de la fuente (Ej. Siebert, 1984) y, en casos, hacia los márgenes laterales (Ej. Clavero et al., 2002). Su altura puede ser de metros a decenas de metros y su diámetro es generalmente varias veces su altura y puede alcanzar varios cientos de metros (Ej. Siebert, 1984). Los montículos se forman durante la extensión de la masa y están comúnmente alineados y alargados en la dirección del movimiento. Tienen formas variables, de cónicas a elípticas u ovals. Existen dos tipos: un tipo formado por extensión pura, definido por una estructura de “graben y horst” y el otro formado por deformación por cizalla de la masa, tipo “boudinage” (van Wyk de Vries y Davies, 2015).

Las regiones distales y marginales de la avalancha de escombros suelen ser empinadas y algunas veces lobuladas y el frente a menudo está dominado por estructuras compresivas. Cuando el interior de los frentes de avalanchas de escombros está expuesto, comúnmente se observa que las crestas contienen, o se componen exclusivamente de rocas del sustrato levantadas, deformadas e incorporadas a la avalancha, sobre todo en el caso de un sustrato lacustre (Belousov et al., 1999).

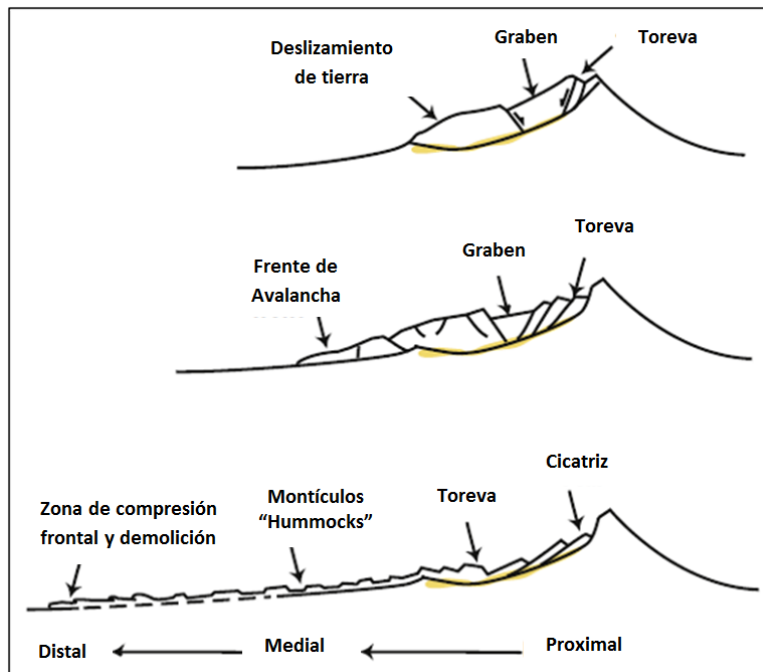


Figura 1.3B. Sección transversal que muestra las características tempranas de la avalancha y la formación de estructuras durante su desarrollo (tomada de van Wyk de Vries y Davies, 2015).

### 1.3.5 Diferentes tipos de depósito de avalancha

De acuerdo con van Wyk de Vries y Davies (2015) existen diferentes tipos de depósitos de avalancha de escombros: los que incluyen una gran proporción del sustrato; los generados por la alteración hidrotermal del núcleo del volcán y por la intrusión de magma nuevo, que generalmente involucrarán solo las rocas del volcán limitando el volumen del depósito; los superficiales, que se desarrollan en los estratos más superficiales sin involucrar el núcleo volcánico; los de volcanes monogénéticos, los cuales son mucho más pequeños en volumen que los formados en estratovolcanes y no viajan muy lejos de la fuente; y por último, los que llegan a ocurrir en otros planetas como el ocurrido en el volcán Olympus Mons de Marte.

### 1.3.6 Descripción de los depósitos de avalancha de escombros

Los depósitos de avalancha están característicamente formados por brechas principalmente compuestas por material lítico, aunque puede haber material juvenil (Siebert, 1984). Los clastos tienden a ser angulosos, pero su forma depende de la litología y bloques de arcilla u otros materiales dúctiles pueden ser redondeados. El tamaño de grano es variable y el grado de clasificación de los depósitos suele ser pobre.

Además de la facies de Toreva previamente descrita, dos principales tipos de facies pueden ser identificados en las avalanchas (Ej. Siebert, 1984; Crandell, 1989; Glicken, 1996; Shea et al., 2008; van Wyk de Vries y Davies, 2015).

1. *Facies de bloque*. Esta facies se distingue por estar constituida por bloques de porciones intactas del edificio volcánico. Estos bloques son fragmentos de la masa

inicial deslizada que se mantienen intactos durante el transporte o están fracturados, pero conservan las características internas de los materiales iniciales, por lo cual una textura clásica, más no exclusiva, es la de rompecabezas (“jigsaw-fit”). Por ejemplo, pueden constar de depósitos piroclásticos con una estratificación primaria preservada. Cabe notar que una característica más peculiar de las avalanchas es la preservación de bloques compuestos de materiales frágiles y/o no consolidados, como secuencias sedimentarias (Ej. Candrell, 1989).

2. *Facies de Matriz*. Corresponde a partes de la avalancha compuestas por fragmentos de roca diversa, que se definen como clastos o mega-clastos (> 1 m); los depósitos son pobremente clasificados y sin estratificación. La matriz consiste de fragmentos del tamaño ceniza gruesa a fina (o arena a limo). Esta matriz es generalmente producida por la fragmentación intensa o pulverización (“crushing”) de los bloques. Puede ser fuertemente poli-litológica debido a la mezcla de distintas litologías provenientes del volcán o a una fuerte incorporación del sustrato. El término “*facies mezcla*” se utiliza para describir la facies de matriz con un origen altamente poli-litológico y se diferencia de ésta cuando la matriz es producida por la fracturación de la facies de bloques de un solo tipo de roca (van Wyk de Vries y Davies, 2015). La parte basal del depósito suele presentar una facies específica (*facies basal*) en la cual el tamaño de grano es más fino y las superficies exhibidas en las rocas son producto de la fragmentación completa e intensa de la masa por fricción a la base de la avalancha durante su movimiento.

Es importante resaltar que existe una completa gradación entre la facies de matriz y de bloques y ambos tipos (matriz y bloques) coexisten usualmente en un solo afloramiento, la matriz circundando a los bloques. La facies de bloques tiende a predominar en los *hummocks*, mientras que la facies de matriz se concentra en las áreas planas entre los montículos (Ej. Crandell, 1989). Sin embargo, se pueden encontrar *hummocks* compuestos principalmente por matriz, con algunos bloques aislados (Glicken, 1996). La morfología de los *hummocks* típicamente varía con su composición y su pendiente externa suele aumentar con la proporción de bloques en su interior (Shea et al., 2008). La abundancia de cada facies en el depósito típicamente varía con la distancia a la fuente, demostrando una disminución en la proporción de facies de bloque y un aumento relativo de la facies matriz. Estas variaciones están interpretadas por una fragmentación progresiva de la masa transportada.

Además de las facies de bloques y matriz, la variedad existente en los tipos de roca y depósitos presentes en los depósitos ha llevado a ciertos autores a definir varias unidades litológicas, a veces también llamados facies litológicas (Ej. Glicken, 1996; Godoy et al., 2012). Estas facies tienen características petrográficas, texturales, sedimentológicas, etc., que apuntan hacia una ubicación distinta dentro del volcán antes del colapso, así como a veces, una fuente volcánica u otra diferente (Ej. basamento sedimentario o metamórfico). El estudio de estas facies permite así reconstruir el edificio volcánico antes de su colapso y/o discutir sobre los procesos que dispararon el desprendimiento e influyeron sobre la movilidad de la avalancha (tal como la presencia de material juvenil, alterado o del sustrato, por ejemplo).

Existen pocos estudios detallados de la estructura interna de los depósitos de avalancha, probablemente debido a la rareza de afloramientos en depósitos recientes y bien preservados. Sin embargo, los estudios existentes reportan que las fallas son comunes, en particular en regiones proximales y en la facies de bloques (Shea et al., 2008), mientras las texturas más fluidales son más características de la facies de matriz o mezcla (van Wyk de Vries y Davies, 2015), diques clásticos e inyecciones de material involucran materiales de la matriz o mezcla , y se observan tanto en la facies de matriz como en la de bloques donde están asociadas a fallas y podrían resultar de esfuerzos de compresión (Shea et al., 2008).

### 1.3.7 Peligros y riesgos asociados a las avalanchas de escombros

Varios volcanes en el mundo que están asociados a productos de avalancha, están localizados en la proximidad de grandes ciudades (Volcán de Colima, Colima, México; Volcán Misti, Arequipa, Perú; Monte Mayón, Legazpia Filipinas; por ejemplo). Los peligros asociados a este tipo de eventos varían desde la capacidad de cubrir cientos de kilómetros cuadrados en cuestión de minutos y la generación de fenómenos concatenados a otros peligros como tsunamis, erupciones, y la posible transformación de la avalancha en un flujo de escombros, lo cual aumenta su movilidad e incluso la formación de represas que al desbordarse pueden provocar la formación de flujos de escombros de gran volumen o lahares (Ej. Volcán Chichonal 1982). Es por esto que el monitoreo constante de los volcanes y la creación de mapas de peligros son importantes, pues permiten considerar estos peligros y mitigar sus efectos (van Wyk de Vries y Davies, 2015).

## 2. Marco geológico

### 2.1 Faja Volcánica Transmexicana

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) es un arco volcánico continental relacionado con la subducción de las Placas Cocos y Rivera debajo de la Placa Norteamericana. Está construido sobre provincias magmáticas Cretácicas y Cenozoicas, se extiende de Oeste a Este con una longitud de 1000 Km y abarca un área de 160 000 Km<sup>2</sup> en la parte central de México formando un ángulo de aproximadamente 15° con respecto a la Trinchera Mesoamericana (Figura 2.1A) (Demant, 1978; Pardo y Suárez, 1995; Ferrari et al., 2012).

Fecha mientos isotópicos realizados durante las dos últimas décadas indican que la actividad que ha desarrollado la Faja Volcánica Transmexicana comenzó en el Neógeno como resultado de una rotación antihoraria del arco que formó la Sierra Madre Occidental (Ferrari et al., 1999).

La Faja Volcánica Transmexicana es uno de los arcos volcánicos composicionalmente más diversos en la Tierra. Los productos calci-alcalinos son los más ubicuos en los arcos continentales, sin embargo, la FVTM tiene sorpresivamente una diversidad de vulcanismo máfico y félsico que abarca una gran variedad de tipos de magmas usualmente atípicos en zonas de subducción: desde toleítas de olivino a hawaítas Na-alcalinas y minettas enriquecidas en potasio, y desde metaluminosas y peralcalinas a peraluminosas e incluso algunas trondhjemitas riolíticas (Gómez-Tuena et al., 2018).



Figura 2.1A. Principales provincias magmáticas continentales de México (basado en Ferrari et al. 2007; 2012). TMVB: Trans-Mexican Volcanic Belt (Faja Volcánica Transmexicana en inglés).



Debido a que la FVTM está construida sobre diferentes provincias magmáticas y un basamento heterogéneo constituido por terrenos tectono estratigráficamente diferentes en edad y litologías, la FVTM se suele dividir en cuatro sectores principales (Figuras 2.1B y 2.1C; Ferrari et al., 2012).

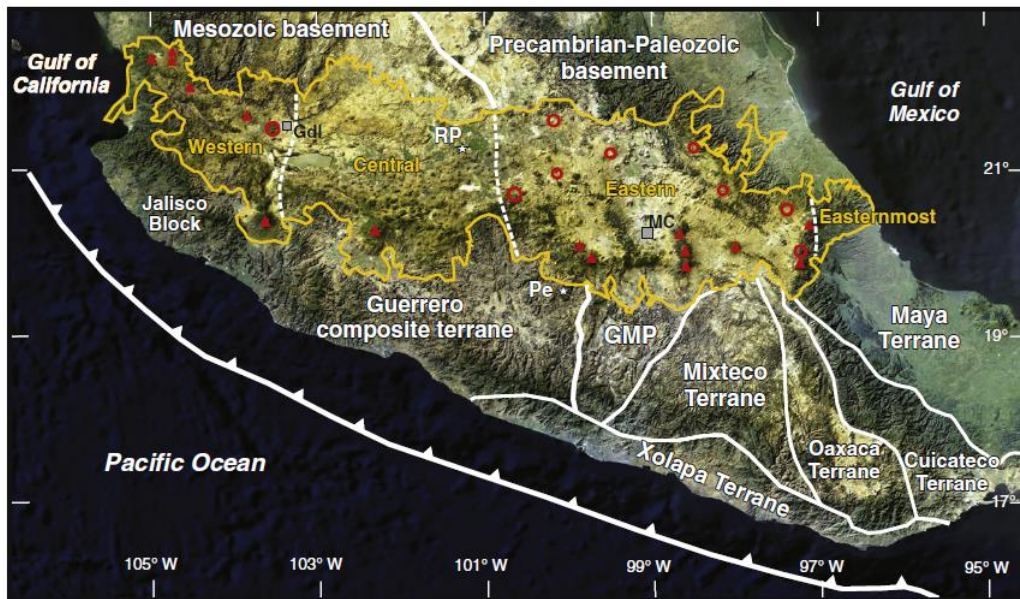


Figura 2.1B. Ubicación de los cuatro sectores de la Faja Volcánica Transmexicana (sombreado amarillo), principales estratovolcános (triángulos rojos), calderas (círculos rojos) y los principales terrenos geológicos (delimitados por líneas blancas); GMP (Plataforma Guerrero-Morelos), Pe (Pepechuca) Y RP (Rincón de Parangueo) (Ferrari et al., 2012).

Sector	Placa subduciendo	Basamento	Vulcanismo silíceo	Vulcanismo alcalino tipo intraplaca (OIB)
Occidental	Rivera	Mesozoico (Terreno Guerrero).	Abundante en complejos dómicos y en algunos depósitos de ignimbritas.	Durante el Plioceno temprano en el tras-arco.
Central	Cocos	Mesozoico (Terreno Guerrero).	Casi ausente.	Raro durante el Pleistoceno en el sector norte del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato.
Oriental	Cocos	Precámbrico y Paleozoico (Terreno Mixteco y Oaxaqueño).	Abundante. Al menos 7 calderas y algunos complejos dómicos.	Raro durante el Pleistoceno en la Sierra de Chichinautzin.
Extremo oriental	Cocos	Precámbrico y Paleozoico (Terreno Maya).	Casi ausente.	Abundante desde el Mioceno Tardío.

Figura 2.1C. Características de los distintos sectores de la Faja Volcánica Transmexicana (Ferrari et al., 2012).

Con base en la distribución espacial y la composición del vulcanismo, la evolución geológica de la FVTM ha sido dividida en cuatro episodios distintos (Gómez-Tuena et al., 2007a, 2007b; Ferrari et al., 2012):

- 1. Mioceno temprano-Mioceno tardío (Figura 2.1D, A):** El inicio de la FVTM se caracteriza predominantemente por vulcanismo efusivo de composición intermedia. Las rocas más antiguas se encuentran expuestas en la parte central de México, cerca del frente volcánico actual (Tenancingo-Malinalco, Sierra Mil Cumbres, Sierra de Angangueo, Cuenca de México). Entre las manifestaciones más jóvenes relacionadas con este episodio están los estratovolcanes andesíticos y riolíticos Palo Huérfano, La Joya, Zamorano y Cerro Grande formados entre 12.1 y 8.9 Ma y localizados a una gran distancia de la trinchera. En el sector extremo oriental de la FVTM, el magmatismo está representado por cuerpos intrusivos y subvolcánicos gabroicos y tonalíticos con diques máficos asociados y lavas de composición intermedia que han sido fechadas entre 16 y 9 Ma (Cantagrel y Robin, 1979; Ferrari et al., 2005; López-Infanzón, 1991; Nengendank et al., 1985).
- 2. Mioceno tardío (Figura 2.1D, B):** Un cambio abrupto en el estilo y composición del magmatismo ocurrió en el Mioceno tardío, cuando un gran volumen de lavas de composición máfica se emplazó a lo largo del arco hacia el norte de la región afectada por el episodio previo (Ferrari, 2004; Ferrari et al., 1994, 2000, 2005). La lava formó mesetas a través de fisuras, y se formaron algunos conos de lava y volcanes escudo. Se destaca la migración del vulcanismo de oeste a este donde resalta la actividad del área de Palma Sola entre 7-3 Ma (Cantagrel y Robin, 1979; Ferrari et al., 2005b; López-Infanzón, 1991).
- 3. Mioceno tardío-Plioceno temprano (Figura 2.1D, C):** Al sur del episodio anterior sucedió un cambio a vulcanismo de composición silícica a lo largo del arco donde fueron emplazados complejos dómicos, flujos de lava y depósitos de ignimbritas de composición riolítica y dacítica. En el sector extremo oeste, el vulcanismo fue silíceo entre 8.5 y 6.0 Ma (Castillo-Hernández y Romero-Ríos, 1991; Gilbert et al., 1985; Rossotti et al., 2002). Después, el vulcanismo se volvió bimodal, donde pequeños volúmenes de flujos de lava basáltica ligeramente alcalina se emplazaron junto con domos silíceos y algunos depósitos de ignimbritas, resultando en algunos casos procesos de mezcla y “mingling” (mezcla incompleta) de magmas (Allan, 1986; Ferrari et al., 2000; Frey et al., 2004; Gastil et al., 1979; Gilbert et al., 1985; Moore et al., 1994; Righter y Rosas-Elguera, 2001). Al este, el vulcanismo se caracterizó por la formación de calderas que produjeron grandes volúmenes de ignimbritas (>50 Km<sup>3</sup>) como Amazcala, Huichapan y Amealco (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001; 2009).
- 4. Plioceno tardío-Holoceno (Figura 2.1D, D):** Desde el Plioceno tardío, el estilo y composición del vulcanismo se volvieron más diversos. Este episodio se caracteriza por la construcción de grandes estratovolcanes como los del complejo volcánico de Colima al oeste y al este los volcanes Tláloc, Iztaccíhuatl, Popocatepetl, Pico de Orizaba, Cofre de Perote, etc. También está caracterizado por la formación de campos volcánicos monogenéticos; el más prominente es el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato con más de 1000 centros volcánicos distribuidos en 40 000 Km<sup>2</sup> en el sector central-oeste de la FVTM (Hasenaka, 1994; Hasenaka y Carmichael, 1985). Los campos volcánicos Zitácuaro-Valle de Bravo, Tenango-Chichinautzin y Xalapa se ubican en los sectores centrales y orientales de la faja.

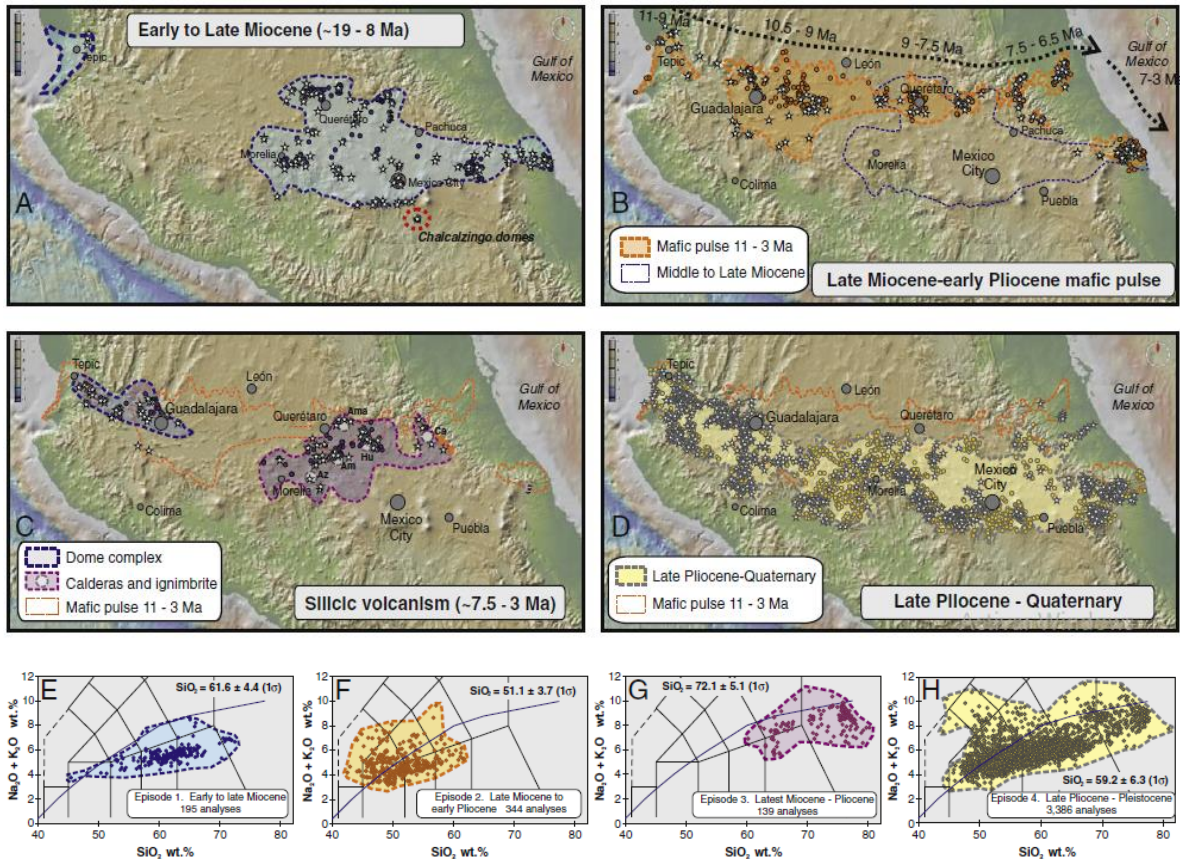


Figura 2.1D. Los cuatro episodios magmáticos descritos de la FVTM junto con la relación sílice versus el total de álcalis de las muestras analizadas (diagrama TAS). A y E: Durante el Mioceno temprano-tardío; B y F: Durante el Mioceno tardío; C y G: Durante el Mioceno tardío y el Plioceno temprano; y D y H: Durante Plioceno tardío al Holoceno (Ferrari et al., 2012).

## 2.2 Cuenca Serdán-Oriental

La cuenca intermontaña lacustre de Serdán-Oriental se ubica cerca del extremo oriental del Altiplano Mexicano, cubre un área aproximada de 5250 Km<sup>2</sup> y tiene una elevación promedio de 2300 msnm. Está ubicada dentro de los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz y se encuentra delimitada al este por la cadena volcánica Sierra Negra-Pico de Orizaba- Cofre de Perote; al norte por la caldera de Los Humeros; al sur por la Sierra de Soltepec; y al oeste por los volcanes Cerro Grande y La Malinche (Figura 2.2A) (Carrasco-Núñez et al., 2012).

La cuenca está caracterizada por un vulcanismo monogenético bimodal que ha producido domos riolíticos dispersos, conos de escoria, conos de lava de composición basáltica, anillos de toba, conos de toba y algunos maares (e.g., Yáñez-García y García-Durán, 1982; Siebe et al., 1995; Chédeville et al., 2020).

El basamento está conformado por rocas calizas, las cuales fueron fuertemente deformadas durante la orogenia Laramide que comenzó durante el Cretácico superior. Durante el Paleógeno, las calizas fueron intrusionadas por granodioritas y monzonitas, las cuales produjeron aureolas de contacto y promovieron la mineralización en la roca encajonante (Yáñez-García y García-Durán, 1982; Siebe et al., 1995).



Los volcanes más prominentes de la cuenta se encuentran representados en la Figura 2.2A. En cuanto al interior de la cuenca, las estructuras más voluminosas son Cerro Pizarro, Cerro Pinto y Las Derrumbadas.

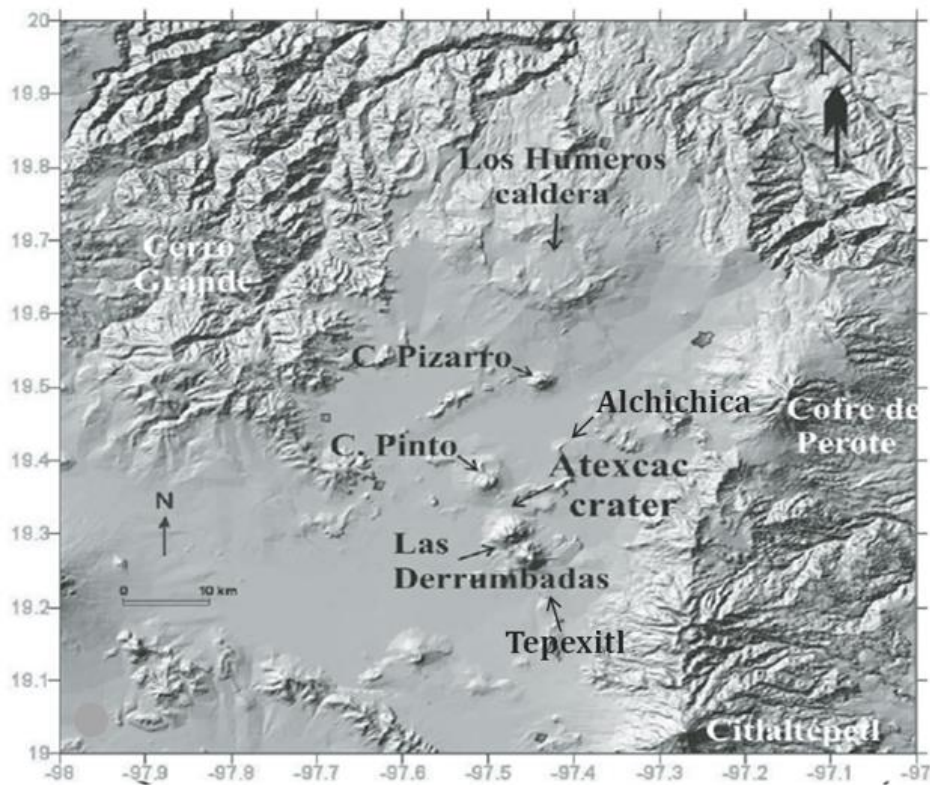


Figura 2.2A. Localización del área de la Cuenca Serdán-Oriental en la cual se resaltan los edificios volcánicos más prominentes (Carrasco-Núñez et al., 2012).

Las Derrumbadas son dos estructuras dómicas gemelas alineadas noroeste-sureste que se encuentran en la parte central de la cuenca (Figura 2.2A. y 2.2B) (Siebe y Verma, 1988).

La edad de los domos había sido incierta hasta hace poco tiempo, pues Yañez-García y Casique (1980), mediante el método de fechamiento K-Ar, obtuvieron una edad de 320,000 años, algo que parecía plausible por el aspecto bastante alterado y degradado de los domos. Sin embargo, las características en campo como la escasa generación de suelo y superficie cubierta por montículos indicarían una edad más joven para los domos; Siebe (1985) proponía en ese entonces una edad de entre 10 000 y 40 000 años. Es hasta el 2014, que Bernal et al., mediante el método de  $^{230}\text{Th}/\text{U}$  aplicado en zircones obtuvo una edad aproximada de 4,700 años. Más adelante, Chédeville et al. (2020) obtuvo una edad de aproximadamente 2,000 años antes del presente, mediante consideraciones estratigráficas y el fechamiento por  $^{14}\text{C}$  de carbón encontrado en paleosuelos, justo debajo de depósitos de avalancha y oleadas piroclásticas asociados con la erupción.

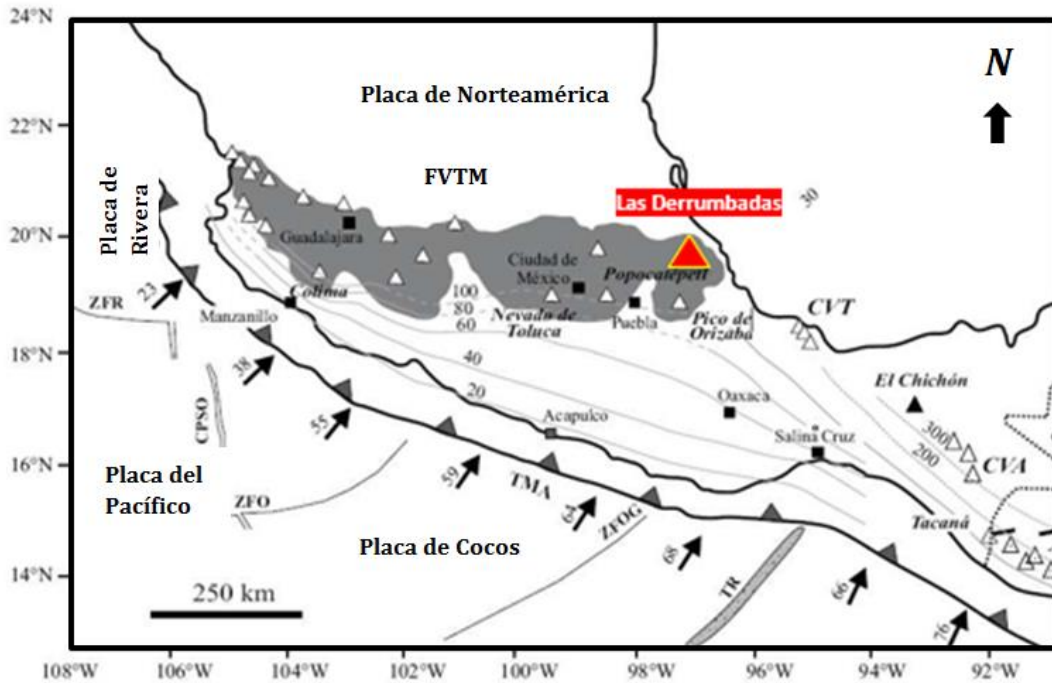


Figura 2.2B. Ubicación de Las Derrumbadas dentro de la Faja Volcánica Transmexicana. Este arco magmático es producto de la subducción de la placa de Cocos debajo de la placa de Norteamérica. En la imagen se muestran también los estratovolcanes más importantes, así como ciudades importantes. Modificado de Macías (2005).

De acuerdo con las observaciones de Siebe y Verma (1988), ambos domos consisten en una monótona riolita gris con biotita y fenocristales de plagioclasa inmersos en una matriz vítrea con cristales de feldespato y una menor cantidad de minerales opacos. Posteriormente, Siebe et al. (1995) y Siebe et al. (1997) describen por separado cada domo. Sus observaciones se resumen a continuación:

**Domo Noroeste.** - El domo se eleva a más de 1000m respecto al área que lo rodea, tiene un volumen aproximado de entre 6 y 7 Km<sup>3</sup>. Carece de caparazón y consiste principalmente de riolita gris microcristalina que ha sido alterada en varios sectores debido a actividad fumarólica. Adicionalmente se encuentra rodeado por extensos depósitos de avalancha con topografía de montículos. Los depósitos contienen una caótica mezcla de bloques de todos los tamaños de sedimento lacustre, depósitos de oleada piroclástica, caliza y obsidiana. En las partes más distales, se encuentran cubiertos por depósitos delgados de oleada piroclástica, los cuales indican que su emplazamiento estuvo acompañado por actividad explosiva.

**Domo Sureste.** - Este domo tiene aproximadamente la misma altura que el domo noroeste y de igual forma se encuentra rodeado por depósitos de avalancha de composición heterogénea similares al domo noroeste, además de depósitos de avalancha más recientes que tienen características diferentes, pues son más pequeños, más estrechos, tienen frentes escarpados y están mayormente compuestos por riolita gris. También en contraste con las anteriores, estas avalanchas están asociadas con cicatrices con forma de herradura presentes en el domo, cuyo buen estado de preservación indica que son de formación reciente. Además, se observan áreas con alteración a caolinita producto de una prolongada actividad fumarólica que sigue activa en la actualidad.



Figura 2.2C. Vista satelital de Las Derrumbadas en la cual se aprecia el Domo Noroeste y el domo sureste. Obtenido de Google Earth (2019).

En cuanto a las observaciones en campo sobre los depósitos de avalanchas, Siebe et al (1995) mencionan que se encuentran al menos 8 depósitos individuales, los cuales se pueden clasificar en dos tipos. Los depósitos de primera generación son más antiguos, se originaron por el colapso de sectores del domo con una apertura de entre  $60^\circ$  y  $90^\circ$  y alcanzan distancias de hasta 9 Km. Son heterolitológicos e incluyen bloques de caliza, sedimentos lacustres, obsidiana y depósitos erosionados de oleadas piroclásticas. Una parte más tardía de la erupción se caracteriza por actividad fumarólica y el emplazamiento de depósitos de avalancha de segunda generación originadas por el colapso de sectores con aperturas de entre  $20^\circ$  y  $30^\circ$ . Estos cubren una menor área y no rebasan los 4.5 Km de distancia. En cuanto a su composición, son monolitológicos conformados por riolita microcristalina.

Como se mencionó anteriormente, alrededor de Las Derrumbadas se encuentran depósitos de oleadas piroclásticas intercalados con depósitos de avalanchas. Estos depósitos de oleadas fueron recientemente estudiados por Molina Guadarrama (2018), el cual los describe en diferentes sectores alrededor de los domos y asocia su formación al proceso de crecimiento y destrucción de éstos. Tales depósitos presentan estructuras primarias características como lapilli acrecional, fracturas por contracción, venas de elutriación, laminación cruzada y en ocasiones subparalela. Sus componentes litológicos principales son productos juveniles (riolita gris y blanca ó pómez) en aproximadamente un 82%, cuyo origen son los domos. El porcentaje restante corresponde a líticos como caliza, entre otros líticos no diferenciados.

De acuerdo con Molina Guadarrama (2018) los procesos que podrían haber producido las diferentes secuencias de oleadas piroclásticas se consideran: (1) Freatomagmatismo, puesto que algunas secciones estratigráficas presentan capas consolidadas y lapilli acrecional, lo cual apunta a la presencia de agua, además de altas concentraciones de líticos derivados del basamento. (2) Colapsos de márgenes de los domos, ya que algunas capas están compuestas

casi completamente de riolita gris. (3) Súbita descompresión del interior el domo siguiendo un colapso sectorial, lo cual explicaría la presencia de capas de pómez en la base de secuencias depositadas sobre depósitos de avalancha.

### 2.2.1 Estratigrafía de la cuenca

La estratigrafía pre-volcánica subyacente a los domos Las Derrumbadas se encuentra bien descrita gracias a los trabajos de exploración geotérmica realizados por la Comisión Federal de Electricidad en la zona de Los Humeros-Las Derrumbadas en la década de los ochentas.

De acuerdo con el trabajo de Yañez-García y García-Durán (1982), los domos riolíticos Las Derrumbadas se encuentran por encima de formaciones litológicas generalmente calcáreas (calizas), del Jurásico y sobre todo del Cretácico como se resume a continuación:

#### **Jurásico**

**-Formación Pimienta (propuesto):** Representada por calizas y dolomitas de color gris oscuro a negro con bandas de pedernal negro y calizas arcillosas compactas de color negro.

#### **Cretácico**

**-Formación Tamaulipas inferior:** Representada por calcarenitas de colores gris, pardo y crema; miembro bentónico intercalado con caliza criptocristalina de colores gris, claro y crema; y por caliza color crema.

**-Formación Tamaulipas superior:** Representada por calizas ligeramente arcillosas de color pardo claro, gris-azul oscuro y gris con nódulos o bandas irregulares de pedernal entre los planos de estratificación. Esta formación es una de las tres formaciones que afloran cerca de los domos.

**-Formación Orizaba:** Calizas de tipo arrecifal con abundante fauna bentónica, las cuales afloran al pie suroriental de Las Derrumbadas.

**-Formación Guzmantla:** Representada por calcarenita biógena parda clara y crema ligeramente alterada por disolución. Aflora del lado suroriental de Las Derrumbadas donde forma la Sierra de la Ventana.

La estratigrafía volcánica de la cuenca es de alta relevancia, pues como se mencionó anteriormente la cuenca está caracterizada por vulcanismo monogenético bimodal que ha dado lugar a una alta variedad de estructuras volcánicas. Algunas de las más jóvenes y más relevantes para este estudio se describen a continuación.

#### **Los Humeros**

Uno de los volcanes más sobresalientes al norte de la cuenca es la caldera de Los Humeros que contiene uno de los campos geotérmicos más importantes del país con aproximadamente 45 Mw de poder instalados (Carrasco-Núñez et al., 2012).

La actividad del volcán Los Humeros comenzó hace aproximadamente 0.5 Ma y se han registrado al menos 32 erupciones, con al menos dos que produjeron ignimbritas silíceas, numerosas erupciones plinianas intercaladas con formaciones de domos dacíticos y riodacíticos y recientes flujos de lava basáltica-andesítica asociados a actividad estromboliana (Ferriz y Mahood, 1984; Wilcox, 2011).

Una de las erupciones más grandes de la caldera formó la Ignimbrita Zaragoza que está intercalada con dos capas de caídas de pómez y está compuesta por lapilli y ceniza con pobre clasificación. En varios lugares la ignimbrita muestra una zonificación composicional normal e inversa, definida por cambios verticales en abundancia relativa de riocita (69-71 wt% SiO<sub>2</sub>) y andesita (54-63 wt% SiO<sub>2</sub>) (Carrasco-Núñez et al., 2012).

En cuanto a los volcanes más cercanos a Las Derrumbadas, destaca el trabajo de Chédeville et al. (2020), quienes describen la estratigrafía y fechamiento de los volcanes del Holoceno tardío, es decir los más recientes, cuyos resultados se representan en la Figura 2.2D.

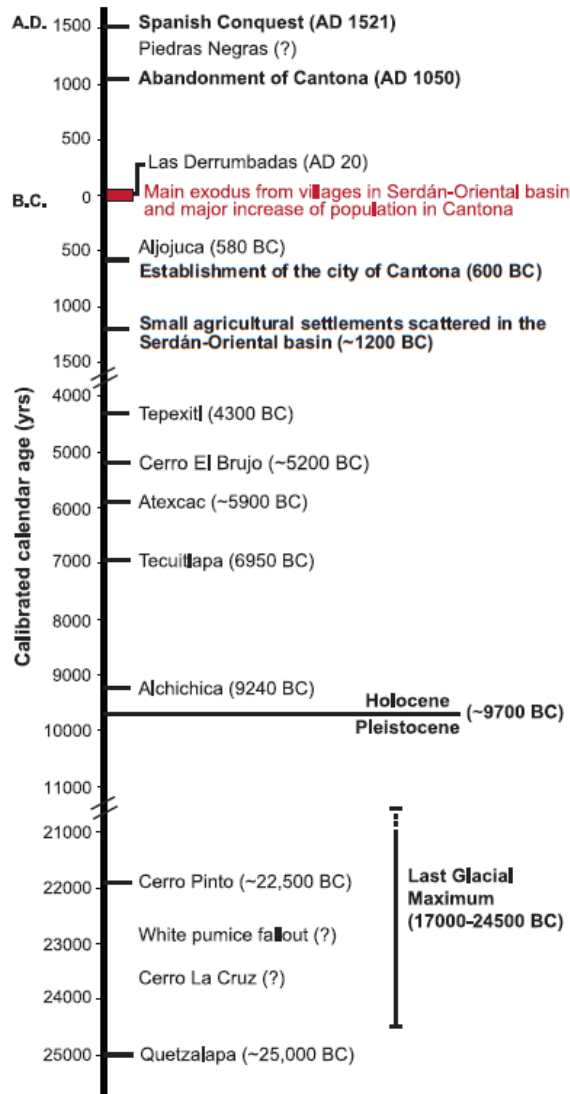


Figura 2.2D. Orden cronológico de los volcanes de la Cuenca Serdán-Oriental durante los últimos 27,000 años. En negritas se observan los eventos geológicos y desarrollos sociales más importantes (tomada de Chédeville et al.,2020).

Los volcanes más importantes cercanos a Las Derrumbadas se describen a continuación.



## **Cerro Pinto**

Cerro Pinto es un anillo de toba/complejo dómico formado hace alrededor de 22,500 años BC. El complejo está compuesto por 4 anillos de toba y 4 domos que fueron emplazados en 3 etapas eruptivas marcadas por cambios en el centro de emisión y en el estilo eruptivo (Zimmer et al., 2010; Carrasco-Núñez et al., 2012; Chédeville et al., 2020).

Los productos generados reflejan diferentes mecanismos de deposición ocurridos simultáneamente debido a la complejidad de su actividad. Se trata de depósitos de caída, asociados a productos de oleadas piroclásticas, de flujos de bloques y cenizas y de corrientes de densidad piroclástica (Zimmer et al., 2010).

Los productos constan principalmente de pómez (60-70 vol.%) con forma angular-subangular moderadamente vesiculada con cristales de plagioclasa y biotita subedral (típicamente <250 µm). Sus vesículas están ligeramente elongadas de forma paralela al eje longitudinal y en las fracciones más finas de los productos hay algunos fragmentos de vidrio (Chédeville et al., 2020).

## **Alchichica**

Alchichica es un maar formado sobre un cono de escorias y otros depósitos previos hace aproximadamente 9200 años BC. Principalmente se observan dos unidades estratigráficas: (1) La unidad inferior depositada por corrientes de densidad piroclástica húmedas y (2) La unidad superior compuesta por productos piroclásticos de caída intercalados con depósitos de corrientes de densidad en condiciones húmedas y secas (Tchamade et al., 2020).

Los productos proximales consisten de ceniza fina endurecida, con estratificación cruzada de color gris y lapilli acrecional. Cerca de la fuente, la estratificación está fuertemente deformada por el impacto de bombas piroclásticas, algunas de las cuales forman parte de los productos máficos juveniles y contienen cristales de piroxeno (Tchamade et al., 2020; Chédeville et al., 2020).

## **Atexcac**

Atexcac es un volcán tipo maar que corta a varios depósitos previos que incluyen un cono de escorias, lavas, y depósitos piroclásticos plinianos del Cerro Pinto (Chédeville et al., 2020). El cráter de Atexcac se formó por intensas explosiones freatomagmáticas hace aproximadamente 5900 años BC (Chédeville et al., 2020). Sus productos juveniles son partículas de escoria de color gris oscuro con fenocristales de plagioclasa, microlitos de olivino y xenolitos de plagioclasa y zeolita (Carrasco-Núñez et al., 2012; Chédeville et al., 2020).

## **Tepexitl**

Tepexitl es un anillo de toba ubicado al sur de Las Derrumbadas (Austin et al., 2011; Chédeville et al., 2020). De acuerdo con las observaciones realizadas por estos autores, su erupción pasó de un régimen freatomagmático a magmático. Sus productos consisten de riolita gris moderadamente vesiculada, pómez, obsidiana y líticos, los cuales consisten de fragmentos de toba café. Todas estas partículas contienen abundantes fenocristales de plagioclasa, feldespato potásico, biotita, un poco de cuarzo y granate (almandino).

El paleosuelo ubicado directamente debajo de sus depósitos ha sido fechado con una edad de 4,300 años BC (Chédeville et al., 2020).

Además de estos volcanes, resalta la presencia de conos de escoria alrededor de Las Derrumbadas como el Cerro Las Águilas al noreste y el Tecajete al suroeste, solo por mencionar algunos. Al este de los domos se encuentran unos flujos de lava que cubren un depósito de avalancha de Las Derrumbadas (Piedras Negras), probablemente el evento más joven de la cuenca (Chédeville et al.,2020). Siebe y Verma (1988) describen que estos flujos presentan un espesor de 40 metros y se componen de andesita con fenocristales de plagioclasa, hornblenda, algunos clinopiroxenos y abundantes xenolitos.

### 3. Metodología

En este apartado se describen las actividades desarrolladas para cumplir con los objetivos planteados, empezando por la búsqueda de información previa de la zona a estudiar. Para establecer el origen de los componentes de los depósitos de avalancha primero se llevó a cabo trabajo de campo y recolección de muestras, las cuales posteriormente fueron analizadas en laboratorio mediante diferentes técnicas, incluyendo granulometría y análisis de componentes, enriquecidas por observaciones en lámina delgada en algunos casos. Por último, para la cartografía preliminar de los depósitos en la base del domo, se realizó trabajo de gabinete en el que se estudiaron fotografías aéreas antiguas, así como imágenes satelitales actuales y se utilizaron herramientas de edición de imágenes para producir mapas generales de los depósitos y estructuras. Se tomaron en cuenta también observaciones de campo en esta última etapa.

- Consulta de fuentes de información.
- Trabajo de campo.
- Trabajo de laboratorio.
- Trabajo de gabinete.

#### **Consulta de fuentes de información**

A lo largo del desarrollo del presente trabajo se consultaron libros, artículos científicos, trabajos previos, entre otros, acerca de la zona de estudio y los eventos volcánicos que caracterizan un ambiente geológico de este tipo.

#### **Trabajo de campo**

El trabajo de campo se efectuó en dos salidas. Durante el periodo del 15 al 21 de enero del año 2019 se tomaron muestras representativas y se describieron los depósitos de avalancha, los cuales fueron denominados según la estructura volcánica o poblado más cercano a su deposición: la avalancha “Atexcac” al norte del Domo Noroeste y la avalancha “Emilio Portes Gil” al oeste del mismo domo. Durante el periodo del 13 al 17 de mayo del mismo año investigamos principalmente los depósitos de la avalancha “Las Águilas” al este del Domo Noroeste.

El trabajo en campo consistió en buscar, identificar y estudiar afloramientos donde se pudiesen observar los distintos tipos de unidades litológicas internas que caracterizan a las avalanchas. Una vez identificado el punto de interés, se ubicó el sitio en la carta topográfica de la zona, tomando como referencia la ubicación de los domos de Las Derrumbadas y se procedió a la toma de coordenadas geográficas mediante el uso de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Después, se continuó con la descripción de las unidades, analizando la granulometría presente, identificando si estaba compuesto de ceniza, lapilli y/o bloques. Después se determinó la coloración que presentaba, así como los distintos componentes litológicos e intentó clasificarlos de acuerdo con si presentaban mineralogía visible a simple vista in situ o mediante el uso de una lupa como lo fue en el caso de los líticos de riolita o bien, si reaccionaban al ácido clorhídrico que revelara la presencia de carbonatos como en el caso de los líticos de caliza. En el caso de los bloques, se tomaron medidas de largo, ancho y alto.

Al tener lista la descripción general del depósito, siguió después dibujar un esquema representativo del afloramiento en la libreta de campo que resaltara las características previamente descritas y se procedió a recolectar una muestra lo más prístina y representativa posible de las unidades litológicas presentes, evitando los bloques más grandes y muestreando sobre todo la parte más fina (matriz) de la unidad. Este muestreo se realizó mediante la ayuda de pala y espátula para limpiar la parte más superficial del afloramiento para que estuviera desprovista de vegetación, así como las porciones alteradas o intemperizadas u otros agentes externos al depósito. La cantidad de muestra seleccionada se guardó en bolsas de plástico con cierre hermético para evitar su pérdida. Así mismo, las bolsas fueron rotuladas con una clave única siguiendo la nomenclatura de Molina Guadarrama (2018) y Chédeville et al. (2020) que comienza con DER (de Derrumbadas), los dos últimos dígitos del año en el que fue muestreada, seguido de la numeración consecutiva para su fácil manejo y posterior identificación durante el trabajo en laboratorio.



Figura 3.1. Fotografía del trabajo de campo que incluyó el estudio visual del afloramiento. Escala: estudiante de 1.8 m de altura.

### **Trabajo de laboratorio**

El trabajo de laboratorio para el total de 15 muestras recolectadas se llevó a cabo en los laboratorios de sedimentología volcánica y en la sala de microscopios del Instituto de Geofísica (UNAM) mediante tres tipos de análisis: Granulometría mediante el tamizado, análisis de componentes mediante observaciones bajo el microscopio binocular y análisis mineralógicos de lámina delgada bajo el microscopio petrográfico.

## Granulometría.

El análisis granulométrico se llevó a cabo mediante la técnica del tamizado manual. Para ello, las muestras fueron colocadas en charolas de aluminio para el secado en un horno a 50° C durante 24 horas, con el fin de eliminar toda la humedad que propiciara la cohesión entre las partículas. Después del secado, las muestras fueron vaciadas en una columna de tamices (Figura 3.2A) apilados según la escala de tamaños de Uden-Wentworth, ( $\phi = -\log_2 \text{diámetro en mm}$ ), desde el tamaño  $-4\phi$  (16 mm) hasta  $>4\phi$  ( $<0.063 \text{ mm}$ ) cada  $\frac{1}{2}\phi$ . La columna de tamices se agitaba manualmente hasta que la separación por tamaños estuviera completada en cada tamiz y se procedía a pesar el resultado en una balanza Ohaus (Figura 3.2C) con resolución de 0.01 g.

El objetivo de esta técnica es conocer la abundancia de cada tamaño de partícula presente en la muestra, para este caso de partículas de tamaño lapilli hasta ceniza fina. Por lo tanto, el resultado de la técnica es un análisis cuantitativo de la distribución de tamaños y su relación con el porcentaje en peso representado mediante un histograma, el cual señala también, de manera cuantitativa, la moda y el grado de selección del depósito.

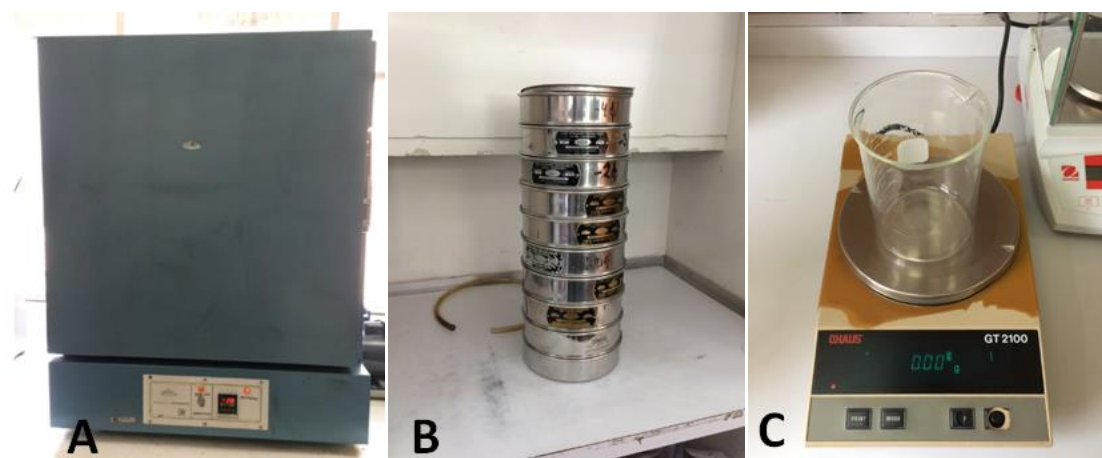


Figura 3.2 A, B y C. A) Horno de laboratorio donde fueron secadas las muestras. B) Columna de tamices para el separado en diferentes tamaños. C) Balanza.

## Análisis de componentes

De las muestras previamente tamizadas se procedió a limpiar las fracciones y a observarlas bajo el microscopio binocular (Figura 3.3B). La fracción que presentó mayor variabilidad en los tipos de componentes fue la de tamaño  $1\phi$  (0.5 mm), por lo tanto, ésta fue la fracción que se seleccionó para el análisis de componentes. Esta técnica consiste en separar los distintos tipos de partículas encontradas. Para ello se toma una porción de la fracción que contenga una cantidad aproximada de 300 partículas, mismas que se separan de acuerdo con sus distintas características como su mineralogía, reacción al ácido clorhídrico, forma, grado de vesiculación, entre otras. De esta manera, siguiendo la misma clasificación que la establecida anteriormente por Molina Guadarrama (2018) para estudiar las oleadas piroclásticas de los domos Las Derrumbadas, se lograron clasificar en los siguientes tipos:

- Riolita gris
- Riolita blanca (pómez)

- Caliza
- Agregados
- Partículas oxidadas
- Cristales
- Vidrio translúcido
- Pedernal
- Líticos no diferenciados

Tras finalizar el conteo para cada muestra y su clasificación, los resultados se presentaron en gráficos de tipo “pastel” que muestran la abundancia relativa de cada tipo de partícula dentro de la muestra.

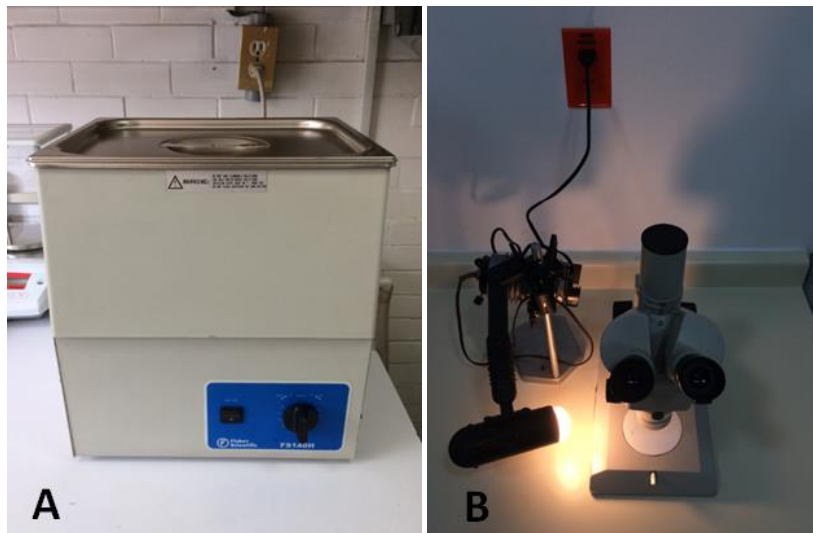


Figura 3.3 A y B. A) Máquina de ultrasonido donde se llevó a cabo la limpieza de las partículas de las fracciones previo a su análisis de componentes bajo el microscopio binocular (B).

#### **Observaciones en lámina delgada**

Esta técnica se utilizó para complementar el análisis de componentes, pero sólo se aplicó en algunas muestras, en especial en las que era necesario conocer la fracción fina de  $4\phi$ , cuyas muestras elaboradas en un laboratorio en los EEUU, fueron consolidadas mediante la aplicación de resina. La técnica consiste en identificar los componentes de acuerdo con las propiedades ópticas que caracterizan a cada tipo de partícula y en especial a los minerales. Para esto se observaron bajo el microscopio petrográfico un total de siete láminas delgadas de ceniza gruesa y fina, y una lámina de escoria basáltica.

#### **Trabajo de gabinete**

El trabajo de gabinete consistió en realizar la cartografía de los depósitos cercanos a los domos Las Derrumbadas, específicamente los relacionados al Domo Noroeste, con énfasis en las avalanchas y lahares. Para ello, se observaron fotografías aéreas del INEGI de noviembre de 1974 mediante un estereoscopio. Los cambios en la topografía se compararon con imágenes satelitales publicadas por Google Earth.

En fotocopias de las fotos aéreas se dibujaron los límites de los depósitos que fueron posteriormente digitalizados en Adobe Illustrator. Al obtener los límites y el contorno de las



estructuras internas de cada depósito, se logró elaborar un mapa general de los depósitos de avalancha y lahares del Domo Noroeste de Las Derrumbadas.

#### 4. Resultados

En esta sección se describen primero las características de los diferentes depósitos de avalancha que se identificaron en la base del Domo Noroeste de Las Derrumbadas por medio de cartografías realizadas usando fotos aéreas y observaciones de campo, así como los estudios granulométricos y análisis de componentes de muestras representativas de las diferentes unidades litológicas identificadas. En segundo, se presentan resultados del análisis petrográfico de algunas muestras de particular interés.



Figura 4. Mapa general de Las Derrumbadas y alrededores. Los cuadros de color en línea punteada representan la ubicación de las zonas de estudio correspondientes a la Figura 4.1A, Avalancha Atexcac; Figura 4H, lahares primarios; Figura 4L, Avalancha Emilio Portes Gil y Figura 4U, Avalancha Las Águilas.

#### 4.1 Región NE: Avalancha Atexcac

Los depósitos de la avalancha Atexcac se encuentran al noreste del domo noroeste, lo que indica una dirección de emplazamiento hacia el NNE (Figura 4). La avalancha Atexcac cubre poca superficie, aproximadamente 5 Km<sup>2</sup> (estimación realizada con Google Earth). Alcanza una distancia de poco más de 2 Km respecto a la base del domo, donde está recubierta por depósitos de lahares recientes (Figura 4.1A). Su topografía presenta poca cantidad de montículos (*hummocks*) de baja altura (3-10 m). Los depósitos de la avalancha están expuestos en la parte superior del cráter de Atexcac donde recubren los productos de la erupción de maar (Carrasco-Núñez et al. 2007 y nuestras observaciones) por lo tanto, es probable que una parte de la avalancha yazca en el interior del mismo, aunque no sea posible verificarlo por la presencia del lago. En el sector más oriental, los depósitos de la avalancha recubren parcialmente una loma compuesta por caliza de color oscuro plegada, con vetas de calcita y pedernal (sitio DER 19157 en Figura 4.1A).

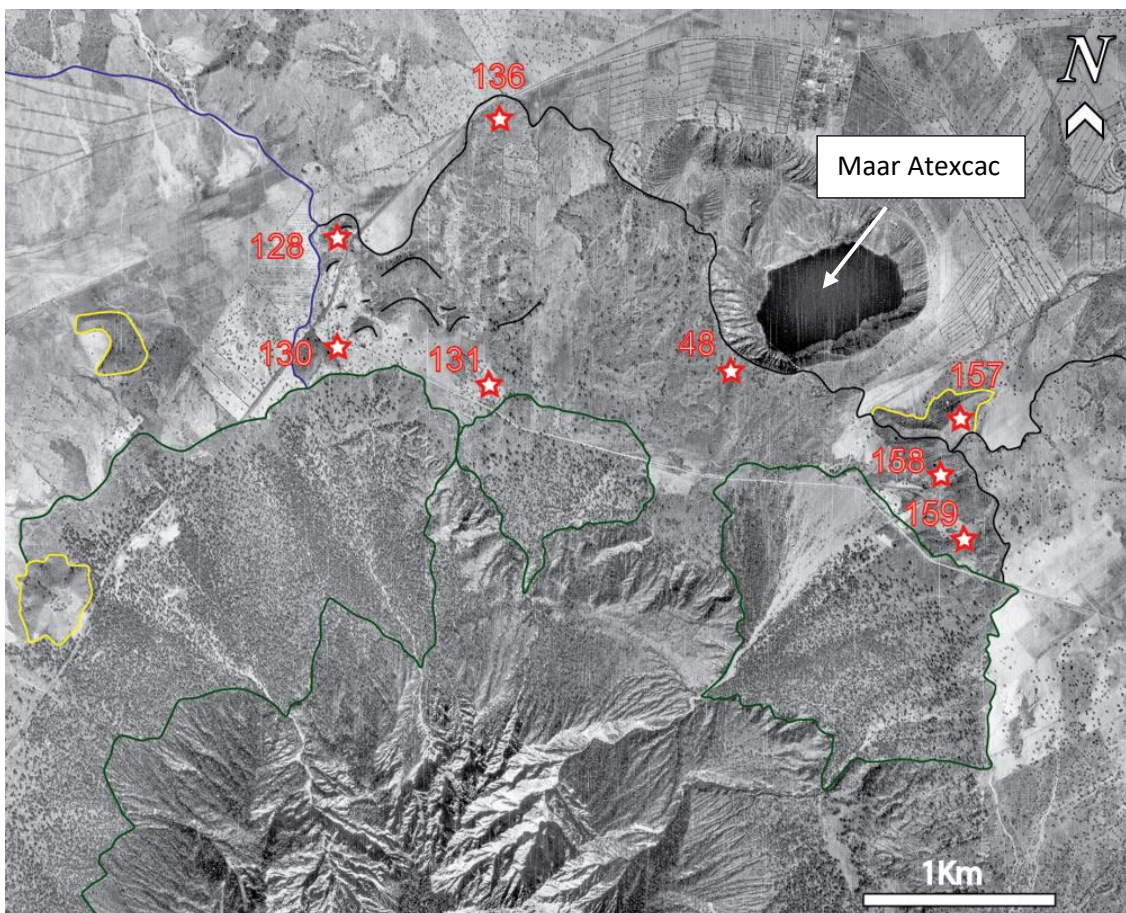


Figura 4.1A. Fotografía aérea del Domo Noroeste de las Derrumbadas donde se delimita la Avalancha Atexcac (línea negra), depósitos de lahares distales más antiguos (líneas azules) y proximales más recientes (líneas verdes); y otros contactos con litologías anteriores a los domos (líneas amarillas), los cuales han sido rodeados o están parcialmente recubiertos por los depósitos de avalancha y lahares. Las estrellas indican la ubicación de los sitios donde el interior de los depósitos de la avalancha aflora, incluyendo los sitios donde se recolectaron muestras para analizar en laboratorio (sólo los últimos números del nombre de las muestras están reportados en el mapa).



Los depósitos de esta avalancha están constituidos por varias unidades litológicas (brecha riolítica, toba café, ignimbrita) en facies de bloque y mezcla que afloran en distintos sitios, con contactos claros entre cada una y difíciles de evaluar debido a la escasez de afloramientos. Se describen a continuación usando resultados de observaciones de campo y análisis de laboratorio (granulometría y componentría).

#### Unidad brecha riolítica

Una de las unidades más importantes en volumen en la facies de bloque de la avalancha está compuesta por una brecha rica en fragmentos riolíticos. Los clastos que componen la brecha riolítica son angulosos y están mal clasificados con tamaños desde bloques de decenas de centímetros, hasta ceniza (o arena) fina que forma la matriz (Figura 4.1B, C). Los depósitos están compuestos por caliza, riolita gris y blanca (pómez), pedernal y obsidiana, principalmente.

En el sitio DER 19128A, ubicado al extremo oeste de la avalancha, la brecha tiene un espesor mayor a los 5 m. En el sitio DER 19136 hacia el noreste se encuentra la brecha en contacto con la unidad “toba café”, la cual está compuesta principalmente por clastos de tamaño ceniza color café de riolita gris, blanca y líticos no diferenciados, afloramiento que se describe a detalle más adelante.

En el sitio DER 1748 B, al límite del maar Atexcac, la brecha forma el espesor total del depósito de avalancha, y contiene una proporción importante de pómez y obsidiana (Figura 4.1 C). En un montículo en el sitio DER 19159 al extremo este del depósito de la avalancha, la unidad forma una capa empinada con un espesor de hasta 5 metros (Figura 4.1D). En cuanto al sitio DER 19130, la brecha está compuesta por partículas angulosas desde tamaños de ceniza (o arena y limo), hasta bloques (35 x 17 x 21 cm en promedio), matriz soportados con componentes heterolitológicos de pedernal, caliza, riolita gris con micas oscuras, probablemente biotita (Figura 4.1E).

La brecha riolítica también aflora en el sitio DER 19158, el cual corresponde a un corte de un montículo de la avalancha. En este sitio, la brecha es matriz soportada y está compuesta por líticos angulosos de caliza, riolita gris bandeada, obsidiana y riolita vesiculada de tamaños de ceniza a bloques (o grava y arena) de hasta más de un metro.

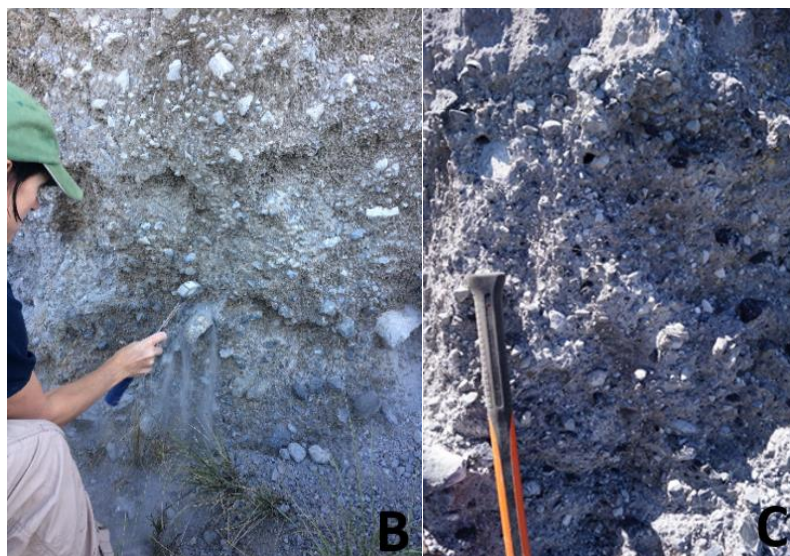
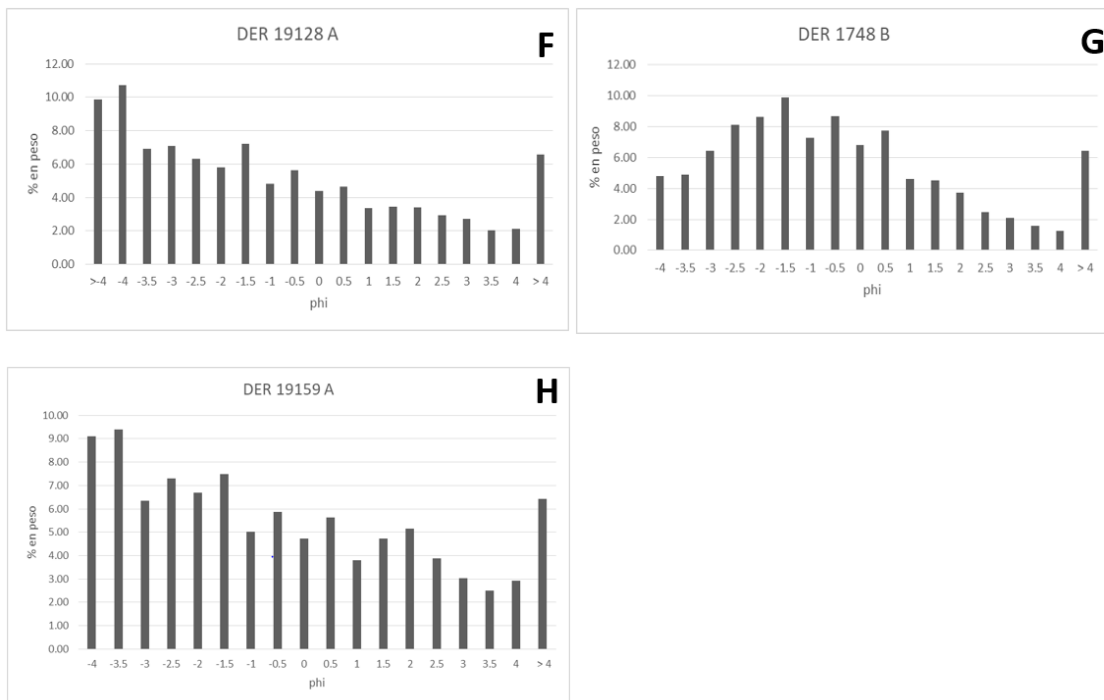


Figura 4.1 B y C. Fotografías de la unidad brecha riolítica en los sitios DER 19128 (B) y DER 1748(C). Escala: pica de geólogo de 30 cm de altura.



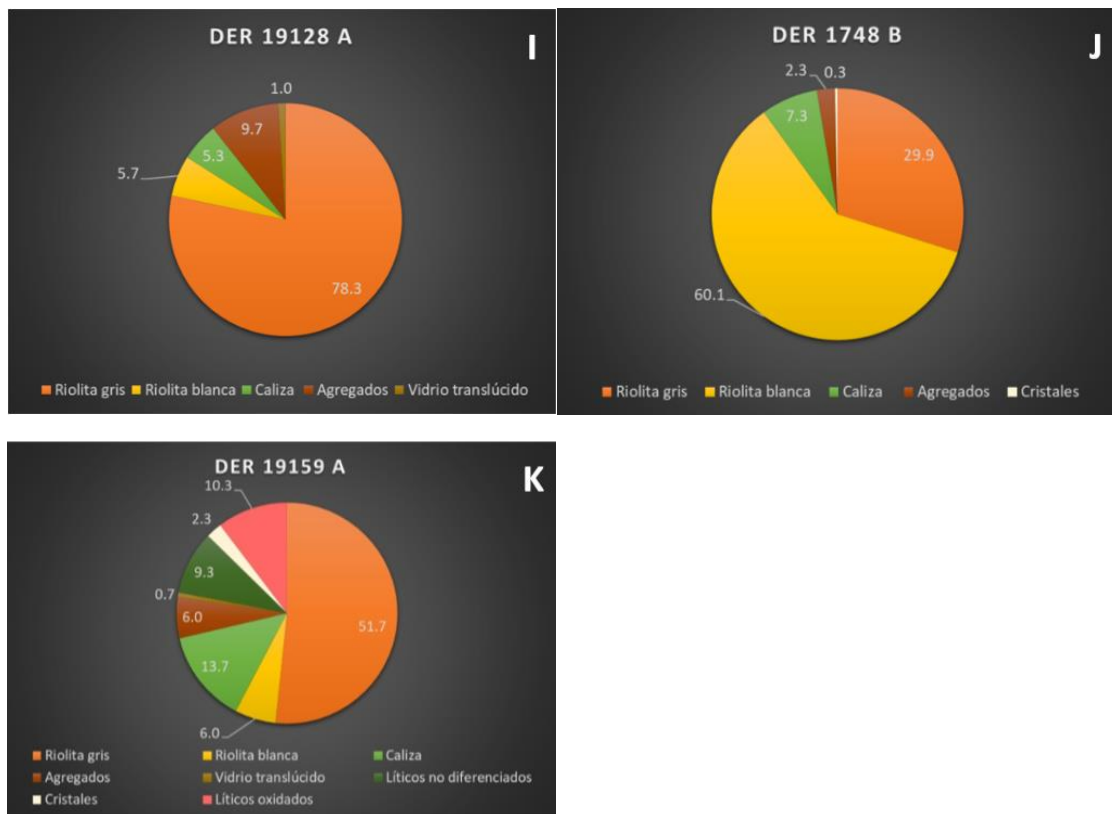
Figura 4.1 D y E. Fotografías del depósito de avalancha del sitio DER 19159 A (izquierda), con persona de 1.6 m como escala, el óvalo blanco delimita el área que muestra la ubicación de la brecha riolítica; y sitio DER 19130 (derecha) escala mango de pica de 30 cm de largo.

Excluyendo las partes con clastos más grandes que se observaron in-situ, se tomaron muestras de una parte relativamente fina de la unidad brecha en tres de estos sitios: DER 19128 A, 1748 B y 19159 A. Los resultados de los análisis granulométricos indican una muy mala clasificación en el tamaño de grano, además de una proporción relativamente importante (>6 wt. %) de ceniza muy fina (o limo) ( $\phi > 4$ ).



Figuras 4.1 F, G y H. Histogramas correspondientes al análisis de granulometría de las muestras de la brecha riolítica. Nótese que la proporción de las partículas grandes está subestimada debido al muestreo.

Los resultados del análisis de componentes para las mismas muestras están graficados en las figuras 4.1 I, J y K. En dos sitios, domina en abundancia la riolita gris (DER 19128 A: 78.3 vol. %; DER 19159 A: 51.7 vol. %), mientras que en el sitio DER 1748 B es menos abundante (29.9 vol. %). Estos clastos presentan una textura microcristalina o vítrea (obsidiana), contienen mica oscura (biotita) y en ocasiones granate. El segundo clasto más abundante es la riolita blanca o pómez que domina en el sitio DER 1748 B (60.1 vol. %), mientras que compone 5.7 y 6.0 vol. % en los sitios DER 19128 A y DER 19159 A, respectivamente. Estas partículas contienen abundantes vesículas redondas y cristales de mica oscura (biotita) tal como en la riolita gris. El tercer tipo de clasto más abundante es la roca caliza (5.3-13.7vol.%) que comúnmente es color marrón, presenta superficies lisas y reacciona al ácido clorhídrico. En esta unidad también hay pequeños fragmentos de roca que están agregados, unidos mediante cementante aparentemente calcáreo. Además, se encuentran líticos no diferenciados (particularmente abundantes en la muestra DER 19159 A), los cuales en este caso son partículas foliadas con un brillo sedoso, por lo que podrían ser rocas metamórficas, aunque se requiere más investigación para confirmar esta suposición.



Figuras 4.1 I, J y K. Gráficas de pastel correspondientes al análisis de componentes de muestras de la unidad litológica “brecha riolítica” de la Avalancha Atexcac, cuyos resultados reflejan la dominancia en volumen de clastos de riolita gris (DER 19128 A; DER 19159 A) o blanca (DER 1748 B), además de la presencia de caliza y líticos. Valores de % en volumen.



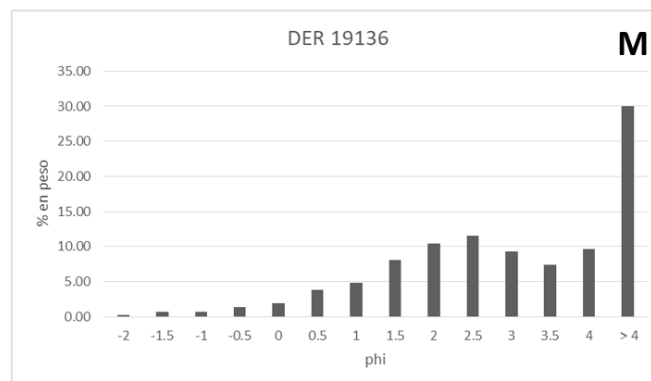
## Unidad toba café

La unidad “toba café”, que representa una facies de bloque o matriz dependiendo del sitio, consiste en un depósito masivo y bien clasificado de ceniza gruesa y fina café observada y muestreada en el sitio DER 19136 ubicado al límite norte del depósito de avalancha (Figura 4.1 L). En este sitio, se encuentra en contacto claro con la unidad “brecha riolítica”. Alcanza su mayor espesor en el sitio DER 19128 (10 m) y va disminuyendo conforme se va extendiendo hacia el noreste.



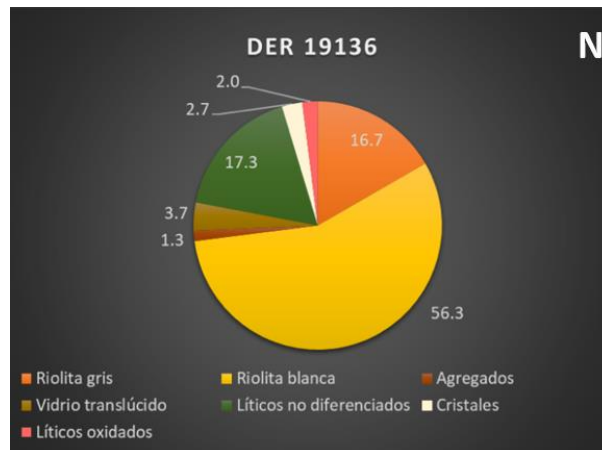
Figura 4.1 L. Fotografía del sitio DER 19136 donde aflora la unidad “toba café”. Escala: persona de 1.6 m de altura.

El análisis granulométrico del depósito refleja que está compuesto de una fracción de grano fino ( $\phi > 0.5 - 4.0$ ) con relativamente buena clasificación, pero la distribución de tamaños presenta un aspecto bimodal debido a un alto porcentaje (30 wt. %) de ceniza muy fina (o arena y limo) ( $> 4 \phi$ ).



Figuras 4.1M. Histograma correspondiente al análisis de granulometría de las muestras de la unidad “toba café”.

La muestra de la unidad “toba café” está dominada por partículas angulosas de riolita gris y riolita blanca, no hay presencia de caliza, y contiene una cantidad notable de cristales, los cuales aparentemente son anfíboles, así como de líticos que presentan vesículas circulares; probablemente se trate de escorias basálticas (Figura 4.1 N).



Figuras 4.1 N. Gráfica de pastel correspondiente al análisis de componentes de la muestra del sitio DER 19136 dominada por la presencia de la riolita gris, blanca y los líticos no diferenciados. Valores de % en volumen.

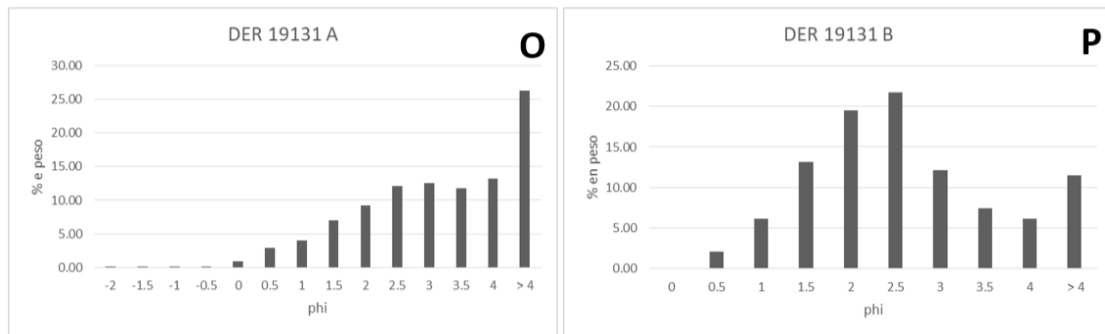
Unidad ignimbrita.

La unidad litológica “ignimbrita” se observó solamente en esta avalancha en el sitio DER 19131 ubicado en la parte central del depósito. Se conforma por capas de ceniza rosada y verde (Figura 4.1 Ñ) contenidas en un lente microfallado, ubicado debajo de una capa de brecha riolítica, con un contacto claro entre ambas unidades.



Figura 4.1 Ñ. Fotografía de la unidad ignimbrita en el depósito DER 19131 que muestra A) la capa rosada (arriba) y B) la capa verdosa (abajo) donde se nota el contacto irregular, pero claro entre ambas capas. Escala: espátula de 15 cm.

En los análisis de granulometría (Figuras 4.1 O y P), se observa que las muestras de esta unidad presentan una buena clasificación y alta abundancia de partículas muy finas ( $\phi > 4$ ), en particular para la muestra de ceniza rosa.



Figuras 4.1 O y P. Histogramas correspondientes al análisis de granulometría de las muestras de la unidad “ignimbrita” rosa (A) y verde (B) obtenidas en el sitio DER 19131.

Los resultados de la composicionalidad revelan que estas mismas muestras de ceniza de la unidad “ignimbrita” del sitio DER 19131 están compuestas por un alto porcentaje (78.0-86.0 vol.%) de fragmentos de vidrio con vesículas esféricas, entre otro tipo de clastos como la riolita blanca, fibrosa en este caso, con un porcentaje de ocurrencia (6.7-7.0 vol.%) y un porcentaje considerable de líticos oxidados (6.0-15.0 vol.%) (Figuras 4.1 Q y R).



Figuras 4.1 Q y R. Gráficas de pastel correspondientes al análisis de componentes de las muestras del sitio DER 19131 A y B (valores en % en volumen). En estas muestras está presente la riolita blanca, pero domina la presencia de vidrio translúcido.

Las características de estas muestras fueron comparadas con muestras de los depósitos de la ignimbrita Zaragoza que afloran cerca del domo Cerro Pizarro. En este sitio, los depósitos constan de capas mal clasificadas e intercaladas con depósitos de flujos piroclásticos de pómez rosada y verdosa (Figura 4.1 S).

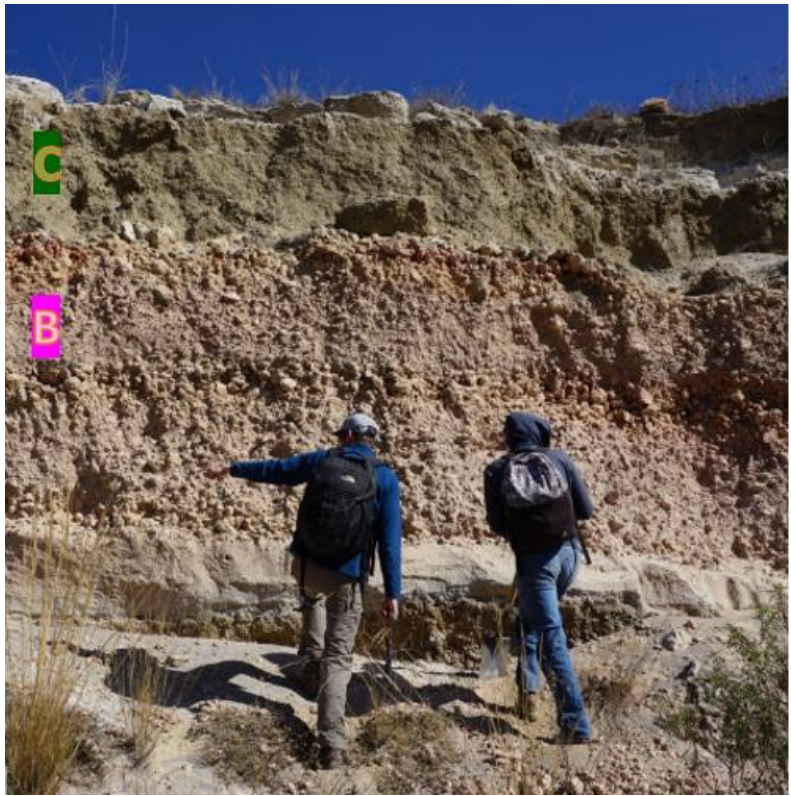
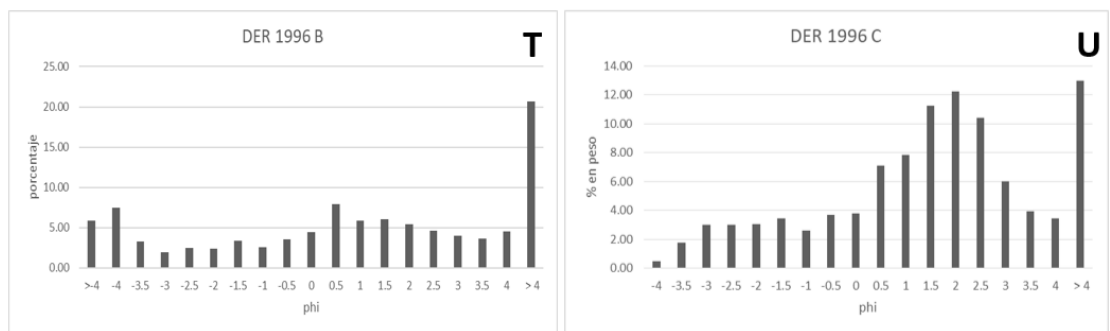


Figura 4.1 S Fotografía del depósito DER 1996 con ubicación de las muestras colectadas y analizadas. Escala: personas de 1.8 y 1.9 m de altura.

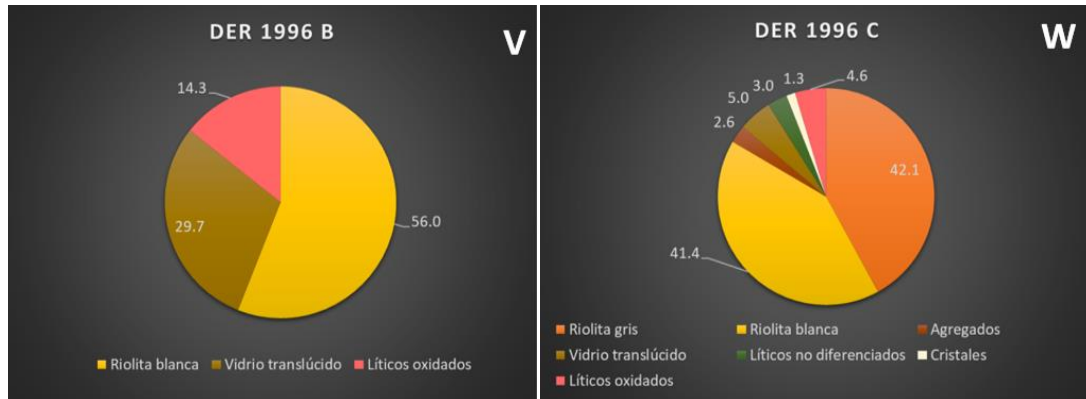
Ambas capas tienen una extremadamente mala clasificación en el tamaño de grano, pues se encontró que presentan una distribución de granos multi-modal y una fracción importante de partículas muy finas (Figuras 4.1 T y U).



Figuras 4.1 T y U. Histogramas correspondientes al análisis de granulometría de las muestras de la ignimbrita Zaragoza que aflora en el sitio del sitio DER 1996, cerca del volcán Cerro Pizarro.



Las muestras de la ignimbrita Zaragoza presentan, de igual forma que las de la unidad ignimbrita de la avalancha, un alto porcentaje de riolita blanca muy vesiculada y de textura fibrosa con cristales máficos de mica oscura, además de una considerable cantidad de vidrio translúcido (Figuras 4.1Q, R, V y W). Sin embargo, las muestras cerca del Cerro Pizarro presentan una proporción mucho mayor de riolita gris (42.1 vol.%).



Figuras 4.1 V y W. Gráficas de pastel correspondientes de las muestras de la ignimbrita Zaragoza (valores de % en volumen).

## 4.2 Región NO: Depósitos de lahares

Esta zona ubicada al noroeste del Domo Noroeste corresponde a una secuencia sedimentaria rellenando una depresión entre los depósitos de la Avalancha Atexcac y la Avalancha Emilio Portes Gil. Tal y como se observa en la Figura 4.2A, los lahares rodean varias formaciones previas a los domos, que incluyen dos conos de escoria (puntos 132, 138), un anillo de toba (punto 134), y lomas de caliza, los cuales también se describirán en esta sección.

Existen dos tipos de depósitos de lahares, los de formación reciente que cubren la ladera de los domos, los cuales sobreyacen sobre depósitos de lahares previos, los cuales se extienden hasta más de 3 Km de la base del domo (Figura 4.2A).

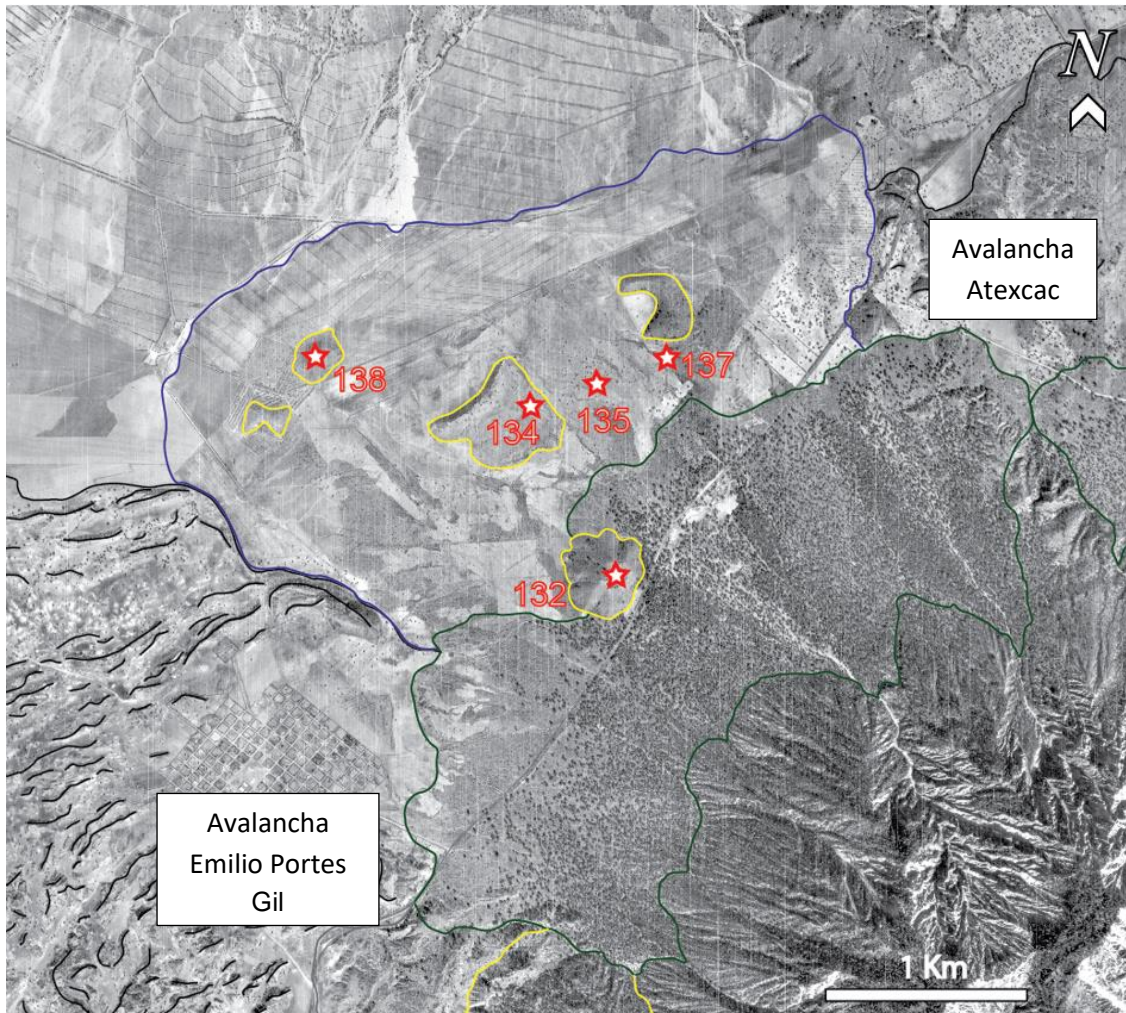


Figura 4.2A. Fotografía aérea de la región noroeste donde se observan los depósitos de lahares previos (más distales, en azul) y los lahares recientes (más cercanos al domo, en verde). Esta zona separa a la Avalancha Atexcac al noreste, y la avalancha Emilio Portes Gil al Oeste (líneas negras), y los depósitos de lahares que recubren parcialmente a ambas avalanchas. Los relieves que fueron contornados por los lahares están delimitados por líneas amarillas. Las estrellas representan los puntos estratégicos de descripción de los depósitos, así como los sitios donde se recolectaron muestras para analizar en laboratorio.

Los depósitos de lahares afloran en varios lugares en toda la zona y se aprecian mejor en una cantera ubicada en el sitio DER 19135, cerca de su margen más distal, donde alcanzan un espesor de hasta 10 metros (Figura 4.2B). Los depósitos son clasto-soportados pues contienen muy poca matriz de tamaño ceniza y se componen por clastos angulosos de riolita, caliza y pedernal, por lo tanto, son heterolitológicos. Los clastos presentan una alineación horizontal desarrollando así estratificación primaria, la cual se observa también en el sitio DER 19137 más próximo al domo (Figura 4.2C).

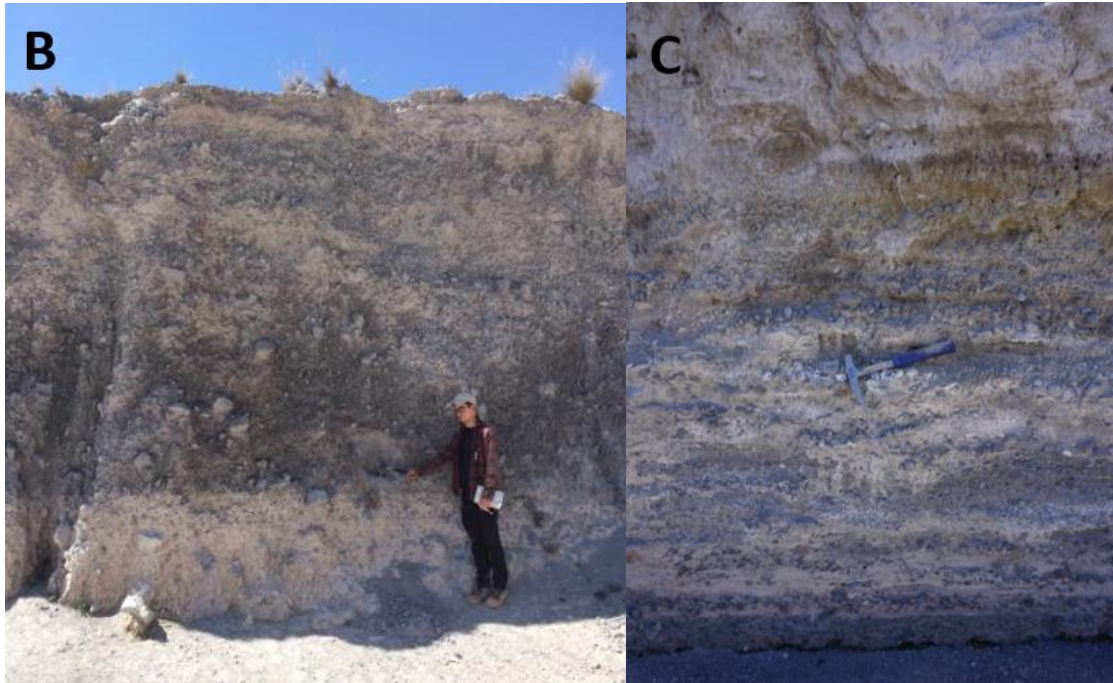


Figura 4.2B y C. B) Fotografía del depósito de lahar del sitio DER 19135 donde se colectó la muestra analizada. Escala: hombre de 1.6 m de alto. C) Fotografía de afloramiento del depósito de lahar del sitio DER 19137. Escala: pica de geólogo de 30 cm de alto.

Se tomó una muestra del depósito en el sitio DER 19135 y el resultado del análisis de granulometría refleja que la clasificación del depósito de lahares es muy pobre ya que las partículas, de tamaños desde milimétricas hasta centimétricas, son de una abundancia relativa similar sin considerar las partículas de tamaño phi -4, que son más abundantes Figura 4.2 D.

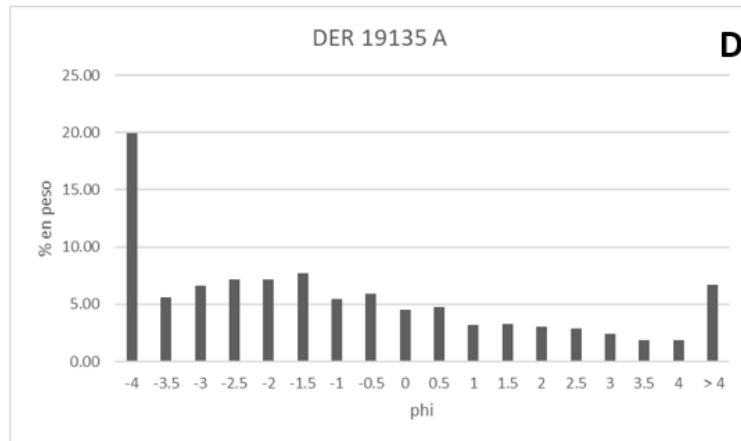


Figura 4.2 D. Histograma correspondiente al análisis de granulometría de la muestra del sitio DER 19135.

Los depósitos de lahares están principalmente constituidos por riolita gris (65%) y caliza (33%), como lo muestra el análisis de componentes de la muestra del sitio DER 19135 (Figura 4.2E). Los clastos de riolita gris son de color semitranslúcido con inclusiones de cristales máficos (oscuros); sus superficies son angulosas a subangulosas con textura vítrea. En orden de proporción, sigue la roca caliza angulosa de color marrón claro a marrón muy oscuro, que forma clastos con textura ligeramente rugosa mientras que los clastos más claros tienen superficies más lisas. Hay partículas oxidadas, líticos no diferenciados, poca cantidad de agregados con cementante carbonatado, escasa presencia de riolita blanca y ausencia de cristales. En las fracciones más gruesas, también se encuentran presentes partículas de pedernal.

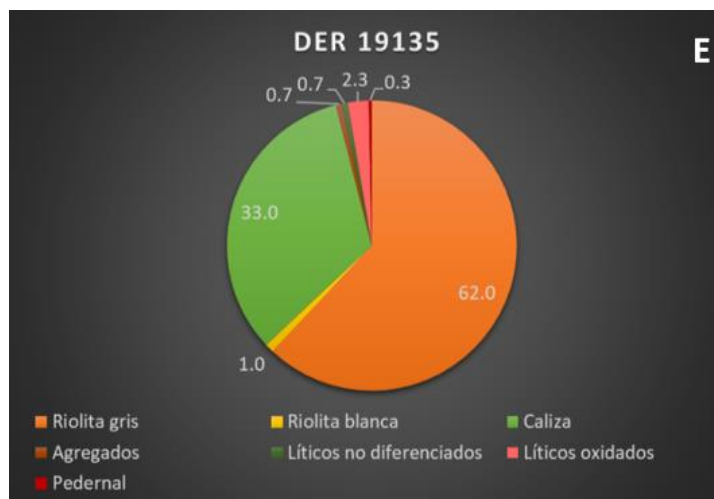


Figura 4.2 E. Gráfica de pastel correspondiente al análisis de componentes de la muestra del sitio DER 19135.



Tal como se mencionó anteriormente, los lahares contornaron varios relieves que corresponden a formaciones previas, las cuales se describen brevemente a continuación. En cuanto al sitio DER 19132 se trata de un cono de escorias y roca densa de composición basalto-andesítica compuesto por partículas de tamaños que varían desde ceniza a bloques. La mineralogía observada es de plagioclasa y olivino.

En el sitio DER 19134 cerca de un anillo de toba encontramos depósitos de oleadas piroclásticas de composición riolítica con intercalaciones de ceniza gruesa depositada encima de un paleosuelo.

Para el sitio DER 19138 se trata de un montículo de lava donde se observaron grandes bloques cuya mineralogía consiste en cristales de plagioclasa y piroxeno (Figura 4.2 F).



Figura 4.2 F. Fotografía del cono de composición básica (máfico) correspondiente al sitio DER 19138.

### 4.3 Región O: Avalancha Emilio Portes Gil

La avalancha Emilio Portes Gil es una de las más extensas analizada en este estudio pues cubre un área mayor a 20 Km<sup>2</sup> y sus depósitos alcanzan una distancia mayor a 7 km desde la cima del Domo Noroeste.

Desde las observaciones en campo y como se observa en la Figura 4.3 A, la avalancha, durante su transporte, se separó tomando dos direcciones debido a una barrera física observada en el mapa en el punto DER 1883. Esta barrera corresponde a un montículo compuesto por rocas máficas altamente alteradas de textura porfírica con mineralogía constituida por cristales de anfíbol y feldespatos; además de abundantes xenolitos compuestos por la misma mineralogía, en una matriz de gris a roja. Este cuerpo dividió la dirección de propagación de la avalancha en dos principales direcciones: una hacia el oeste donde se depositó la mayor parte de la avalancha. La otra dirección de desplazamiento fue en dirección suroeste. En ambos depósitos se formaron montículos entre 10 y más de 15 m de altura alargados de forma perpendicular a la dirección del desplazamiento.

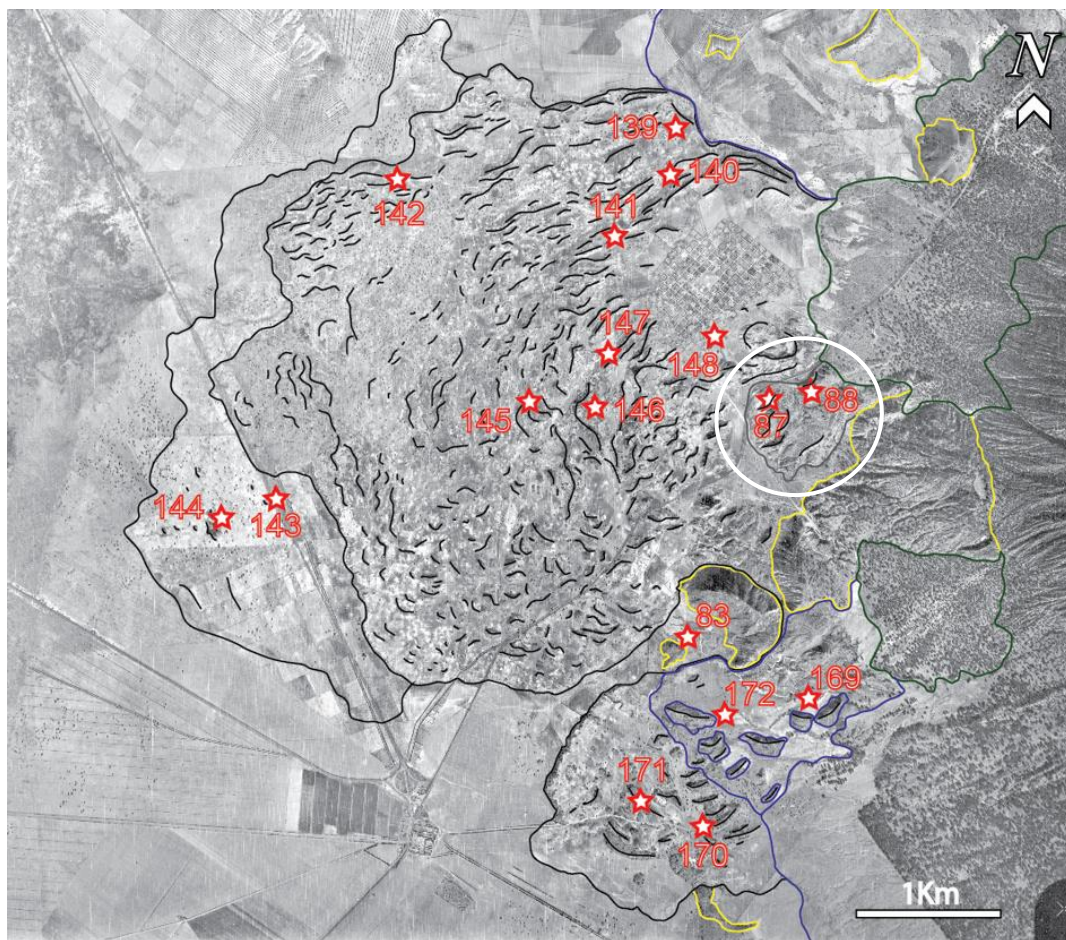
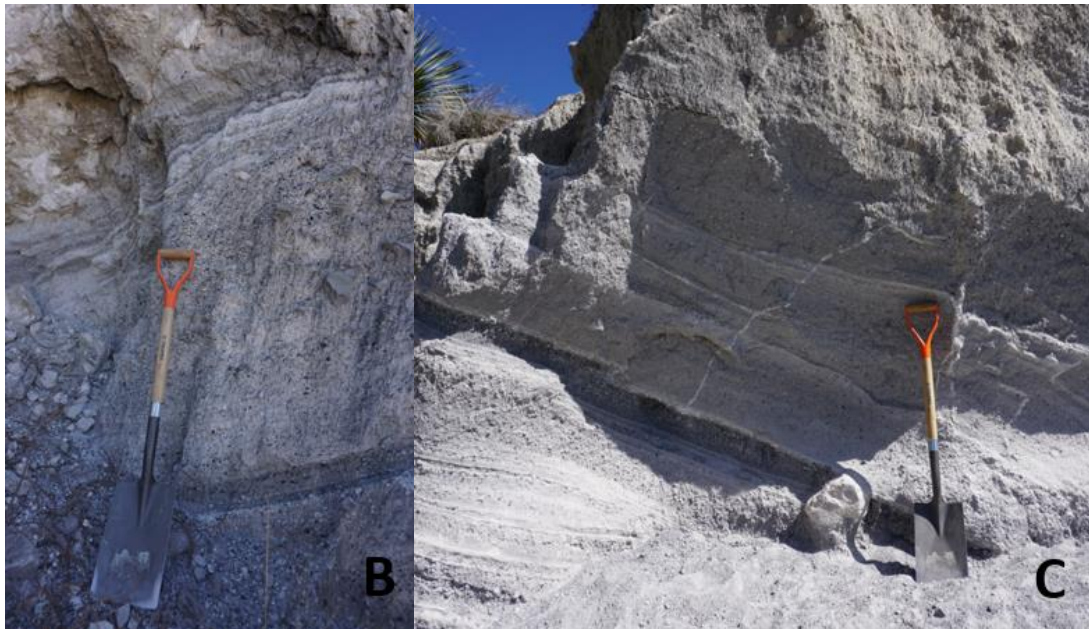


Figura 4.3 A. Fotografía aérea del sector oeste del Domo Noroeste de Las Derrumbadas donde se delimita la avalancha Emilio Portes Gil y algunas de sus estructuras desarrolladas como los montículos (líneas negras), sectores distintos de la avalancha (línea gris, óvalo blanco), abanicos aluviales de lahares (líneas azules y verdes), y contactos con otras litologías (líneas amarillas). Las estrellas representan los sitios de las descripciones de los depósitos y de donde se obtuvieron muestras para el análisis de laboratorio (sólo se reportan los números correspondientes al nombre del sitio en el mapa).



En esta avalancha encontramos unidades litológicas muy variadas en tamaño y tipos de roca como riolita gris, bloques de lava basáltica y rocas lacustres como caliza y travertino.

En la zona proximal del depósito de la avalancha cercana al domo yacen depósitos correspondientes a la facies de bloques de la unidad brecha riolítica. En los sitios DER 1887 y DER 1888 los depósitos constan de intercalaciones de ceniza fina y gruesa estratificada, se trata de un depósito previo de caídas y oleadas piroclásticas originadas en el domo y que fueron posteriormente incorporadas a la avalancha durante el colapso del mismo. (Figuras 4.3 B y C).



Figuras 4.3 B y C. Fotografías de los depósitos de oleada piroclástica de los sitios DER 1887 y DER 1888 de la parte proximal que componen la facies de bloques de la avalancha Emilio Portes Gil. Escala: pala de 1.2 m de altura.

El resultado del análisis de granulometría de las muestras tomadas de esos sitios, refleja una buena clasificación en el tamaño de grano para la muestra obtenida de capas gruesas del sitio DER 1887, sugiriendo una deposición por caída (Figura 4.3 D). En el sitio DER 1888, la muestra deriva de una parte menos bien clasificada del depósito y con una proporción grande de partículas finas, posiblemente producto de una oleada piroclástica (Figuras 4.3 D y E).

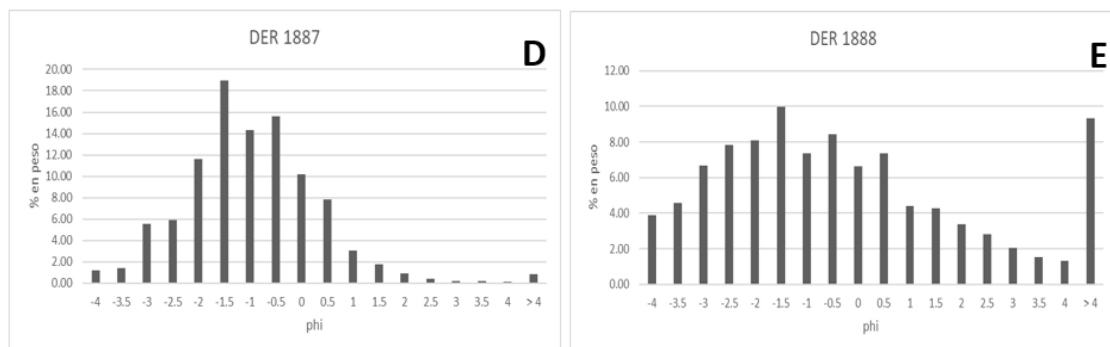


Figura 4.3 D y E. Histogramas correspondientes a los análisis de granulometría de las muestras de los sitios DER 1887 y DER 1888 en la avalancha Emilio Portes Gil.



En estos depósitos estratificados las partículas son angulosas a excepción de las riolitas blancas, las cuales, tienen vesículas ovaladas e incluyen cristales de mica. En la riolita gris se observan cristales de plagioclasa y granate. Los clastos de caliza tienen colores desde marrón a marrón oscuro según la muestra donde están presentes; hay también cristales de plagioclasa, líticos no diferenciados, y pedernal cuya cantidad disminuye con el tamaño de grano como se observa en el análisis de componentes en las figuras 4.3 F y 4.3 G.

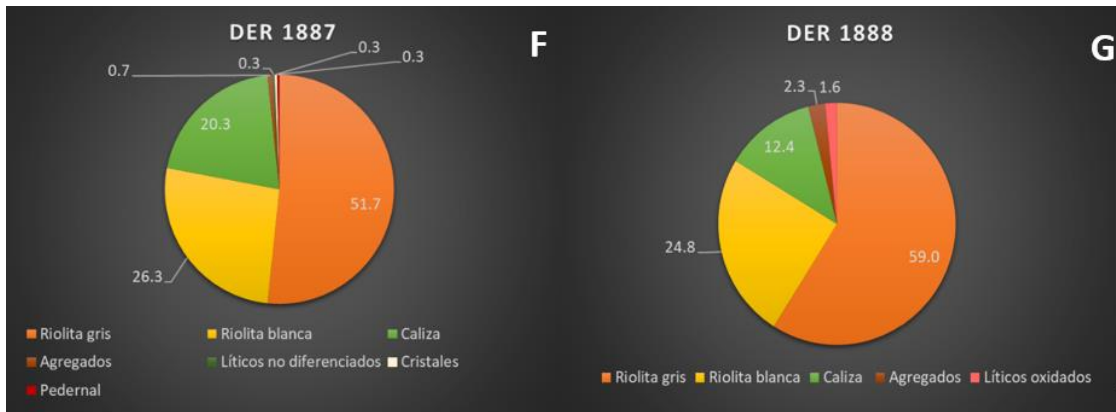
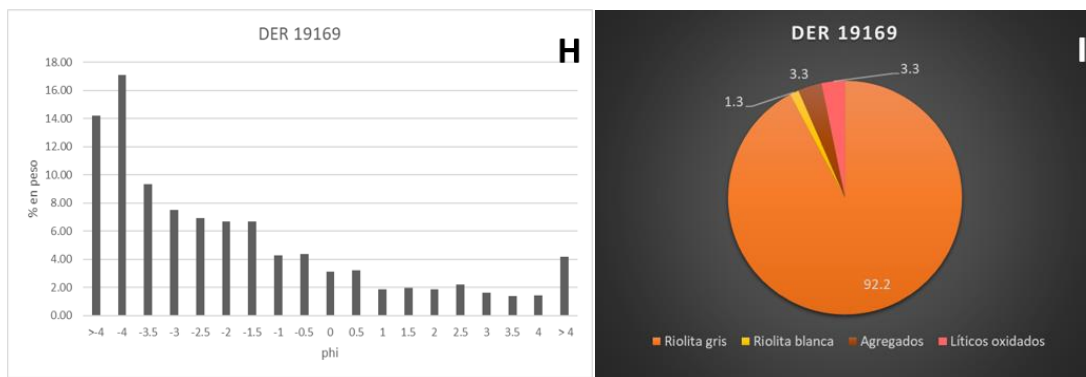


Figura 4.3 F y G. Gráficas de pastel correspondientes a los análisis de componentes de las muestras de los sitios DER 1887 y DER 1888.

En el sitio DER 19169 más al sur, se encuentra un depósito clasto soportado y también con aparente deposición horizontal con clastos monolitológicos (Figura 4.3 I) de riolita angulosa de tamaños desde ceniza y lapilli hasta bloques de hasta 15 cm. Por lo tanto, su clasificación por tamaño de grano es mala (Figura 4.3 H). Es probablemente un producto de lahares depositados sobre la avalancha.



Figuras 4.3 H e I. H) Histograma resultado del análisis de granulometría de la muestra DER 19169. I) Gráfica de pastel resultado del análisis de componentes aplicado a la misma muestra.

En un sitio más al norte del depósito (sitio DER 19139) se encuentra la unidad brecha riolítica compuesta por clastos de riolita, caliza y pedernal que está en contacto con material lacustre, el cual representa otra facies de bloque en la avalancha (Figura 4.3 J).



Figura 4.3 J. Fotografía del sitio DER 19139 de la unidad brecha riolítica que transicionalmente se convierte en un depósito compuesto por otra unidad litológica compuesta por sedimentos lacustres. Escala: pica de geólogo de 30 cm de largo.

El depósito de brecha en contacto con unidades de sedimentos y caliza lacustre, así como caliza marina, presenta una clasificación muy pobre (Figura 4.3 K). En esta muestra, las partículas más abundantes son las de riolita gris (>80%), que varían desde semitranslúcida hasta más oscuras con extremidades angulosas y textura vítrea. El siguiente tipo de partícula en orden de abundancia es la roca caliza (11%), de color marrón con textura que varía de rugosa a lisa. En las fracciones gruesas se encuentran también clastos de pedernal, en algunos casos con vetas de calcita, además de algunos pocos cristales, cierta cantidad de partículas oxidadas y agregados unidos por un cemento carbonatado (Figura 4.3 L).

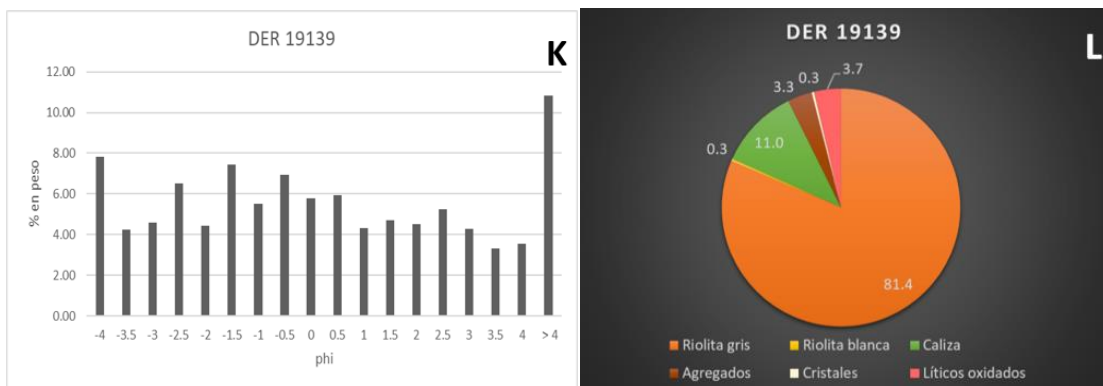


Figura 4.3 K y L. K) Histograma resultado del análisis de granulometría correspondiente a la muestra obtenida del sitio. L) Gráfica de pastel correspondiente al análisis de componentes de la muestra del sitio DER 19139.

En la parte proximal del depósito de avalancha en el sitio DER 19148 se ubica un afloramiento muy particular, ya que en él se encuentran dos de las principales litologías que componen la avalancha depositados de forma estratificada, con capas de sedimentos lacustres alternando

con capas de ceniza basáltica de caída, como podemos observar en la Figura 4.3 M. Estas capas están a su vez atravesadas por una fractura semi-vertical rellena de material blanco y fino (tipo de dique).

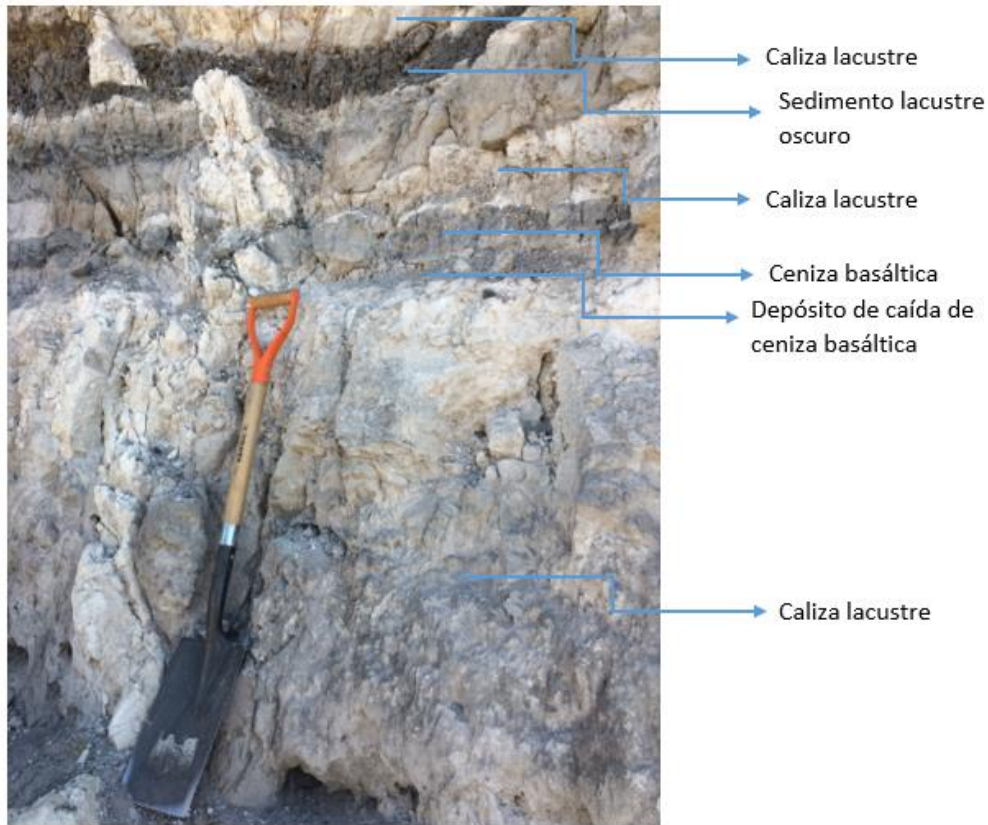
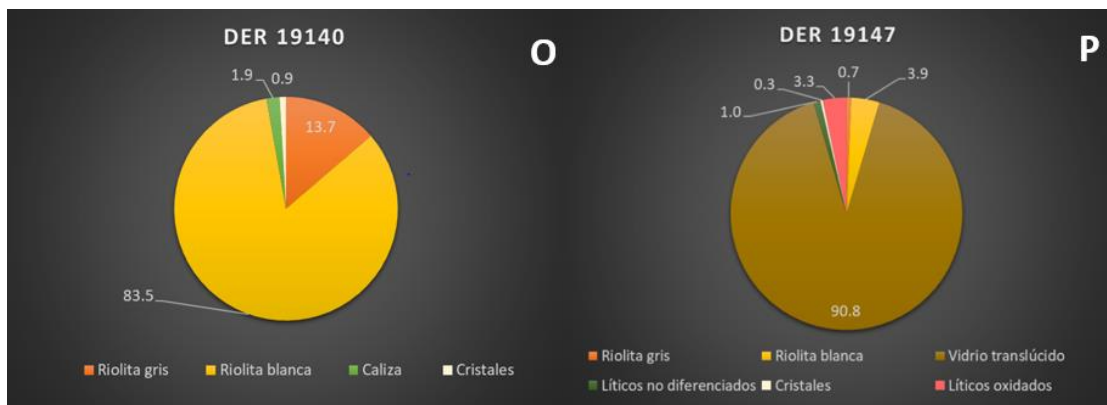


Figura 4.3 M. Depósito estratificado dentro de la avalancha ubicado en la parte proximal dentro del poblado Emilio Portes Gil (sitio DER 19148). Escala: una pala de 1.2 m de altura.

En la misma área, se encuentran un par de depósitos de ceniza gruesa bien clasificada que se encuentran en facies de bloque dentro de los montículos. Estos depósitos se encuentran en los sitios DER 19140 y DER 19147 (Figuras 4.3 N óvalo blanco y 4.3 Ñ). El depósito en el sitio DER 19140 está compuesto por cenizas gruesas y medianas intercaladas que constan principalmente de riolita blanca fibrosa (83.5vol.%) y riolita gris (13.7vol.%) subredondeada (Figura 4.3 O), mientras que el depósito del sitio DER 19147 se compone de 90.8 vol.% de vidrio translúcido anguloso (Figura 4.3 P).



Figuras 4.3 N y Ñ. Fotografías de los depósitos de los sitios DER 19140 y DER 19147. Escala: persona de 1.8 m y pica de geólogo de 30 cm de largo respectivamente.



Figuras 4.3 O y P. Gráficas de pastel correspondientes a los resultados del análisis de componentes de las muestras de los sitios DER 19140 (O) y DER 19147 (P).

Además de los sitios dominados por riolita gris, en las partes medial y distal de los depósitos de esta avalancha hay sitios donde se encuentran otras rocas de origen lacustre como la caliza y el travertino. Estos sitios se encuentran aleatoriamente dentro de toda la avalancha. En el sitio DER 19141, al norte, los depósitos constan de roca caliza lacustre alterada (Figura 4.3 Q), mientras que en el sitio DER 19144, al extremo oeste de la avalancha, están conformados por distintos productos lacustres como travertino y sedimentos limo-arcillosos (Figura 4.3 R) y en los sitios DER 19170, DER 19171 y DER 19172 ubicados al sur de la avalancha, están compuestos por calizas similares a las del sitio DER 19141.





Figura 4.3 Q y R. Q) Fotografía del depósito del sitio DER 19141 conformado por caliza lacustre. Escala: pala de 1.2 m de altura. R) Fotografía del depósito del sitio DER 19144 conformado por sedimento lacustre y travertino. Escala: lápiz de 12 cm de largo.

Por último, se encontraron varios sitios cuyos componentes de los depósitos son distintos, incluyendo el sitio DER 19142 al noroeste donde observamos un bloque levantado compuesto por capas endurecidas de ceniza (Figura 4.3 S). Además, hay sitios ubicados en la parte central de la avalancha donde encontramos bloques de lava basáltica con olivino y piroxenos (Figura 4.3 T; sitios DER 19143, DER 19145 y DER 19146). Los bloques de lava alcanzan dimensiones de 1.5 x 1.5 x 1.5 m en promedio. En el sitio DER 19146 se encontraron también bloques compuestos por fragmentos de escoria inmersos en una matriz de ceniza fina (Figura 4.3 U).



Figura 4.3 S. Bloque de 2.7 x 1.6 x 0.7m conformado por ceniza estratificada cementada ubicado en el sitio DER 19142. Escala: pica de geólogo de 30 cm de altura.

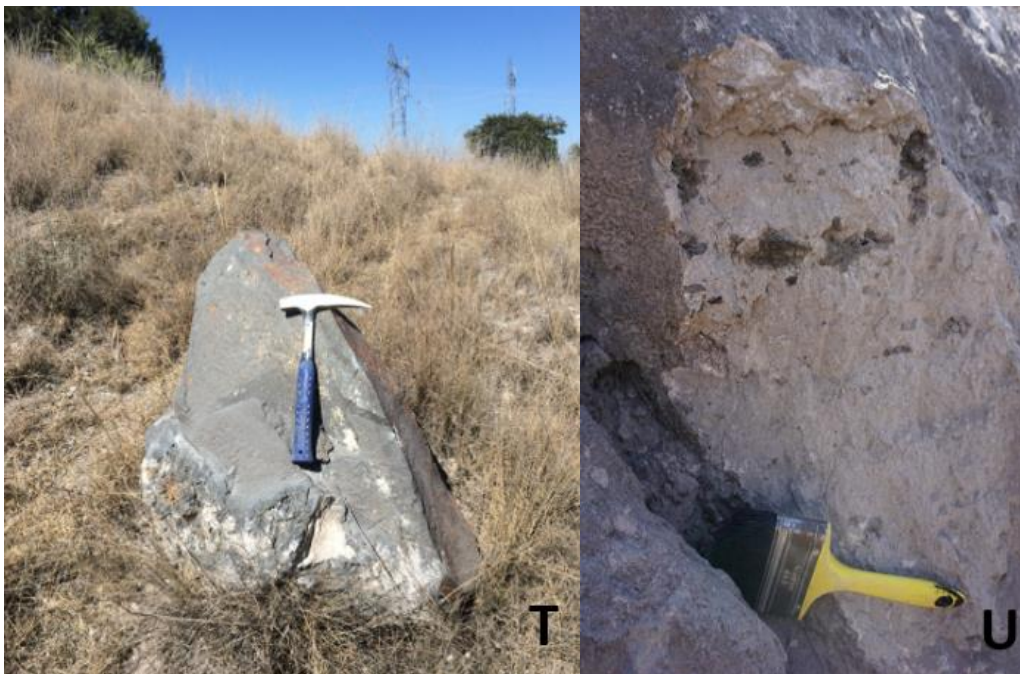


Figura 4.3 T y U. T) Bloque de lava sobre la avalancha del sitio DER 19145. Escala: pica de geólogo de 30 cm de largo. U) Clastos tamaño lapilli de escoria microvesiculada dentro de una matriz fina, posiblemente compuesta de sedimento calcáreo del sitio DER 19146. Escala: brocha de 15 cm de largo.



#### 4.4 Región NE: Avalancha Las Águilas

Los depósitos de la avalancha Las Águilas se encuentran hacia el sector noreste del Domo Noroeste de Las Derrumbadas en cuya dirección fueron transportados. De forma similar a la avalancha Emilio Portes Gil, la avalancha Las Águilas, cubre también una extensa área de aproximadamente 14 Km<sup>2</sup>, que alcanza hasta más de 8 km de longitud desde la cima del domo, incluso cubriendo la parte más distal de las lavas del cono de escoria Las Águilas, de ahí su nombre (Figura 4.4 A).

En este caso, los montículos que forman parte del depósito no alcanzan alturas mayores a los 10 m, en contraste con los de la avalancha Emilio Portes Gil. Aparentemente, en las cercanías del domo esta avalancha se encuentra cubierta por los depósitos de la avalancha Atexcac, así como depósitos de lahares secundarios y otros depósitos de avalancha provenientes del Domo Sureste en el sector sur que se ve en la figura 4.4 A.

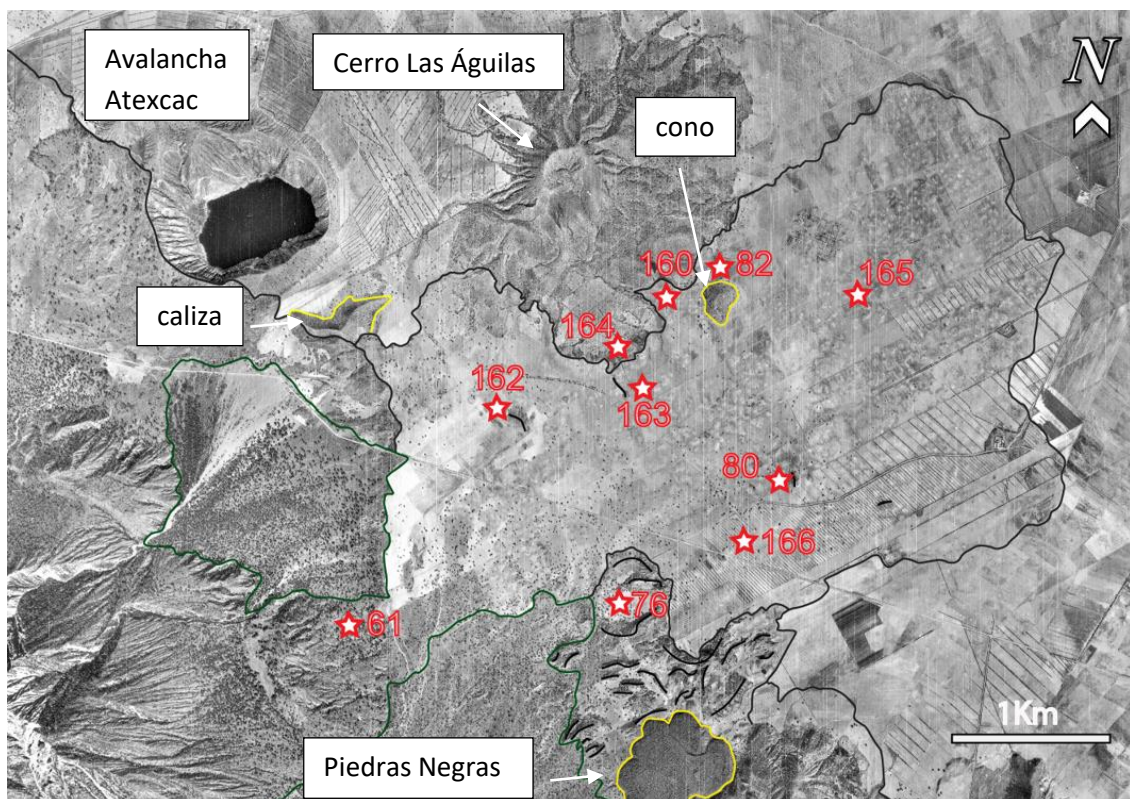
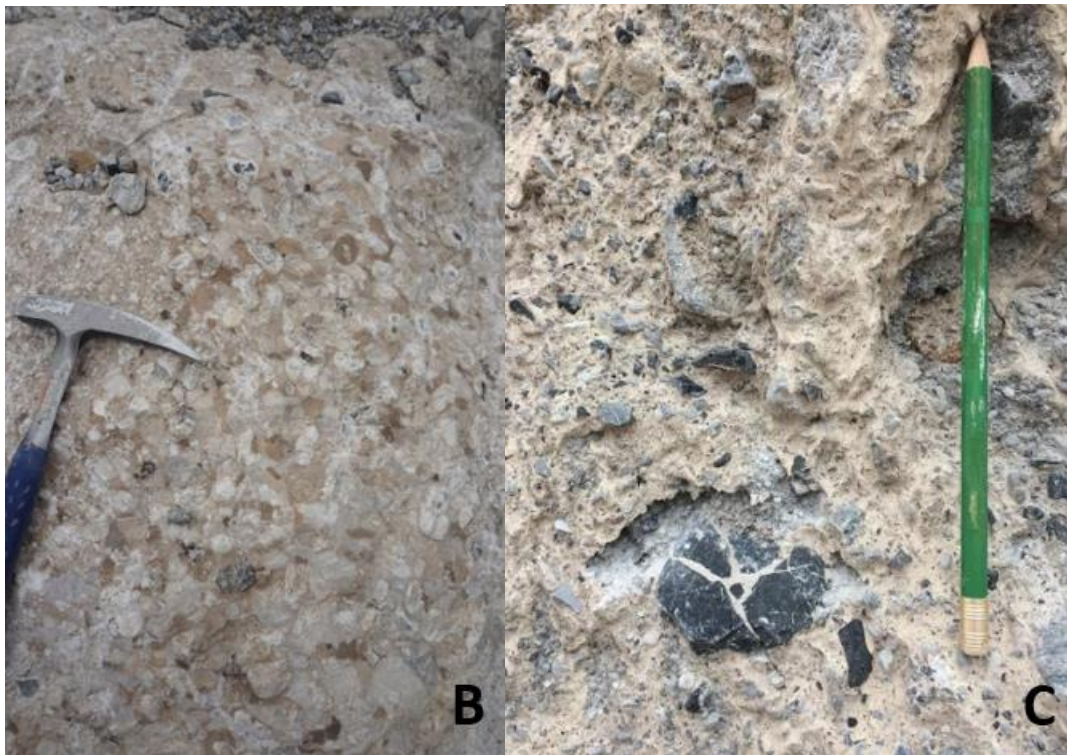


Figura 4.4 A. Fotografía aérea correspondiente al sector noreste del Domo Noroeste de Las Derrumbadas; en esta sección se ubica la avalancha Las Águilas (líneas negras), abanicos aluviales producto de lahares de segunda generación (líneas verdes), y otros contactos litológicos como el volcán Piedras Negras (más joven) en la parte inferior de la imagen, una loma de roca caliza y un antiguo cono de escoria en la parte noreste (líneas amarillas). Las estrellas rojas representan la ubicación de los afloramientos donde se observaron los componentes de esta avalancha.

El punto DER 1861 es el sitio más cercano al domo, en facies de matriz, hay un corte en un montículo en la zona proximal de la avalancha. Éste consta de bloques angulosos de hasta dos metros de diámetro compuestos por varias litologías que incluyen caliza de tamaño grava y arena, riolita gris bandeada y plegada y en ocasiones alterada, pedernal y brechas de mármol que contienen fragmentos de riolita gris, obsidiana, caliza y pedernal (Figura 4.4 B). En el mismo afloramiento también se observó la textura en rompecabezas en un fragmento de pedernal rodeado de una matriz que parecía homogénea. (Figura 4.4 C).



Figuras 4.4 B y C. B) Fotografía de brecha de mármol. Escala: cabeza de pica de geólogo: 12 cm de largo. C) Fotografía de textura en rompecabezas de un clasto de pedernal. Escala: lápiz de 15 cm de largo.

En zonas mediales de la avalancha (sitios DER 1880 y DER 19166), las unidades litológicas que conforman la avalancha incluyen fragmentos de material estratificado compuesto por dos tipos de capas, una rosada con tamaño de grano ceniza, con buena clasificación y compuesta por vidrio translúcido observable con la lupa; y la otra, una capa verdosa ligeramente más gruesa y compuesta por clastos distintos como: escoria y pómez amarillenta y redonda, además de obsidiana (Figura 4.4 D). En cuanto a la capa rosada, es prácticamente la misma que la encontrada en el sitio DER 19131 A de la Avalancha Atexcac por lo que podrían compartir el mismo origen.



Figura 4.4 D. Fotografía del depósito del sitio DER 1880 donde se aprecia el contacto ligeramente irregular entre una capa verdosa (arriba) y una capa rosada (abajo). Escala: pala de 1.20 m de largo.

En el sitio DER 19166 este mismo tipo de depósito se encuentra cubierto por un depósito de oleadas piroclásticas con capas de tamaño de grano entre ceniza fina y gruesa con presencia de lapilli acrecional. Este depósito de oleada es posterior a la avalancha por lo que no se considera como un componente de la avalancha Las Águilas.

Los montículos presentes en la avalancha fueron observados en varios sitios mediales y distales de la avalancha. En el sitio DER 19162, se componen principalmente por fragmentos métricos de caliza, en menor cantidad pedernal, bloques más pequeños de mármol y en menor cantidad bloques (o clasto) de basalto-andesita, riolita gris y obsidiana. En el sitio DER 19163, miden entre 4 y 5 metros de altura y están compuestos por bloques de mármol, sedimento lacustre, riolita gris, obsidiana y bloques de lava basalto-andesítica, vesiculada y alterados.

En el sitio DER 19165, cercano a la comunidad de Hacienda Nueva, se encuentra un montículo compuesto por líticos angulosos de obsidiana, riolita gris, pómez, lava alterada, sedimentos lacustres e incluso escoria, inmersos en una matriz de ceniza (o arena y limo).



En cuanto al sitio DER 1882 localizado en un pequeño cauce, se encuentra un afloramiento vertical dentro de la avalancha, que revela que está compuesta por varias unidades litológicas desde sedimentos lacustres, oleadas piroclásticas formadas por intercalaciones de ceniza fina y gruesa y otras unidades masivas compuestas por líticos desde ceniza a clastos angulosos de pedernal matriz-soportados, escoria, basalto-andesita, caliza, obsidiana y riolita gris (Figura 4.4 E).



Figura 4.4 E. Fotografía de los depósitos estratificados encontrados en el sitio DER 1882. Escala: libreta de 22 cm de largo.

Por último, en los puntos DER 19160 y DER 19164, que se encuentran muy cercanos a las faldas del volcán Las Águilas, encontramos depósitos cuya base es un flujo de lava de Las Águilas, cubierto por un paleosuelo seguido de intercalaciones de ceniza fina a gruesa bien clasificada que presenta estratificación cruzada (oleadas) que al final se recubren por una delgada capa de avalancha la cual se está convirtiendo en suelo actualmente (Figuras 4.4 F y 4.4 G). Precisamente, por el poco espesor, estos puntos sirven para marcar el límite del depósito de la avalancha Las Águilas. Los depósitos de oleadas corresponden a los descritos en la tesis de Guadarrama Molina (2018).

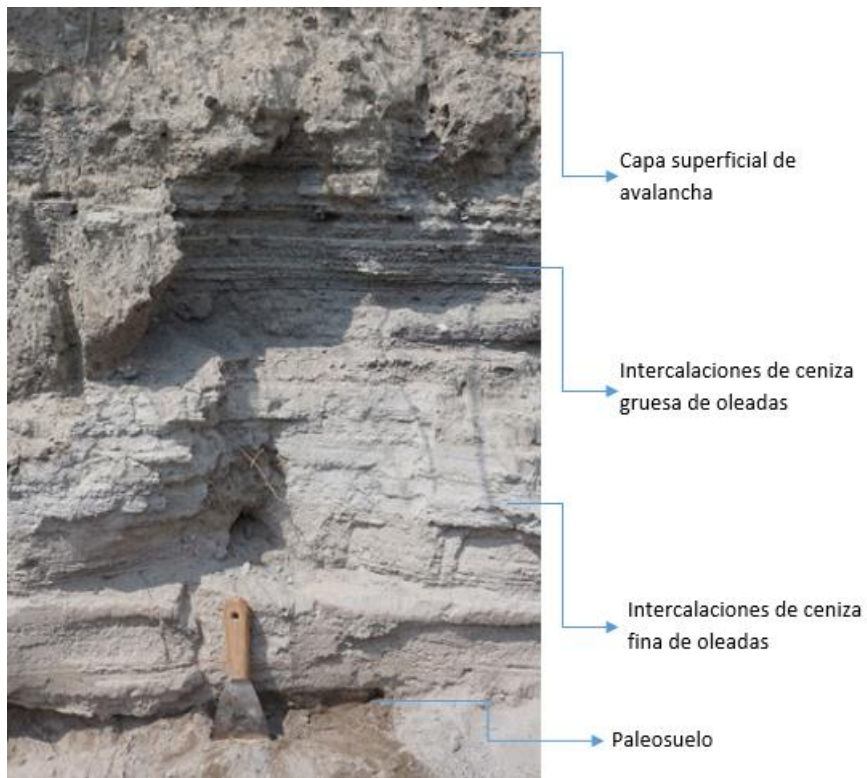


Figura 4.4 F. Fotografía descriptiva de la estratigrafía al límite de la avalancha en el sitio DER 19160. Escala: espátula de 20 cm de largo.



Figura 4.4 G. Fotografía descriptiva del sitio DER 19164. Debajo del paleosuelo se encontraron bloques de lava perteneciente al volcán Las Águilas. Escala: una brocha de 20 cm de largo.

## 4.5 Petrografía

El objetivo de esta sección es describir la microtextura y composición mineralógica de muestras representativas de las principales unidades litológicas encontradas en los depósitos de avalancha y, en ciertos casos, compararlas con muestras de formaciones geológicas cercanas para así poder discutir su origen. Para tal efecto, se analizaron un total de nueve muestras provenientes de las tres avalanchas descritas anteriormente, así como de los depósitos volcánicos cercanos de los cuales podrían provenir.

### Unidad de Ignimbrita

Las muestras analizadas corresponden a fracciones de ceniza fina y gruesa de la unidad de ignimbrita encontrada como facies de bloque en un corte de la avalancha Atexcac en el sitio DER 19131 (Figuras 4.1 A y Ñ), las cuales son similares a los encontrados en la avalancha Las Águilas en los sitios DER 1876, DER 1880, y DER 19166 (Figuras 4.4 A y D). Estas muestras fueron comparadas con las colectadas en productos de la Ignimbrita Zaragoza (DER 1996 B y C) depositados cerca del volcán Cerro Pizarro y provenientes de la caldera Los Húmeros (ver descripción previa; Figura 4.1 S).

Las muestras en la avalancha (DER 19131 A y B) constan de fragmentos de roca hipocrystalina (>50 vol.% vidrio + cristales), donde los cristales son hipidiomórficos (subhedrales) y constan de plagioclasas zoneadas con maclas polisintéticas (5-20 vol.%), biotita (5-10 vol.%), minerales opacos y líticos compuestos por diferentes cristales (principalmente plagioclasa) y vidrio.

A pesar de una textura diferente, observamos la presencia de los mismos componentes (vidrio, cristales de plagioclasa, líticos y óxidos) en las muestras de ceniza fina de la Ignimbrita Zaragoza (Figuras P2 y P4), por lo tanto, deducimos que la unidad de ignimbrita presente en la avalancha puede representar una facies distal de la Ignimbrita Zaragoza.

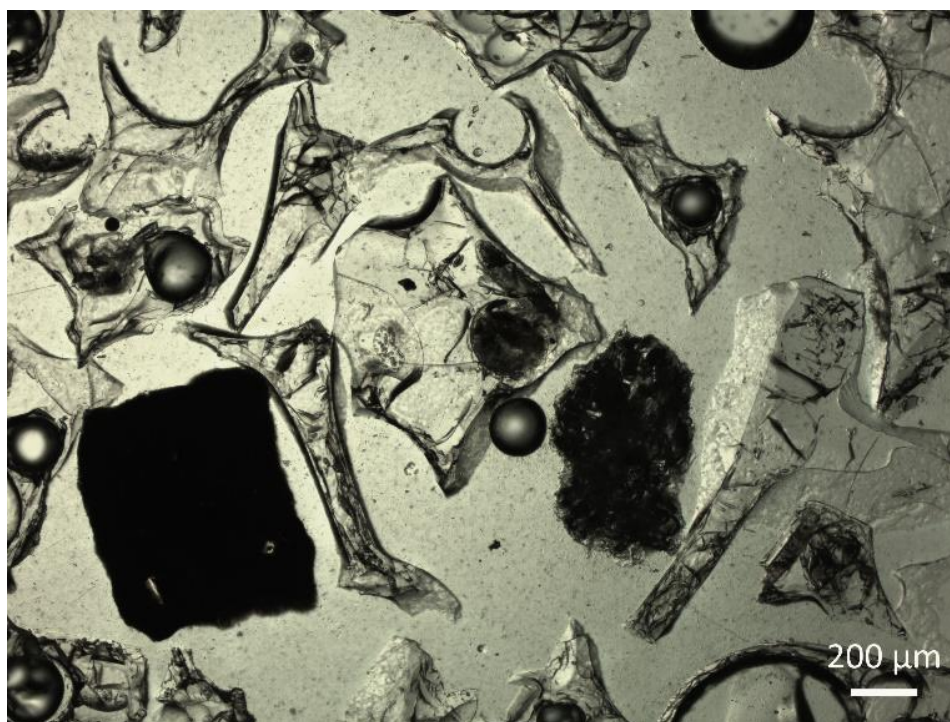


Figura P1. Imagen con luz polarizada simple de los componentes de la muestra DER 19131 A (Avalancha Atexcac). Se observan partículas oxidadas (en negro) rodeadas de esquirlas de vidrio, el componente principal del depósito.



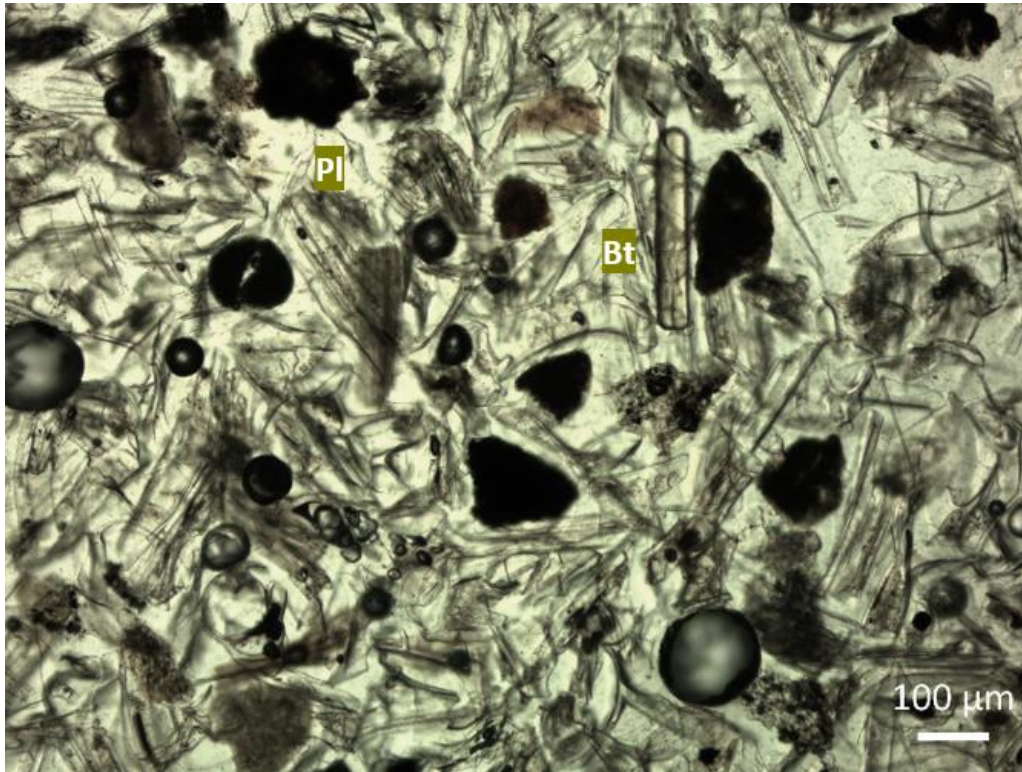


Figura P2. Imagen con luz polarizada simple de los componentes de la muestra DER 1996 B (Ignimbrita Zaragoza). Se observan minerales de plagioclasa (Pl) y biotita (Bt) rodeados de abundantes esquirlas de vidrio, y algunas partículas oxidadas.

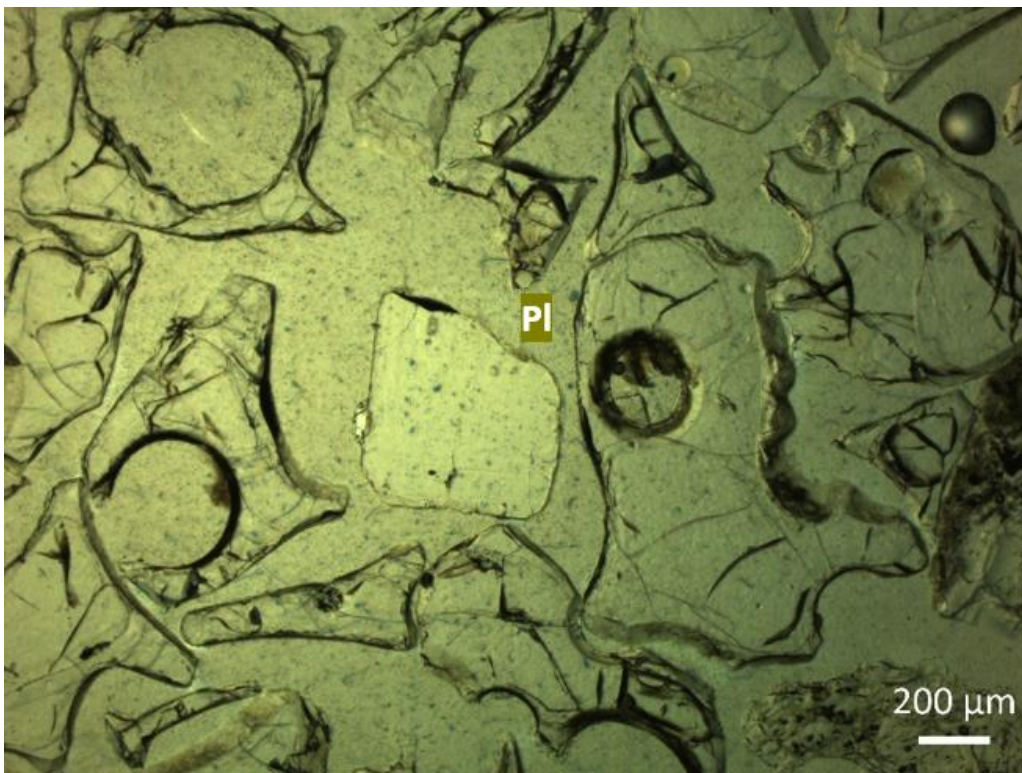


Figura P3. Imagen con luz polarizada simple que muestra una perspectiva general de los componentes de la muestra DER 19131 B (Avalancha Atexcac). Se observan minerales de plagioclasa (Pl) rodeados por abundantes esquirlas de vidrio y algunas partículas oxidadas.

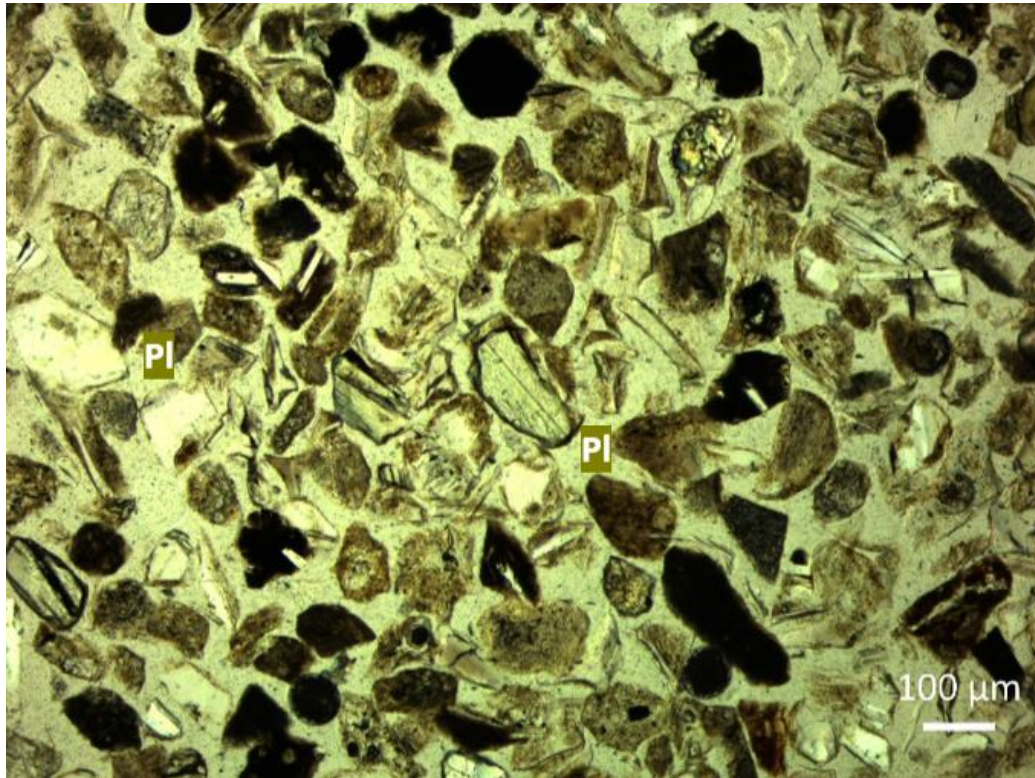


Figura P4. Imagen con luz polarizada simple de los componentes de la muestra DER 1996 C (Ignimbrita Zaragoza). Se observan minerales de plagioclasa (Pl) rodeados de abundantes fragmentos de vidrio y algunas partículas oxidadas.

#### **Unidad de Toba café**

La muestra de la unidad litológica “toba café” en la avalancha Atexcac (sitio DER 19136; Figura 4.1 L y M) es muy peculiar pues en las fracciones gruesas se encontraron múltiples tipos de minerales como olivino, anfíbol, ortopiroxeno y plagioclasa con maclado polisintético y zoneamiento (Figuras P5 y P6). Algunos clastos presentan una textura traquítica (orientación preferencial de los cristales), sin embargo, la mayoría de los clastos presentan una proporción de vidrio muy alta (hipocristalina). Mientras tanto, en las fracciones finas se encontraron también minerales accesorios como la turmalina y el zircón, además de olivino, plagioclasa y anfíbol (Figura P7).





Figura P5. Imagen con luz polarizada simple de los componentes de la muestra DER 19136 (toba café). Se observan minerales de plagioclasa (Pl), anfíboles (Amp) y líticos rodeados de esquirlas de vidrio, el componente principal del depósito y algunas partículas oxidadas.

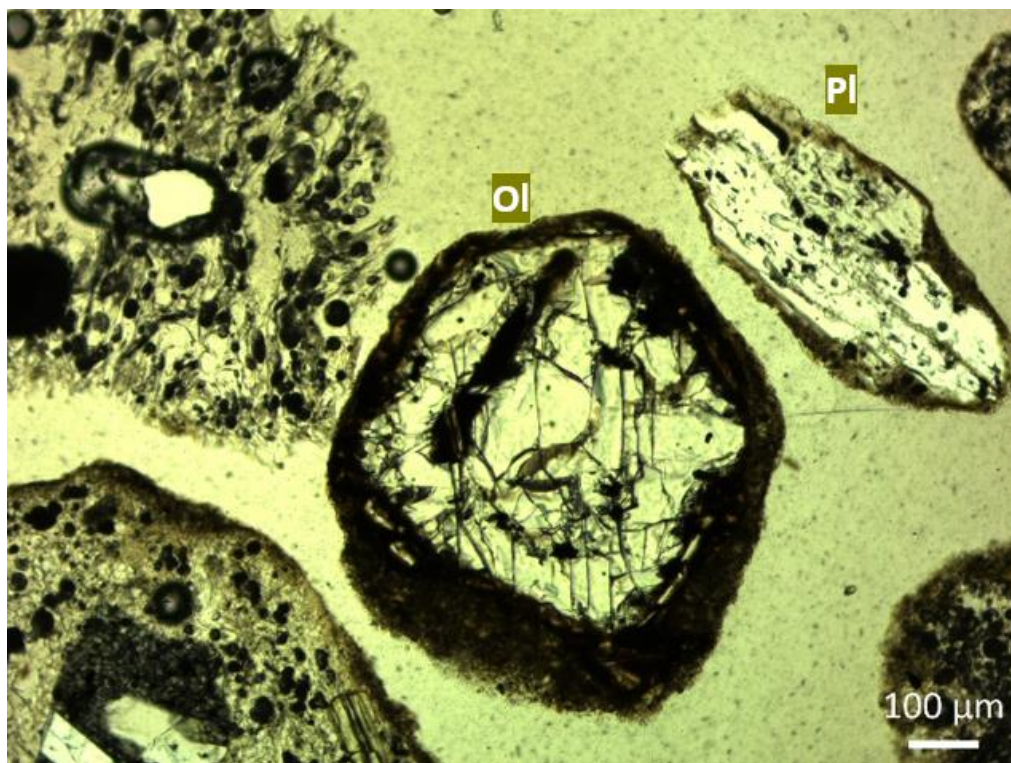


Figura P6. Imagen con luz polarizada simple de los componentes de la muestra DER 19136. Se observan minerales de plagioclasa (Pl) y olivino (Ol) rodeados de esquirlas de vidrio y algunas partículas oxidadas.



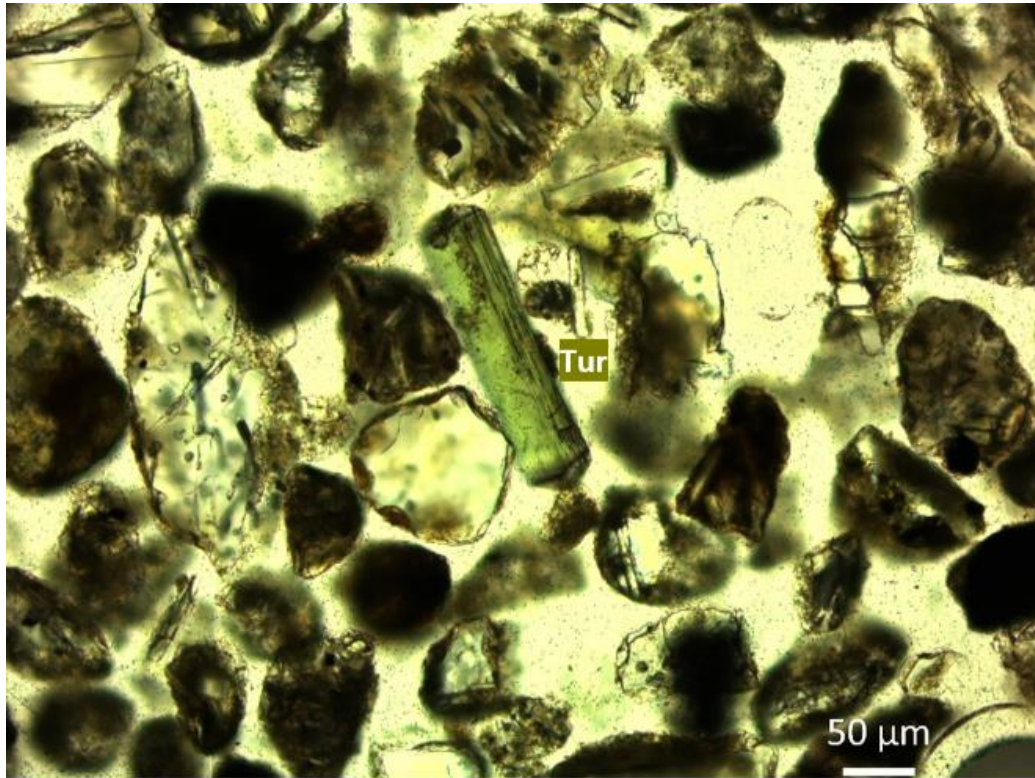


Figura P7. Imagen con luz polarizada simple de los componentes de la muestra DER 19136 en la fracción fina. Se observa un mineral de turmalina (Tur) rodeado de esquirlas de vidrio y algunas partículas oxidadas.

#### **Unidad de escoria en avalancha Emilio Portes Gil**

En cuanto a la avalancha Emilio Portes Gil, se analizó una muestra procedente a un fragmento de escoria basáltica con textura coliflor que colectamos en una unidad litológica formando un bloque dentro de un montículo (sitio DER 19146; Figura 4.3U), la cual comparamos con un fragmento juvenil proveniente del maar Atexcac (DER 1704).

La muestra de la avalancha es una roca hipocristalina con un porcentaje de vidrio de hasta más del 55 vol.% con minerales de plagioclasa (15 vol.%) y ortopiroxeno (10 vol.%) como se aprecia en la Figura P8.

En comparación, la muestra del maar también es hipocristalina, sin embargo, tiene menor contenido de vidrio (35 vol.%). Además, se identificaron, aparte de minerales de plagioclasa (30 vol.%), cristales de anfíbol y olivino que alcanzan porcentajes de hasta 10 vol.% y minerales como biotita, clinopiroxeno y ortopiroxeno cuya abundancia alcanza hasta el 5 vol.% cada uno (Figura P9). Los minerales de anfíbol y biotita observados en la muestra del maar están ausentes en la muestra de la avalancha, por lo cual deducimos que la unidad de la avalancha no proviene del maar Atexcac.

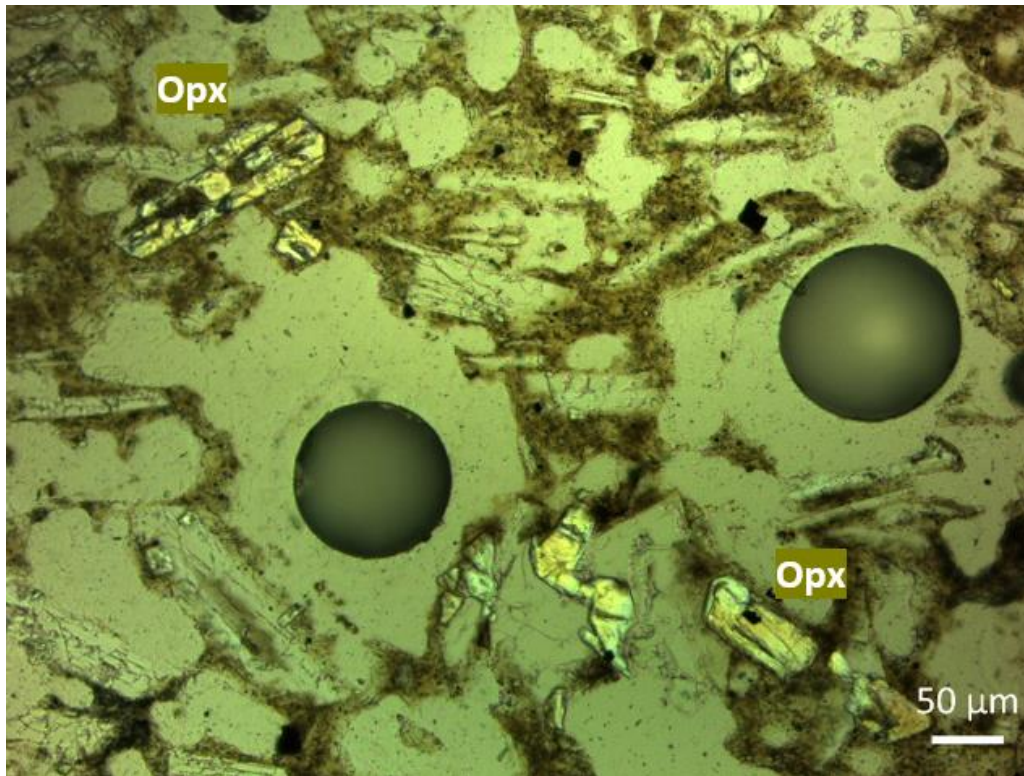


Figura P8. Imagen con luz polarizada simple de los componentes de la muestra DER 19146 en la fracción fina. Se observa un mineral de ortopiroxeno (Opx) rodeado de vidrio.

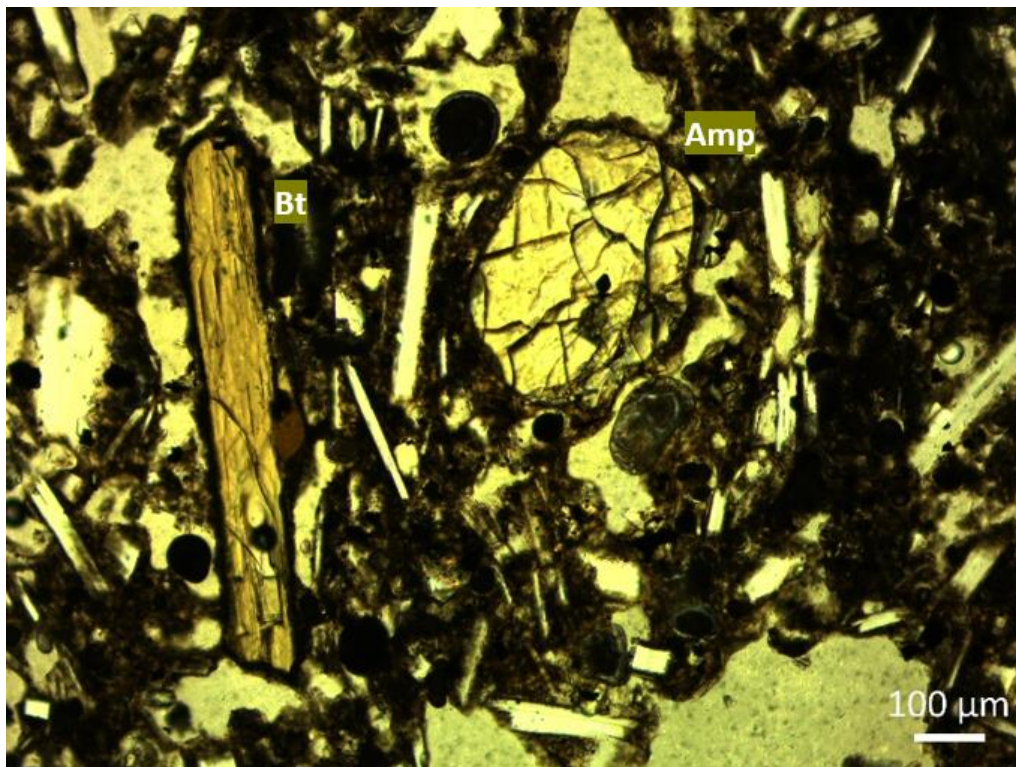


Figura P9. Imagen con luz polarizada simple de los componentes de la muestra DER 1704 en la fracción fina. Se observa un mineral de anfíbol (Amp) y uno de biotita (Bt), ambos rodeados de vidrio y cristales de plagioclasa.



## 5. Análisis de resultados y discusión

En esta sección, se discute el origen de los componentes que forman las distintas unidades litológicas encontradas dentro de los depósitos de las avalanchas del Domo Noroeste de Las Derrumbadas. Además de explicar y resaltar las diferencias observadas entre las distintas avalanchas, se proponen algunas hipótesis para explicar estas diferencias.

Los tres tipos de avalanchas mapeadas presentan distintas litologías, con una marcada diversidad de componentes y estructuras, que ocurren principalmente en facies de bloque dentro de los depósitos.

En la parte proximal de la Avalancha Atexcac domina la unidad litológica “brecha riolítica” que es material no consolidado perteneciente a la masa inicial deslizada. Son depósitos de contenido poli-litológico, clastos angulosos, y con mala clasificación del tamaño de grano pues se componen de bloques de decenas de centímetros hasta material tamaño ceniza fina (o arena), características típicas de un flujo de bloques y ceniza. Es posible que este flujo fuese producto de la actividad inicial del domo ya que consta principalmente de riolita.

En esta área, también se encuentra la unidad “ignimbrita”, depósito de buena clasificación conformado por una capa de ceniza verde y una capa de ceniza rosa cuyo contenido consta principalmente de partículas de vidrio translúcido y riolita blanca en menor proporción, y que son similares a las de la Ignimbrita Zaragoza observada más al norte en la cuenca.

Por otro lado, encontramos la unidad “toba café” en contacto transicional con la unidad brecha riolítica. Corresponde de igual manera a una facies de bloque y se compone principalmente por partículas de riolita blanca, riolita gris y líticos no diferenciados.

En la parte proximal de la Avalancha Emilio Portes Gil, se encuentran, en facies de bloques, depósitos estratificados de ceniza gruesa compuestos por riolita gris, riolita blanca y caliza, principalmente. Se trata de depósitos de oleada piroclástica, además de algunos balísticos y capas de caída, productos de la actividad inicial del domo y que fueron parte de la masa inicial deslizada. Otros depósitos estratigráficos encontrados en esta zona (ej. DER 19148) tienen un origen similar.

Hacia la zona medial se encuentra de nuevo la unidad ignimbrita y a partir de ahí hasta la zona distal se encuentran calizas lacustres, depósitos limo-arcillosos y travertino, además de bloques de lava basáltica y escoria.

Los análisis de componentes han revelado componentes presentes en poca abundancia entre estas litologías, estos son principalmente agregados, partículas oxidadas y líticos no diferenciados.

En cuanto a la Avalancha Las Águilas en la facies de matriz en la parte más proximal se observaron bloques con textura de rompecabezas en la cual se encuentran fragmentos de riolita, pedernal, caliza e incluso mármol. Hacia la parte más medial se encuentra la unidad “ignimbrita” descrita anteriormente para la Avalancha Atexcac. Además de estos componentes también está presente en decreciente orden de abundancia la riolita gris y riolita blanca (pómez), bloques de caliza y pedernal, sedimentos lacustres, pequeños bloques de mármol y en menor cantidad bloques de lava basáltica, en las zonas mediales y distales de la avalancha.

Los depósitos de avalancha en ocasiones se encuentran intercalados con depósitos de oleada piroclástica que no están deformados y, por lo tanto, se depositaron antes o después del emplazamiento de la avalancha. Al oeste del Domo Noroeste, estos depósitos están cubiertos por la avalancha Emilio Portes Gil, lo que sugiere un evento eruptivo previo a la formación de la avalancha. De igual manera, en la Avalancha Las Águilas los depósitos de oleadas están cubiertos por una capa delgada del depósito de avalancha. Sin embargo, en el sitio DER 19166, un depósito de oleada yace sobre el depósito de la avalancha, lo que sugiere que las avalanchas se formaron poco antes de las oleadas durante la erupción. Cabe notar que, de acuerdo con las descripciones de Molina-Guadarrama (2018), los componentes principales de las oleadas son iguales a los descritos en la unidad “brecha riolítica” de las avalanchas.

En varios sitios, las características de los depósitos observados apuntan a que no son depósitos de avalancha. En el sitio DER 19169, sitio cercano al domo, su análisis muestra una tendencia a un tamaño de grano de mayor tamaño. Sin embargo, la clasificación del depósito es mala y en cuanto a sus componentes es un depósito prácticamente monolítico (riolita gris). Aparentemente, su depósito está débilmente estratificado. Estas características indican que se trata de un depósito de lahar, algo que es coherente con la ubicación del sitio en una zona de aluviones. Depósitos similares observados a mayor distancia del domo (ej., DER 19135), cumplen también con estas características, sin embargo, su contenido es polilítico debido a que un lahar puede incorporar componentes durante su flujo conforme aumenta la distancia recorrida.

En cuanto al origen de los componentes de riolita de los depósitos de avalancha, es altamente probable que la riolita gris (roca y obsidiana) y la pómez, que comparten la misma mineralogía, provengan del magma que formó los domos, cuyos sectores iban colapsando durante su crecimiento y erupción (Siebe et al., 1997), pues además la roca parece fresca sin indicios de alteración. La considerable cantidad de pómez debió producirse por la eficiente fragmentación del magma rico en gas durante su ascenso a la superficie. Sin embargo, también es importante considerar que puede haber presencia de pómez proveniente del volcán cercano Cerro Pinto depositada previamente pues se encuentra a poco más de 7 Km de distancia. Las pómez de Cerro Pinto y Las Derrumbadas son mineralógicamente similares, sin embargo, de acuerdo con Zimmer et al. (2010) y Chédeville (2020), la pómez de Cerro Pinto es blanca y sus vesículas son elongadas en dirección paralela al eje mayor de los granos, generando una textura fibrosa. En comparación, la pómez de Las Derrumbadas presenta vesículas más redondas y en ocasiones colores grises como se observa en los depósitos de avalancha y se reporta en las descripciones de Molina-Guadarrama (2018). A partir de estas observaciones podríamos deducir que la unidad de oleada piroclástica observada como facies de bloques dentro de la avalancha Emilio Portes Gil corresponde a un fragmento de un depósito de oleada originado en el volcán Cerro Pinto.

La roca caliza, así como el pedernal, provienen probablemente ambos del basamento Cretácico de Las Derrumbadas, descrito por Yañez-García y García-Durán (1982), el cual con probabilidad fue levantado durante el crecimiento de los domos y posteriormente, durante el colapso, fueron incorporados como parte de las avalanchas (Siebe et al., 1997), pues al igual que la riolita, estas rocas se encuentran frescas sin algún indicio de alteración. En el caso del pedernal fue solamente encontrado en bloques de decenas de centímetros, nunca en las fracciones finas de los depósitos de avalancha y esto probablemente es debido a la gran resistencia de esta roca a la erosión y a las fuerzas de fricción, por lo que no lo encontramos en pequeñas partículas.

Los componentes lacustres limo-arcillosos, el travertino y la caliza de este ambiente fueron depositados mucho antes del crecimiento de los domos, durante el desarrollo de los grandes lagos en la cuenca. Chédeville et al. (2020) publica una edad de radiocarbono de 33, 500 años BC obtenida de material orgánico en sedimentos lacustres encontrados en una avalancha (muestra recolectada por Claus Siebe en 1996), los cuales deben ser parte de esta avalancha debido a que estaban depositados sobre la superficie que también fue levantada por los domos al igual que el basamento y fueron mezclados junto con los demás componentes tanto en la Avalancha Emilio Portes Gil como en la Avalancha Las Águilas durante su transporte.

En el caso de la unidad “toba café” presente en la Avalancha Atexcac, su origen es aún incierto. Depósitos de toba café de apariencia similar fueron reportados en distintas zonas de la cuenca: al norte de Las Derrumbadas en Alchichica (Chaco-Tcharmade et al., 2019), al sur de Las Derrumbadas en los productos de Tepexitl (Austin et al., 2011) y en el Cerro Toxtepec (Siebe y Verma, 1988), donde hay una ligera similitud en cuanto a su mineralogía con el contenido de ortopiroxeno y plagioclasa. Sin embargo, la unidad “toba café” de la Avalancha Atexcac presenta además olivino y anfíbol, entre otros minerales accesorios como la turmalina y el zircón.

De acuerdo con Freundt et al. (1999), las ignimbritas pueden estar compuestas por escoria, pómez o fragmentos de vidrio y sus flujos son capaces de alcanzar más de 100 km de distancia. Durante el transporte, la abrasión entre las partículas forma ceniza vítrea muy fina, la cual puede separarse de la base densa del flujo y transportarse turbulentamente y llegar aún más lejos. Por ello, es la última unidad de una ignimbrita en depositarse.

A partir de estas características y la comparación de los depósitos de la Ignimbrita Zaragoza cerca del volcán Cerro Pizarro con depósitos encontrados como bloques en las tres avalanchas y corroborando con el análisis petrográfico realizado, se propone que estos depósitos pertenecen también a la Ignimbrita Zaragoza, como parte de esta unidad de ceniza vítrea de la nube de la corriente de densidad piroclástica de la erupción de la Caldera de los Humeros, que llegó a depositarse sobre el área que posteriormente fue levantada por Las Derrumbadas y que así pudo formar parte de los depósitos de avalancha.

En el caso de las escorias encontradas en un solo sitio en la avalancha Emilio Portes Gil, al compararlas con la muestra DER 1704 de un fragmento juvenil de Atexcac, no se observa relación. Comparten el contenido de plagioclasa y ortopiroxeno, pero el lítico juvenil de Atexcac tiene menor contenido de vidrio y tiene cristales de anfíbol, olivino, clinopiroxeno y biotita, mineralogía que concuerda con las descripciones de Chédeville (2020) y Carrazco-Núñez et al. (2007). Por lo tanto, es más probable que los bloques de lava y escoria provengan de conos de escoria que estaban cercanos a Las Derrumbadas. Los bloques de lava encontrados en la Avalancha Emilio Portes Gil pueden provenir de un flujo de lava basáltico asociado a un cono de escoria. Mientras tanto, los bloques en la Avalancha Las Águilas seguramente también provienen de un flujo de lava preexistente, que fue incorporado por la avalancha.

La Avalancha Las Águilas es la única con fragmentos de mármol que, muy probablemente, son producto de la aureola de contacto provocada por la intrusión de granodioritas y monzonitas en las calizas del basamento durante el Paleógeno, descrita por Yáñez-García y García-Durán (1982), y por Siebe et al. (1995).

En resumen, podemos constatar que existen varias diferencias en cuanto a los componentes de los depósitos de las avalanchas. Hay unidades exclusivas de cada avalancha: la unidad

“toba café” en Atexcac, el mármol en Las Águilas y el travertino en Emilio Portes Gil, mientras que todas las avalanchas comparten las unidades “ignimbrita” y “brecha riolítica”, además de los bloques de caliza, pedernal y lava basáltica.

Las tres avalanchas también difieren en cuanto a su área (Emilio Portes Gil > Las Águilas > Atexcac), alcance (Las Águilas > Emilio Portes Gil > Atexcac) y además en su topografía. Los montículos o hummocks son muy pocos en la Avalancha Atexcac.

En la Avalancha Las Águilas, los montículos son más abundantes y ésta tiene mayor alcance, sin embargo, no se comparan con los grandes montículos formados en la Avalancha Emilio Portes Gil, pues aquí son mucho más extensos y de gran tamaño. Estas características de alcance, área y topografía están relacionadas con la cantidad de masa transportada y con el tamaño y tipo de componentes, por lo tanto, seguramente la Avalancha Emilio Portes Gil se formó por el colapso de un gran sector del domo que además pudo incorporar otra considerable cantidad de componentes de gran tamaño como las lavas basálticas y otros materiales resistentes que ayudaron a la incorporación de más masa y así formar la cantidad y magnitud de montículos presentes en todo el depósito. En cuanto al alcance, es probable que la Avalancha Las Águilas haya tenido mayor fluidez y lograra mayor alcance que las demás.

Tanto las imágenes satelitales como las observaciones en campo revelan que el límite oriental de la Avalancha Atexcac se encuentra estratigráficamente arriba del depósito de la Avalancha Las Águilas y por lo tanto, la Avalancha Las Águilas sucedió primero. En cuanto a la Avalancha Emilio Portes Gil, no se observa una relación directa con otro depósito, pero podríamos considerar que fue de las primeras avalanchas en generarse, partiendo de la idea que pudo haberse generado durante el crecimiento-destrucción del Domo, momento en el que la mayor parte de la masa volcánica se encontraba muy inestable y que el último sector del domo en colapsar solo era una menor fracción inestable del domo que dio origen a la formación de la Avalancha Atexcac.

La composición heterolitológica de las avalanchas concuerda con las descritas por Siebe et al. (1995; 1997) y que estos autores definen como avalanchas de “primera generación” (más antiguas), mientras que las avalanchas de “segunda generación” (más recientes) son muy distintas y no se describen en este trabajo pues pertenecen al Domo Sureste.

La presencia de obsidiana (considerada en conjunto con fragmentos más cristalinos como riolita gris en este estudio), fue explicada por Siebe y Verma (1988) quienes proponen que los domos de Las Derrumbadas debieron haber extruido en un periodo de tiempo corto, pues la obsidiana es el equivalente vítreo de la riolita y se forma como resultado de un enfriamiento súbito del magma. Sin embargo, los procesos de construcción de los edificios debieron haber sido más prolongados en el tiempo por los procesos de construcción-colapso. Siebe et al. (1995) sugieren también que es probable que ocurran avalanchas en el futuro pues Las Derrumbadas presentan actividad fumarólica, en especial en el Domo Sureste, un proceso que debilita su estructura. Además de esto, la apariencia de los domos no parece muy estable pues también hay depósitos de lahares que han ocurrido en el pasado reciente por lo que al menos fuertes lluvias e incluso movimientos telúricos de magnitud considerable podrían desencadenar avalanchas, las cuales en la actualidad representan un peligro latente para las comunidades establecidas cerca de Las Derrumbadas.

En el Domo Sureste se observan las típicas cicatrices con forma de herradura que dejan las avalanchas en la estructura volcánica, pero en el caso del Domo Noroeste no son visibles,

quizás porque el material del Domo Noroeste está menos consolidado y derrumbes posteriores a las avalanchas no hayan dejado rastros de estos eventos.



## 6. Conclusiones.

De acuerdo con Ui et al. (1999), hasta hace relativamente pocas décadas las avalanchas se reconocieron como un producto de un fenómeno volcánico distinto, pues antes sus depósitos se interpretaban como el resultado de lahares o flujos piroclásticos. Sin embargo, a partir de la erupción del Monte Santa Helena en 1980 se conoció el origen de estos depósitos y lo devastadoras que pueden llegar a ser las avalanchas, así como las características de sus depósitos.

Ante la gran cantidad de volcanes cercanos a Las Derrumbadas es muy difícil identificar el origen de las litologías que componen sus depósitos de avalancha. Sin embargo, a partir de los análisis y descripciones de sus depósitos pudimos deducir el origen de ciertos componentes. Para determinar con exactitud el origen de todos ellos es necesario llevar a cabo estudios detallados de petrografía y análisis geoquímicos de los volcanes y depósitos de la cuenca.

Las técnicas de granulometría y análisis de componentes son una gran herramienta que permite el entendimiento de los distintos depósitos asociados con los diferentes tipos de peligros volcánicos, pues a partir de los resultados de éstos se pueden diferenciar entre sí. Sin embargo, solo podrían estar revelando información exclusiva de la parte muestreada del depósito y no las características generales de éste.

En ocasiones es difícil identificar y clasificar los depósitos de avalancha, así como diferenciar la facies, pues normalmente se incorporan todo tipo de litologías formadas durante variados procesos previos a su incorporación y deposición. Su estudio es relevante pues proporciona pistas acerca de la dinámica y los procesos que llevaron a su formación, así como para evaluar los peligros potenciales que pueden originarse en un volcán. También es importante saber que en casi cualquier volcán se pueden generar avalanchas de escombros volcánicas.

Por su magnitud y estilo de erupción, Las Derrumbadas es uno de los volcanes con mayor impacto dentro de la cuenca. Aunque se considera monogenético aun representa un peligro latente para las comunidades cercanas, pues se podrían generar avalanchas y lahares nuevamente en el futuro. Debido a que La Derrumbadas forman parte de un campo monogenético, podría presentarse incluso a formación de un volcán completamente nuevo ya que la actividad volcánica de la cuenca ha sido recurrente durante todo el Holoceno (Chédeville et al., 2020).

La cuenca Serdán-Oriental representa una de las regiones más activas e interesantes del sector este de la Faja Volcánica Transmexicana durante el pasado reciente. Su estudio puede proveer información sobre los ambientes con vulcanismo bimodal, los distintos peligros volcánicos que puedan afectar esta región, y al existir sistemas hidrotermalmente activos, evaluar su potencial geotérmico para su aprovechamiento en beneficio de la sociedad.

## Referencias

- Aguirre-Díaz, G. J., & López-Martínez, M. (2001). The Amazcala caldera, Queretaro, Mexico. *Geology and geochronology. Journal of Volcanology and Geothermal Research* 111 (1-4), 203–218.
- Aguirre-Díaz, G. J., & López-Martínez, M. (2009). Geologic evolution of the Donguinyó-Huichapan caldera complex, central Mexican Volcanic Belt, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 179(1-2), 133-148.
- Allan, J. F. (1986). Geology of the northern Colima and Zacoalco grabens, southwest Mexico: Late Cenozoic rifting in the Mexican volcanic belt. *Geological Society of America Bulletin*, 97(4), 473-485.
- Austin-Erickson, A., Ort, M. H., & Carrasco-Núñez, G. (2011). Rhyolitic phreatomagmatism explored: tepexitl tuff ring (Eastern Mexican Volcanic Belt). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201(1-4), 325-341.
- Bardintzeff, J. M., & McBirney, A. R. (2000). *Volcanology*. Jones & Bartlett Learning.
- Barmin, A., Melnik, O., & Sparks, R. S. J. (2002). Periodic behavior in lava dome eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, 199(1-2), 173-184.
- Belousov, A., Belousova, M., & Voight, B. (1999). Multiple edifice failures, debris avalanches and associated eruptions in the Holocene history of Shiveluch volcano, Kamchatka, Russia. *Bulletin of Volcanology*, 61(5), 324-342.
- Bernal, J. P., Solari, L. A., Gómez-Tuena, A., Ortega-Obregón, C., Mori, L., Vega-González, M., & Espinosa-Arbeláez, D. G. (2014). In-situ <sup>230</sup>Th/U dating of Quaternary zircons using LA-MCICPMS. *Quaternary Geochronology*, 23, 46-55.
- Calder, E. S., Lavallée, Y., Kendrick, J. E., & Bernstein, M. (2015). Lava dome eruptions. In *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 343-362). Academic Press.
- Cantagrel, J. M., & Robin, C. (1979). K-Ar dating on eastern Mexican volcanic rocks—relations between the andesitic and the alkaline provinces. *Journal of volcanology and geothermal research*, 5(1-2), 99-114.
- Carrasco-Núñez, G., Dávila-Harris, P., Riggs, N.R., Ort, M.H., Zimmer, B.W., Willcox, C.P., y Branney, M.J. (2012). Recent explosive at the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *The Geological Society of America. Field Guide* 25.
- Castillo-Hernandez, D. (1991). Estudio geologico-regional de Los Altos, Jalisco y El Bajío: Comision Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoelectricos. Open File Report, 35.
- Clavero, J., Sparks, R., Huppert, H., & Dade, W. (2002). Geological constraints on the emplacement mechanism of the Parinacota debris avalanche, northern Chile. *Bulletin of Volcanology*, 64(1), 40-54.
- Crandell, D. R. (1989). Gigantic debris avalanche of Pleistocene age from ancestral Mount Shasta volcano, California, and debris-avalanche hazard zonation.

- Chédeville, C., Guilbaud, M. N., & Siebe, C. (2020). Stratigraphy and radiocarbon ages of late-Holocene Las Derrumbadas rhyolitic domes and surrounding vents in the Serdán-Oriental basin (Mexico): Implications for archeology, biology, and hazard assessment. *The Holocene*, 30(3), 402-419.
- Chouet, B. A., & Matoza, R. S. (2013). A multi-decadal view of seismic methods for detecting precursors of magma movement and eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 252, 108-175.
- Davies, T., McSaveney, M., & Kelfoun, K. (2010). Runout of the Socompa volcanic debris avalanche, Chile: a mechanical explanation for low basal shear resistance. *Bulletin of Volcanology*, 72(8), 933-944.
- Demant, A. (1978). Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 2(2), 172-187.
- Druitt, T.H., Kokelaar, B.P.(2002). The Eruption of Soufrière Hills Volcano, Montserrat, from 1995 to 1999. *Geological Society, London, Memoirs*, 21(1), 1-43.
- Ferrari, L. (2004). Slab detachment control on mafic volcanic pulse and mantle heterogeneity in central Mexico. *Geology*, 32(1), 77-80.
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G., & Carrasco-Núñez, G. (1999). Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: From the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt. *Geology*, 27(4), 303-306.
- Ferrari, L., Morán-Zenteno, D., & González-Torres, E. A. (2007). Actualización de la Carta Geológica de México, escala 1: 4,000,000. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Nuevo Atlas Nacional de México.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., & Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522, 122-149.
- Ferrari, L., Rosas-Elguera, J., & Delgado-Granados, H. (2000). Late Miocene to Quaternary extension at the northern boundary of the Jalisco block, western Mexico: The Tepic-Zacoalco rift revised. *Special Papers-Geological Society Of America*, 41-64.
- Ferrari, L., Tagami, T., Eguchi, M., Orozco-Esquivel, M. T., Petrone, C. M., Jacobo-Albarrán, J., & López-Martínez, M. (2005). Geology, geochronology and tectonic setting of late Cenozoic volcanism along the southwestern Gulf of Mexico: The Eastern Alkaline Province revisited. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 146(4), 284-306.
- Ferriz, H., & Mahood, G. A. (1984). Eruption rates and compositional trends at Los Hornos volcanic center, Puebla, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B10), 8511-8524.
- Fink, J. H. (1990). Lava flows and domes. In *IAVCEI Proceedings in Volcanology (Vol. 2)*. Berlin; Heidelberg: Springer.
- Francis, P. (1993). *Volcanoes: a planetary perspective*. Clarendon.
- Francis, P. (2002). The eruption of Soufrière Hills volcano, Montserrat, from 1995 to 1999. *Geological Society of London*.

- Freundt, A., Wilson, C. J. N., & Carey, S. N. (2000). *Ignimbrites and block-and-ash flow deposits*. Academic Press.
- Frey, H. M., Lange, R. A., Hall, C. M., & Delgado-Granados, H. (2004). Magma eruption rates constrained by  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  chronology and GIS for the Ceboruco–San Pedro volcanic field, western Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 116(3-4), 259-276.
- Gastil, G., Krummenacher, D., & Jensky, W. A. (1979). Reconnaissance geology of west-central Nayarit, Mexico: Summary. *Geological Society of America Bulletin*, 90(1), 15-18.
- Gilbert, C. M., Carmichael, I. S. E., & Mahood, G. A. (1985). Volcanic stratigraphy of the Guadalajara area, Mexico. *Geofísica Internacional*, 24(1), 169-191.
- Gill, R. (2011). *Igneous rocks and processes: a practical guide*. John Wiley & Sons.
- Glicken, H. (1986). *Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens volcano, Washington* (Doctoral dissertation, University of California, Santa Barbara.).
- Godoy, B., Clavero, J., Rojas, C., & Godoy, E. (2012). Facies volcánicas del depósito de avalancha de detritos del volcán Tata Sabaya, Andes Centrales. *Andean geology*, 39(3), 394-406.
- Gómez-Tuena, A., Langmuir, C. H., Goldstein, S. L., Straub, S. M., & Ortega-Gutiérrez, F. (2007a). Geochemical evidence for slab melting in the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Petrology*, 48(3), 537-562.
- Gómez-Tuena, A., Mori, L., & Straub, S. M. (2018). Geochemical and petrological insights into the tectonic origin of the Transmexican Volcanic Belt. *Earth-science reviews*, 183, 153-181.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., & Ferrari, L. (2007b). Igneous petrogenesis of the Trans-Mexican volcanic belt. *Geological Society of America Special Papers*, 422, 129-181.
- Grove, T.L. (1999). Origin of Magmas. In *The encyclopedia of Volcanoes* (pp. 133-147). Academic Press.
- Hasenaka, T. (1994). Size, distribution, and magma output rate for shield volcanoes of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63(1-2), 13-31.
- Hasenaka, T., & Carmichael, I. S. (1985). The cinder cones of Michoacán—Guanajuato, central Mexico: their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25(1-2), 105-124.
- Lipman, P. W., & Mullineaux, D. R. (Eds.). (1982). *The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington* (Vol. 1250). University of Washington Press.
- López-Infanzón, M. (1991). *Petrologic study of volcanic rocks from the Chiconquiaco-Palma Sola area, Central Veracruz, Mexico*. Master Science Thesis, Tulane University, New Orleans.
- Macías, J. L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 379-424.
- Macías, J. L., García, P. A., Arce, J. L., Siebe, C., Espíndola, J. M., Komorowski, J. C., & Scott, K. (1997). Late Pleistocene-Holocene cataclysmic eruptions at Nevado de Toluca and Jocotitlan volcanoes, central Mexico. *Brigham Young University Geology Studies*, 42(1), 493-528.

- Molina, A.N. (2018). Oleadas piroclásticas de Las Derrumbadas (Puebla, México): estructuras, componentes y procesos de formación. Tesis de Licenciatura, UNAM, México.
- Moore, G., Marone, C., Carmichael, I. S., & Renne, P. (1994). Basaltic volcanism and extension near the intersection of the Sierra Madre volcanic province and the Mexican Volcanic Belt. *Geological Society of America Bulletin*, 106(3), 383-394.
- Pardo, M., & Suárez, G. (1995). Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B7), 12357-12373.
- Reiche, P. (1937). The Toreva-Block: A distinctive landslide type. *The Journal of Geology*, 45(5), 538-548.
- Righter, K., & Rosas-Elguera, J. (2001). Alkaline lavas in the volcanic front of the western Mexican Volcanic Belt: geology and petrology of the Ayutla and Tapalpa volcanic fields. *Journal of Petrology*, 42(12), 2333-2361.
- Rossotti, A., Ferrari, L., Martínez, M. L., & Elguera, J. R. (2002). Geology of the boundary between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt in the Guadalajara region, western Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19(1), 1-15.
- Scarfe, C. M. (1977). Viscosity of a pantellerite melt at one atmosphere. *The Canadian Mineralogist*, 15(2), 185-189.
- Shea, T., de Vries, B. V. W., & Pilato, M. (2008). Emplacement mechanisms of contrasting debris avalanches at Volcán Mombacho (Nicaragua), provided by structural and facies analysis. *Bulletin of Volcanology*, 70(8), 899-921.
- Siebe, C. (1985). Geologische, geochemische und petrographische Untersuchungen im Gebiet der rhyolithischen Dome Las Derrumbadas, Bundesstaat, Puebla, Mexiko (Doctoral dissertation, Diplomarbeit, Universität Tübingen).
- Siebe, C., & Verma, S. P. (1988). Major element geochemistry and tectonic setting of Las Derrumbadas rhyolitic dome, Puebla, Mexico. *Chemie Der Erde*, 48(3), 177-189.
- Siebe, C., Macias, J. L., Abrams, M., Rodriguez, S., Castro, R. (1997). Catastrophic prehistoric eruptions at Popocatepetl and Quaternary explosive volcanism in the Serdán-Oriental basin, East-Central, Mexico. *International Association Of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior, Puerto Vallarta, Mexico*, (4), 1-88.
- Siebe, C., Macias, J. L., Abrams, M., Rodriguez, S., Castro, R., & Delgado, H. (1995). Quaternary explosive volcanism and pyroclastic deposits in east central Mexico: implications for future hazards. In *Guidebook of geological excursions: in conjunction with the Annual Meeting of the Geological Society of America, New Orleans, Louisiana, November 6-9, 1995* (pp. 1-48).
- Siebert, L. (1984). Large volcanic debris avalanches: characteristics of source areas, deposits, and associated eruptions. *Journal of volcanology and geothermal research*, 22(3-4), 163-197.
- Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., & Stix, J. (Eds.). (2015). *The encyclopedia of volcanoes*. Elsevier.
- Sigurdsson, H., Houghton, B., Rymer, H., Stix, J., y McNutt, S. (1999). *Encyclopedia of Volcanoes*, Academic Press, New York, USA.



- Tchamabé, B. C., Carrasco-Núñez, G., Miggins, D. P., & Németh, K. (2020). Late Pleistocene to Holocene activity of Alchichica maar volcano, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of South American Earth Sciences*, 97, 102404.
- Toselli, A. J. (2009). Elementos básicos de petrología ígnea. Instituto Superior de Correlacion Geologica, Serie Miscelanea, 18, 143-186.
- Ui, T., Takarada, S., Yoshimoto, M. (1999). Debris Avalanches. In *The encyclopedia of Volcanoes* (pp. 581-599). Academic Press.
- Valentine, G.A., Fisher, R.V. (1999). Pyroclastic Surges and Blasts. In *The encyclopedia of Volcanoes* (pp. 581-599). Academic Press.
- Vallance, J.W. (1999). Lahars. In *The encyclopedia of Volcanoes* (pp. 581-599). Academic Press.
- Van de Wyk de Vries, B., Davies T. (2015). Landslides, Debris Avalanches, and Volcanic Gravitational Deformation. In *The encyclopedia of Volcanoes* (pp. 665-685). Elsevier.
- Voight, B., Sparks, R. S. J., Miller, A. D., Stewart, R. C., Hoblitt, R. P., Clarke, A., ... & Cole, P. (1999). Magma flow instability and cyclic activity at Soufriere Hills volcano, Montserrat, British West Indies. *Science*, 283(5405), 1138-1142.
- W Negendak, J. F., Emmermann, R., Krawczyk, R., Mooser, F., Tobschall, H., & Werle, D. (1985). Geological and geochemical investigations on the eastern trans mexican volcanic belt. *Geofísica Internacional*, 24(4).
- Willcox, C. P. (2011). Eruptive, magmatic and structural evolution of a large explosive caldera volcano, Los Humeros, Central Mexico (Doctoral dissertation, University of Leicester).
- Yáñez-García, A., Casique, J. (1980) Informe geológico del proyecto geotérmico Los Humeros-Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz: México. Mexico: Comisión Federal De Electricidad, 97 p.
- Yáñez-García, C. y García-Durán, S. (1982). Exploración geotérmica de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz. Mexico: Comisión Federal De Electricidad, 98 p.
- Zimmer, B. W., Riggs, N. R., & Carrasco-Núñez, G. (2010). Evolution of tuff ring-dome complex: the case study of Cerro Pinto, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Bulletin of Volcanology*, 72(10), 1223-1240.

Tabla A1. Resultados de la granulometría (% en peso)

Sector	Atexcac						Emilio Portes Gil						Cerro Pinto		Lahares
Depósito	avalancha	avalancha	avalancha	ignimbrita	ignimbrita	toba café	oleada	oleada	avalancha	oleada	ignimbrita	lahar	ignimbrita	ignimbrita	lahar
phi \ DER	17148 B	19128 A	19159	19131 A	19131 B	19136	1887	1888	19139	19140	19147	19169	1996 B	1996 C	19135
>-4	0.0	9.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.2	5.9	0.0	0.0
-4	4.8	10.7	9.1	0.0	0.0	0.0	1.2	3.9	7.8	0.0	0.0	17.1	7.5	0.5	20.0
-3.5	4.9	6.9	9.4	0.0	0.0	0.0	1.4	4.6	4.3	0.0	0.0	9.3	3.3	1.7	5.6
-3	6.4	7.1	6.3	0.0	0.0	0.0	5.5	6.7	4.6	0.0	0.0	7.5	2.0	3.0	6.6
-2.5	8.1	6.3	7.3	0.0	0.0	0.0	5.9	7.8	6.5	0.0	0.0	6.9	2.5	3.0	7.2
-2	8.6	5.8	6.7	0.0	0.0	0.3	11.6	8.1	4.4	0.0	0.0	6.7	2.4	3.1	7.2
-1.5	9.9	7.2	7.5	0.1	0.0	0.7	19.0	10.0	7.4	0.4	0.0	6.7	3.3	3.5	7.7
-1	7.3	4.8	5.0	0.1	0.0	0.7	14.3	7.3	5.5	0.4	0.0	4.3	2.5	2.6	5.4
-0.5	8.7	5.6	5.9	0.1	0.0	1.4	15.6	8.4	6.9	0.9	0.1	4.4	3.5	3.7	5.9
0	6.8	4.4	4.7	0.9	0.1	1.9	10.1	6.6	5.8	1.6	1.8	3.1	4.4	3.8	4.5
0.5	7.7	4.7	5.6	2.9	2.1	3.8	7.8	7.4	5.9	4.5	9.0	3.2	8.0	7.1	4.8
1	4.6	3.4	3.8	4.0	6.2	4.8	3.0	4.4	4.3	9.2	10.9	1.9	5.9	7.8	3.2
1.5	4.5	3.5	4.7	7.0	13.2	8.1	1.8	4.3	4.7	17.8	19.2	2.0	6.1	11.3	3.2
2	3.7	3.4	5.2	9.2	19.5	10.4	0.9	3.4	4.5	17.3	20.2	1.9	5.4	12.2	3.0
2.5	2.5	2.9	3.9	12.1	21.7	11.5	0.4	2.8	5.3	12.8	18.1	2.2	4.6	10.4	2.9
3	2.1	2.7	3.0	12.5	12.2	9.3	0.2	2.1	4.3	7.3	11.1	1.6	4.0	6.0	2.4
3.5	1.6	2.0	2.5	11.7	7.4	7.4	0.2	1.5	3.3	3.6	5.6	1.4	3.6	3.9	1.8
4	1.2	2.1	2.9	13.2	6.1	9.6	0.2	1.3	3.6	2.8	2.6	1.4	4.5	3.4	1.9
>4	6.5	6.6	6.4	26.3	11.5	30.1	0.9	9.3	10.8	21.4	1.6	4.2	20.7	13.0	6.7

Tabla A2. Resultados del análisis de Componentes (% en volumen)											
Sector	Depósito	DER	Riolita gris	Riolita blanca	Caliza	Agregados	Vidrio translúcido	Líticos no diferenciados	Cristales	Líticos oxidados	Pedernal
A t e x c a c	avalancha	1748 B	29.9	60.1	7.3	2.3	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0
	avalancha	19128A	78.3	5.7	5.3	9.7	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	avalancha	19159	51.7	6.0	13.6	6.0	0.6	9.3	2.3	10.3	0.0
	ignimbrita	19131A	1.0	6.7	0.0	0.0	86.0	0.0	0.3	6.0	0.0
	ignimbrita	19131B	0.0	7.0	0.0	0.0	78.0	0.0	0.0	15.0	0.0
	toba café	19136	16.7	56.3	0.0	1.3	3.7	17.3	2.6	2.0	0.0
E P G	oleada	1887	51.7	26.3	20.3	0.7	0.0	0.3	0.3	0.0	0.3
	oleada	1888	59.0	24.8	12.4	2.3	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0
	avalancha	19139	81.4	0.3	11.0	3.3	0.0	0.0	0.3	3.7	0.0
	oleada	19140	13.7	83.5	1.9	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
	ignimbrita	19147	0.7	3.9	0.0	0.0	90.8	0.1	0.3	3.3	0.0
	lahar	19169	92.2	1.3	0.0	3.3	0.0	0.0	0.0	3.3	0.0
Cerro Pinto	ignimbrita	1996B	0.0	56.0	0.0	0.0	29.7	0.0	0.0	14.3	0.0
	ignimbrita	1996C	42.1	41.4	0.0	2.6	5.0	3.0	1.3	4.6	0.0
Lahares	lahar	19135	62.0	1.0	33.0	0.7	0.0	0.7	0.0	2.3	0.3
		Promedio	38.7	25.4	7.0	2.1	19.7	2.0	0.5	4.4	0.0