



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

# **VOLCANISMO FREATOMAGMÁTICO DEL MIOCENO SUPERIOR DE LOS ANDES CENTRALES DEL NORTE DE CHILE**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA**  
JESSICA ESTER LIENLAF ROJAS

**PROFESOR GUÍA**  
ANGELO CASTRUCCIO ÁLVAREZ

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN**  
CLAUDIA CANNATELLI  
JORGE CLAVERO RIBES

SANTIAGO DE CHILE  
2019

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geóloga  
**POR:** Jessica Ester Lienlaf Rojas  
**FECHA:** 04/03/2019  
**PROFESOR GUÍA:** Ángelo Castruccio  
Álvarez.

## **VOLCANISMO FREATOMAGMÁTICO DEL MIOCENO SUPERIOR DE LOS ANDES CENTRALES DEL NORTE DE CHILE**

El siguiente trabajo se enfoca en el estudio de dos centros eruptivos freatomagmáticos, denominados con los nombres de Michacollo y Lliza, ubicados en los Andes Centrales de la XV Región de Arica y Parinacota.

El objetivo principal es analizar los procesos asociados al volcanismo freatomagmático del Mioceno Superior que dieron origen a los centros eruptivos antes mencionados, permitiendo así determinar la evolución de sus ciclos eruptivos.

Para cumplir con el objetivo se llevaron a cabo estudios estratigráficos, de componentes y petrográficos a depósitos pertenecientes a ambos centros. Así fue posible definir facies, unidades de flujo y unidades propiamente tal para cada maar.

Del estudio se pudo concluir que los depósitos pertenecientes a Michacollo corresponden a facies inicialmente localizadas al interior del maar, donde el magma participante era de composición dacítica. Michacollo fue formado por cuatro etapas eruptivas, siendo estas de características netamente freatomagmáticas, donde la proporción de agua/magma varía a lo largo de la formación del depósito. Se pudo concluir además, que el agua participante sería netamente subterránea.

Del estudio de Lliza, se pudo concluir que los depósitos corresponden a los anillos de tefra que rodean al cráter del maar y que el magma participante fue de características andesito-basálticas. Se definieron dos etapas de evolución, la primera de características netamente freatomagmáticas y la siguiente de características magmáticas, la cual dio origen a la formación de un cono de escorias. Al igual que en Michacollo, el agua participante en la erupción fue netamente subterránea.

A mi familia, con amor.  
Para Natalia, sin ti este mundo es un poco menos colorido

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mi profesor guía Ángelo Castruccio, por sus consejos y guía durante la realización de la memoria. A Jorge Clavero por ser el gestor de esta memoria y por compartir sus conocimientos conmigo. A Claudia Cannatelli, por ayudarme cada vez que lo necesité, siempre con buena disposición y una sonrisa en la cara. Así mismo, agradezco a Amawta Geoconsultores, por financiar el terreno que dio origen a esta memoria y a parte de los estudios realizados.

Agradezco de todo corazón a Blanca, que me ayudó cada vez que fui a su oficina a molestarla y también por sus charlas para subir el ánimo y sus retos para que me enfocara en la memoria. Sin tu ayuda Blanca, aún seguiría procrastinando.

A la tía de la biblioteca de geología, por siempre tener disponibilidad para ayudarme en cada pregunta que le hacía y por estar siempre feliz.

También agradezco a mis amigas de toda la vida, Camila y Nicole, que, aunque desde que ingresamos a la Universidad nos vemos poco, las quiero con todo el corazón.

A mis tías Juana, Mirta, Marta y Cecilia y a mis primas Roció y Karen, que cada vez que hablaba con ellas me recordaban que debía terminar la carrera.

A mi hijo Bastián, quien llegó de sorpresa y revolvió por completo mi mundo, pero que inundó de alegría mi vida y la de mis cercanos. Tú, hijo mío, eres lo más valioso y preciado que tengo en el mundo. Te amo hasta el infinito.

Agradezco especialmente a mis padres Ester y Gilberto, por entregarme todo lo necesario desde que era pequeña, por apoyarme y confiar en mí, y también por todavía mantenerme y aguantarme en casa a los 27 años de edad.

Finalmente agradezco de todo corazón a mi Tata, porque sin su valor para cuidar a mi padre, yo no existiría, descansa en paz viejito; y a Natalia, fuiste la hermana chica que nunca tuve, perderte fue perder parte de mi corazón, aún me duele saber que no estás. Siempre atesoraré los recuerdos y las pinturas que nos dejaste. Te amo.

## TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	1
1.1 Ubicación y vías de accesos a centros eruptivos	1
1.2 Hipótesis de Trabajo	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
2. Metodología	4
2.1 Trabajo pre terreno	4
2.2 Trabajo de campo	4
2.3 Trabajo de gabinete y laboratorio	5
3. Marco teórico	6
3.1 Vulcanismo hidromagmático	6
3.2 Corrientes de densidad piroclástica	6
3.3 Maar	8
4. Marco geológico	9
5. Resultados	11
5.1 Estratigrafía de depósitos eruptivos	12
5.1.1 Centro Eruptivo Michacollo	14
5.1.2 Depósito post centro eruptivo Michacollo	28
5.1.3 Centro Eruptivo Lliza	30
5.2 Análisis sedimentológico	37
5.2.1 Análisis granulométrico	38
5.2.2 Análisis de componentes	40
5.2.2.1 Discriminación por tipo	40
5.2.2.2 Discriminación por angulosidad	43
5.3 Análisis petrográfico	48
5.3.1 Maar de Michacollo	48
5.3.2 Maar de Lliza	52
6. Discusiones	53
6.1 Consideraciones iniciales	53
6.2 Unidades de flujo	54
6.2.1 Centro Eruptivo Michacollo	54
6.2.2 Centro Eruptivo Lliza	56
6.3 Facies del maar	57
6.4 Unidades Finales	58

6.5 Evolución de centro eruptivos	59
6.5.1 Reconstrucción eruptiva maar Michacollo	59
6.5.2 Reconstrucción eruptiva maar Lliza	61
6.6 Consideraciones finales	62
7. Conclusiones	64
8. Bibliografía	66
9. Anexos	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Imagen satelital de la ubicación de centros eruptivos Michacollo y Lliza, XV Región de Arica y Parinacota, Chile.	2
<b>Figura 2.</b> Diagrama esquemático de volcán tipo maar-diatrema (Lorenz, 2003).	9
<b>Figura 3.</b> Mapa de ubicación de centros eruptivos Michacollo y Lliza en mapa geológico regional del norte de Chile (modificado de Clavero et al., 2004).	10
<b>Figura 4.</b> Vista en terreno de los depósitos del Maar de Michacollo.	11
<b>Figura 5.</b> Vista en terreno de los depósitos del Maar de Lliza.	12
<b>Figura 6.</b> A la izquierda: ubicación centro eruptivo Michacollo. A la derecha: A, B, C representan los puntos de levantamiento de columnas estratigráficas.	13
<b>Figura 7.</b> A la izquierda: ubicación centro eruptivo Lliza. A la derecha: A, B representan los puntos donde se realizó el levantamiento de las columnas estratigráficas.	13
<b>Figura 8.</b> Imagen satelital del área de estudio, con rumbos y manteos medidos en centro eruptivo Michacollo.	15
<b>Figura 9.</b> Imagen satelital del área de estudio, en donde con línea punteada negra se delimita la extensión probable de los depósitos del centro eruptivo Michacollo. Con línea punteada roja se delimita el eventual cráter. A, B, C: puntos donde se realizó el levantamiento de columnas estratigráficas.	15
<b>Figura 10.</b> Correlación perfiles estratigráficos centro eruptivo Michacollo. A-C: cara oriental; B: cara occidental.	16
<b>Figura 11.</b> Columna estratigráfica generalizada, Maar Michacollo.	17
<b>Figura 12.</b> Nivel 1, centro eruptivo Michacollo. En la imagen se distingue zona inferior con laminación cruzada y zona superior con laminación paralela. Contacto superior ondulado con Nivel 2.	18
<b>Figura 13.</b> Nivel 1, centro eruptivo Michacollo. Contacto superior ondulado con Nivel 2.	19

<b>Figura 14.</b> Nivel 2, centro eruptivo Michacollo. Con línea continua se delimita el contacto inferior ondulado con Nivel 1 y con línea punteada, los subniveles i y ii.	20
<b>Figura 15.</b> Contacto concordante entre Nivel 3 y Nivel 4, centro eruptivo Michacollo. En el techo del Nivel 3 se distingue una antiduna.	21
<b>Figura 16.</b> Nivel 5, centro eruptivo Michacollo	22
<b>Figura 17.</b> Nivel 6, centro eruptivo Michacollo. Con línea punteada se diferencian subniveles i y ii.	23
<b>Figura 18.</b> Nivel 7, centro eruptivo Michacollo. Con línea punteada se diferencian subniveles i, ii y iii.	24
<b>Figura 19.</b> Con línea negra se demarca el contacto ondulado entre niveles 8 y 9, centro eruptivo Michacollo. Con línea punteada blanca se delimita subniveles i y ii.	26
<b>Figura 20.</b> Boudinage en centro eruptivo Michacollo	27
<b>Figura 21.</b> Fracturas en Echelón centro eruptivo Michacollo	27
<b>Figura 22.</b> A la izquierda: encerrado en un polígono rojo, juvenil de bordes irregulares. A la derecha: capas plegadas Nivel 10 de los depósitos del centro eruptivo Michacollo.	28
<b>Figura 23.</b> Vista del depósito de flujo piroclástico de tipo bloque y ceniza sobreyaciendo a depósitos del centro eruptivo Michacollo	29
<b>Figura 24.</b> Bloques con diaclasas prismáticas o PJB. Líneas blancas demarcan las trazas de las fracturas concéntricas.	29
<b>Figura 25.</b> Imagen satelital de área de estudio, con los rumbos y manteos de los depósitos del centro eruptivo Lliza.	30
<b>Figura 26.</b> Imagen satelital, centro eruptiva Lliza. Con línea negra punteada se delimita la extensión de los depósitos. Con línea punteada roja se delimita el cráter del maar. Se realiza perfil en P-P', el cual considera depósitos del maar, lava AA y cono de escoria.	31
<b>Figura 27.</b> Perfiles estratigráficos A y B, centro eruptivo Lliza.	32
<b>Figura 28.</b> Perfil estratigráfico generalizado, centro eruptivo Lliza.	33



<b>Figura 29.</b> Con línea negra se demarca el contacto discontinuo entre depósitos del maar de Lliza y depósitos de lava AA.	35
<b>Figura 30.</b> Bloques de lava AA inmersos en los depósitos del maar Lliza.	35
<b>Figura 31.</b> Vista hacia el este de los depósitos del Maar de Lliza. Se puede apreciar además el nivel de lava AA y del domo riolítico, sobreyaciendo los depósitos de Lliza.	36
<b>Figura 32.</b> Ubicación de muestras tamizadas en la columna estratigráfica, Maar Michacollo.	37
<b>Figura 33.</b> Ploteo de Mediana ( $Md\phi$ ) vs Selección ( $\sigma\phi$ ) para 13 muestras del centro eruptivo Michacollo.	39
<b>Figura 34.</b> Juvenil presente en los depósitos del centro eruptivo Michacollo.	40
<b>Figura 35.</b> Tipos de líticos presente en el depósito del centro eruptivo Michacollo. A: Líticos cristalinos. B: Líticos gris oscuro. C: Líticos rojizos. D: Líticos café/rosado.	41
<b>Figura 36.</b> A la izquierda, cristal de cuarzo. A la derecha, cristal de ortoclasa. Ambos presentes en el centro eruptivo Michacollo.	41
<b>Figura 37.</b> Triangulo de componentes del centro eruptivo Michacollo.	42
<b>Figura 38.</b> Morfología clastos sedimentarios (Pettijohn et al. 1987).	43
<b>Figura 39.</b> Ejemplo de separación por morfología de clastos sedimentarios (pómez). A: redondeado; B: subredondeado; C: subangular; D: angular	43
<b>Figura 40.</b> Compilación de información. Se grafica parámetros de mediana y selección (A), distribución de angulosidad (B) y de componentes (C) para cada nivel estudiado de los depósitos del centro eruptivo Michacollo.	45
<b>Figura 41.</b> Compilación de información. Se grafica curvas de porcentaje en peso versus tamaño de grano (A), porcentaje de componentes según tamaño de grano (B) y distribución de angulosidad según tipo de componente (C). Parte I.	46
<b>Figura 42.</b> Compilación de información. Se grafica curvas de porcentaje en peso versus tamaño de grano (A), porcentaje de componentes según tamaño de grano (B) y distribución de angulosidad según tipo de componente (C). Parte II.	47

<b>Figura 43.</b> Imagen de sección delgada de depósitos del maar de Michacollo I.	48
<b>Figura 44.</b> Imagen de sección delgada de depósitos del maar de Michacollo II.	49
<b>Figura 45.</b> Imagen de sección delgada de depósitos del maar de Michacollo III.	49
<b>Figura 46.</b> Imagen de sección delgada de depósitos del maar de Michacollo IV.	50
<b>Figura 47.</b> Imagen de sección delgada de bloque perteneciente a flujo de tipo bloque y ceniza.	50
<b>Figura 48.</b> Imagen de sección delgada de depósitos del maar de Lliza.	51
<b>Figura 49.</b> Esquema del centro eruptivo Michacollo.	52
<b>Figura 50.</b> Esquema del centro eruptivo Lliza.	53
<b>Figura 51.</b> Reconstrucción evolución eruptiva, centro eruptivo Michacollo	60
<b>Figura 52.</b> Reconstrucción evolución eruptiva, centro eruptivo Lliza	61

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Muestras para granulometría	37
<b>Tabla 2.</b> Escala Phi, Krumbein (1937)	38
<b>Tabla 3.</b> Fórmulas del método grafico de Folk y Ward, 1957	38
<b>Tabla 4.</b> Grado de selección, referente a depósitos volcánicos primarios	38
<b>Tabla 5.</b> Mediana y selección, muestras centro eruptivo Michacollo	39
<b>Tabla 6.</b> Tabla resumen centro eruptivo Michacollo	
<b>Tabla7.</b> Tabla resumen centro eruptivo Lliza	

# 1. INTRODUCCIÓN

El volcanismo freatomagmático ha sido estudiado por diversos autores a lo largo de los años, siendo algunos de los máximos exponentes Volker Lorenz, Ken Wohletz, Bernd Zimanowski, entre otros.

La siguiente investigación pretende comprender y caracterizar el volcanismo freatomagmático del Mioceno Superior, datado por Clavero et al. (2018), en el extremo norte de Chile, a través del estudio de los únicos dos centros eruptivos hidrovolcánicos identificados. Estos centros eruptivos se denominan Maar de Michacollo y Maar de Lliza.

El área de estudio se ubica en los andes centrales, en la XV región de Arica y Parinacota, el cual se encuentra enmarcado en la Zona Volcánica Central (CZV), la que se extiende desde los 14°S hasta los 28°S. El volcanismo predominante en la zona de estudio es de tipo andesítico y dacítico.

La relevancia de esta investigación radica en lo desconocido que ha sido el volcanismo freatomagmático en la zona altiplánica de la Alta Cordillera, y dado lo violento y súbito de las erupciones de este tipo de volcanismo, el contar con un registro de la historia eruptiva de los maares constituye un aporte al conocimiento geológico de la zona.

## 1.1 UBICACIÓN Y VIAS DE ACCESO A CENTROS ERUPTIVOS

El Maar de Michacollo se encuentra ubicado en las coordenadas 465612/7982554, aproximadamente a 8 km desde el Pueblo de Parinacota en línea recta (figura 1). El Maar de Lliza se ubica en las coordenadas 478136/7956880, aproximadamente a 32 km desde el Pueblo de Parinacota en línea recta (figura 1).

Para acceder a ambos centros eruptivos, Michacollo y Lliza, se toma la Ruta Internacional 11-CH, Av. Simón Bolívar, desde la ciudad de Arica. Para llegar al Maar de Michacollo, aproximadamente a 4 km antes de llegar al pueblo de Parinacota, se toma el desvío A-201 hacia el sur (desvío no pavimentado), por el cual se transita aproximadamente 4 km. Para acceder al Maar de Lliza, se toma el desvío no pavimentado A-211, aproximadamente a 16 km antes de llegar al Pueblo de Parinacota; luego, se continúa 37 km por el camino no pavimentado A-235 (figura 1).

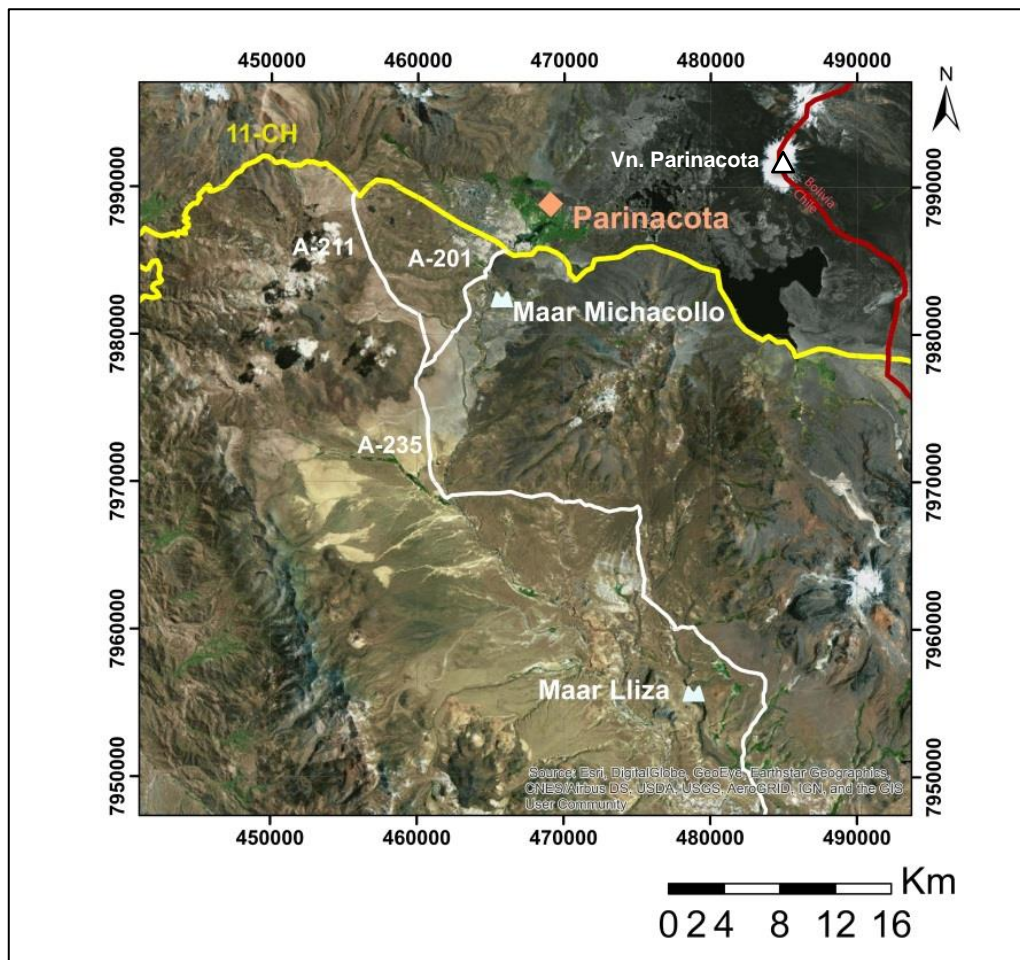


Figura 1. Imagen satelital de la ubicación de centros eruptivos Michacollo y Lliza, XV Región de Arica y Paríacota, Chile.

Esta investigación se enmarca en el contexto de la Carta Geológica Lago Chungará del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), aun en edición. El financiamiento provino de Amawta Geoconsultores, autores de la carta geológica antes mencionada.

## **1.2 HIPÓTESIS DE TRABAJO**

Las características texturales, estratigráficas, granulométricas, composicionales y petrográficas de los depósitos piroclásticos permitirán dilucidar los procesos físicos que dieron origen a los depósitos freatomagmáticos de Michacollo y Lliza, así como también permitirán dilucidar las variaciones del estilo eruptivo y su evolución con el tiempo.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo General**

Analizar los procesos asociados al volcanismo freatomagmático del Mioceno Superior en el Altiplano de Arica.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- i. Caracterizar el estilo eruptivo freatomagmático de los centros volcánicos Michacollo y Lliza.
- ii. Definir y analizar facies volcánicas para los centros eruptivos Michacollo y Lliza.
- iii. Determinar y comparar la evolución de los ciclos eruptivos que formaron a los centros eruptivos Michacollo y Lliza.

## **2. METODOLOGÍA**

Para cumplir los objetivos del presente trabajo de investigación, se llevaron a cabo tres etapas principalmente, las cuales consisten en: un trabajo pre-terreno, en donde se procedió a la compilación y análisis de material bibliográfico; trabajo de campo; y trabajo de laboratorio.

### **2.1 TRABAJO PRE-TERRENO**

Como preparación para la campaña, en primera instancia se recopiló información del área de estudio en el ámbito geológico regional y local. Adicionalmente se llevó a cabo el análisis de artículos científicos relacionados al hidrovulcanismo, freatomagmatismo, así como génesis y desarrollo de volcanes tipo maar.

### **2.2 TRABAJO DE CAMPO**

El terreno se efectuó entre los días 23 de enero y 2 de febrero del 2017, y contó con la participación de cuatro geólogos, dos alumnas de pregrado y un conductor.

El lugar de alojamiento se encontraba en el pueblo de Putre, por lo cual cada día se tenía que recorrer entre 30 y 40 km para llegar a los centros eruptivos en estudio, siendo el maar de Lliza el más alejado.

Durante los días de campaña, se procedió a describir y caracterizar los depósitos de los centros eruptivos Michacollo y Lliza.

A continuación, se detallan los pasos seguidos:

- i. Levantamiento y descripción detallada de cinco secciones estratigráficas. Estas se realizaron en tres puntos en el centro eruptivo Michacollo y en dos puntos en el centro eruptivo Lliza. En cada punto se procedió a separar los depósitos en niveles, medir el espesor de estos y realizar descripción sedimentológica detallada desde base a techo.
- ii. Medición de rumbos y manteos en capas de los distintos niveles de los depósitos volcánicos en estudio.
- iii. Recolección de 25 muestras de depósitos de oleadas piroclásticas en centro eruptivo Michacollo y 2 en centro eruptivo Lliza, para análisis granulométrico, morfológico y de componentes, tanto de la matriz como de los fragmentos mayores. El peso de las muestras varía entre 300 y 1500 gramos.
- iv. Para análisis petrográfico se llevó a cabo la elaboración de 5 láminas delgadas. Estas se realizaron a 4 muestras pertenecientes a los depósitos de corrientes de densidades piroclásticas del centro eruptivo Michacollo, y a 1 muestra de los bloques

del depósito volcánico post centro eruptivo que se encuentra sobreyaciendo a Michacollo.

### 2.3 TRABAJO DE GABINETE Y LABORATORIO

Para cumplir el objetivo específico (i) y (ii) se llevaron a cabo los siguientes procedimientos:

i. Digitalización de columnas estratigráficas realizadas en terreno y posterior correlación.

ii. Análisis granulométrico de los depósitos, el cual comprende el tamizaje de 11 muestras utilizando mallas de norma *astm* en escala *phi*, entre los rangos  $-4$  y  $4$  *phi* (16 a 0.0625 mm). El tamizado se llevó a cabo de manera manual para evitar abrasión de juveniles. Posterior a esto se realizó el pesaje de cada porción de muestra tamizada y se confeccionaron gráficos de tamaño vs porcentaje en peso, junto a las curvas de frecuencia acumulada.

A partir de las curvas de frecuencia se calcularon los parámetros de Imman (mediana y selección), siguiendo los procedimientos recomendados por Cas y Wright (1987).

iii. Separación de componentes según tipo (juveniles, líticos y cristales), utilizando lupa binocular, en los niveles anteriormente tamizados (hasta el tamaño 0.5 mm). Se obtuvieron porcentajes reales pesando cada porción separada.

iv. Separación de los componentes antes identificados según morfología propuesta por Pettijohn (1987). Se obtuvieron porcentajes reales pesando cada porción separada.

v. Descripción de cortes transparentes en el microscopio óptico realizados a 4 niveles del centro eruptivo Michacollo. Esto se realiza para poder determinar mineralogía, vesicularidad, porcentaje de cristales y morfología de los componentes.

vi. Descripción de corte transparente en el microscopio óptico de un bloque perteneciente a unidad post centro eruptivo Michacollo.

Para cumplir con el objetivo específico (iii) se analizó la información obtenida en los procedimientos anteriores y se comparó con la información bibliográfica recopilada acerca de las características de los depósitos piroclásticos freatomagmáticos.

Finalmente se realiza comparación entre ambos centros eruptivos estudiados.



### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 VULCANISMO HIDROMAGMÁTICO

Las erupciones hidromagmáticas son aquellas detonadas por el contacto entre magma en ascenso y agua externa subterránea o superficial (Wohletz y Sheridan, 1983; Fisher y Schmincke, 1984; Cas y Wright, 1987). A partir de estudios experimentales, Wohletz (1986) describió el proceso como una “interacción combustible-enfriante” (Fuel-Coolant Interaction), en el cual dos materiales, uno (combustible) con temperatura mayor al punto de ebullición del otro (enfriante), entran en contacto y permiten la transformación de energía térmica en energía cinética a escalas de tiempo menores a 1 milisegundo (Wohletz y Heiken, 1992; Morrissey, 2000).

En el caso de las erupciones freatomagmáticas, el combustible es el magma y el enfriante es el agua freática (Morrissey, 2000). La erupción ocurre por la expansión volumétrica violenta del agua externa al ser rápidamente calentada-vaporizada por el contacto con el magma. La expansión explosiva que conlleva un cambio en la energía cinética, en la energía potencial y en el volumen del sistema, resulta en un trabajo mecánico manifestado por la fragmentación del magma y de la roca encajonante, la excavación del cráter, la dispersión de tefra, perturbaciones acústicas-sísmicas, así como el enfriamiento abrupto del magma (Wohletz y Heiken, 1992; Pardo, 2008).

Los aparatos volcánicos más representativos de las erupciones freatomagmáticas son los maares, los cuales consisten en cráteres que excavan el suelo preeruptivo y depósitos que comprenden fragmentos juveniles, accesorios y accidentales, donde la mayor parte de los productos son transportados y acumulados por oleadas piroclásticas basales (Wohletz y Sheridan, 1983; Lorenz, 2007).

#### 3.2 CORRIENTES DE DENSIDAD PIROCLÁSTICAS

Una corriente de densidad piroclástica es una mezcla heterogénea de partículas volcánicas y gases que fluyen de acuerdo a su densidad en el fluido circundante (la atmósfera) debido a la gravedad terrestre y pueden ser originados por el colapso de una columna eruptiva, por *blast dirigidos*, o por avalanchas calientes derivados de domos de lava (Cas y Wright, 1987).

Las corrientes de alta concentración son denominados flujos piroclásticos, mientras que las corrientes diluidas, o de baja concentración, se denominan oleadas piroclásticas (Cas y Wright, 1987; Carey, 1991).

Las oleadas piroclásticas se definen como corrientes piroclásticas de densidad altamente expandidas, de baja concentración, que se mueven a altas velocidades bajo un régimen turbulento (Carey, 1991; Valentine y White, 2012). Pueden resultar de

erupciones freáticas, magmáticas o freatomagmáticas, lo que les confiere un amplio rango de variabilidad de temperatura, velocidad, concentración y cantidad de mezcla (Sheridan y Wohletz, 1983; Fisher y Schmincke, 1984). Son divididas en tres tipos: oleada basal, oleada de terreno y oleada de nube de ceniza (Cas y Wright, 1987). Al tratarse de mezcla de materiales de densidades contrastantes, las oleadas responden por segregación interna durante el transporte y, a medida que se alejan de la fuente, empiezan a estratificarse por densidad (Valentine, 1987).

Las oleadas piroclásticas basales (base surges) son generadas a partir de erupciones freatomagmáticas, por lo cual constituyen el centro de atención de la presente investigación. Consiste de una nube eruptiva que se expande radialmente en todas direcciones, desde la base de una columna eruptiva (Moore, 1967; Fisher y Waters, 1970).

Durante la formación de oleadas, el vapor es transportado junto con los piroclastos, de manera que la mayor parte del vapor puede segregarse dejando depósitos secos o puede condensarse durante el transporte y dar lugar a depósitos húmedos. De esta manera, las oleadas basales pueden ser húmedas o secas, de acuerdo con la cantidad de agua involucrada y la temperatura: las oleadas húmedas fluyen a temperaturas menores a los 100°C, por lo que el vapor de agua se condensa y las oleadas se forman como sistemas trifásicos, con gotas de agua líquida, partículas sólidas y gas. Las oleadas secas, por el contrario, fluyen a temperaturas mayores a los 100°C, por lo que son sistemas bifásicos que transportan partículas sólidas y gas. Se pueden formar durante erupciones freatomagmáticas con baja proporción agua/magma, o durante erupciones magmáticas (Wohletz, 1986).

Por lo general, los depósitos de oleadas húmedas presentan menor tamaño de grano, menor variación en el mismo y contienen capas individuales que son menos seleccionadas comparadas con los depósitos de oleadas secas. La gran variación en los conjuntos de capas y el tamaño de grano más grueso de oleadas secas han sido interpretados como resultado de la ausencia de agua y alta velocidad de emplazamiento con respecto a las oleadas húmedas (Carey, 1991).

### 3.3 MAAR

Los volcanes tipo Maar-Diatrema son, después de los conos de escoria, el segundo tipo de volcanes más comunes en continentes e islas (Schmincke, 2004), y se forman cuando el magma (independiente de su composición) asciende a través de un dique alimentador y entra en contacto con agua subterránea, generando una explosión súbita y violenta, debido a la fragmentación frágil del magma y la expansión del vapor de agua calentado (Zimanowski et al. 1997, Lorenz 2003).

Estos volcanes se caracterizan por (1) cráteres típicamente de 500-1500 m de diámetro, que están adosados bajo la superficie del terreno pre-eruptivo; (2) anillos de tefra de bajo perfil, compuestos por depósitos ricos en líticos emplazados a partir de corrientes de densidad piroclásticas, trayectorias balísticas y precipitación; y (3) por cuerpos con forma de embudo (diatremas) de roca de caja brechizada, depósitos piroclásticos (en parte debido al hundimiento de depósitos de anillo de tefra en el cráter) e intrusiones de hipabisales ( White y Ross , 2011; Cas y Wright, 1987) (figura 2).

Se supone que una barrera de presión hidrostática de aproximadamente 20 a 30 bares controla el nivel máximo de profundidad de la interacción magma/agua subterránea. Al igual que en los volcanes submarinos y subglaciales, se supone que las explosiones iniciales de vapor de agua formadoras de maar ocurren a poca profundidad y producen un maar pequeño con una diatrema poco profunda, pero debido a la disponibilidad limitada de agua subterránea y la expulsión de agua subterránea en forma de vapor, la barrera de presión de confinamiento se desplaza hacia abajo. Por consiguiente, las explosiones de vapor de agua pueden tener lugar en niveles consecutivos más profundos, con el resultado de que la diatrema penetre hacia abajo y crezca en tamaño. Dado que los maares son cráteres de colapso que resultan de la expulsión de bloques de pared fragmentados por explosiones de vapor de agua a nivel de la zona de la raíz de la diatrema, la penetración descendente de un diatrema no solo produce un aumento del tamaño de la diatrema sino también un aumento del tamaño del maar suprayacente (Lorenz, 1986).

Si la disponibilidad de agua subterránea es limitada, se llegará a un punto donde la falta de agua permitirá que el magma crezca dentro de la diatrema y forme un cono de escoria o un lago de lava dentro del maar (Lorenz, 1986).

Es así como el estudio de los volcanes tipo maar adquiere relevancia dado que proporcionan información del subsuelo al muestrear niveles profundos, en donde ocurre el encuentro de agua subterránea con el magma ascendente (Cano y Carrasco, 2008).

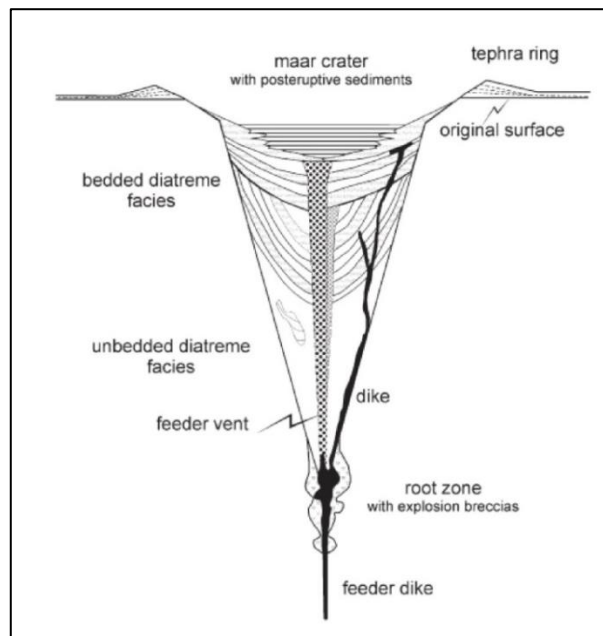


Figura 2. Diagrama esquemático de volcán tipo maar-diatrema (Lorenz, 2003).

#### 4. MARCO GEOLÓGICO

Existen diversos estudios geológicos sobre la zona, entre los que se encuentran los trabajos realizados por Wörner et al. (2000), Clavero et al. (2004), García et al. (2004), Hora et al. (2007), Jicha et al. (2015), Clavero et al. (2018), entre otros.

El área de estudio se enmarca en la Zona Volcánica Central de los Andes, en donde el volcanismo consiste casi en su totalidad de estratovolcanes y calderas silícicas de gran volumen (Wörner et al., 2000). En esta zona, el buzamiento de la placa litosférica subducida es relativamente pronunciada ( $\sim 30^\circ$ ) y la corteza alcanza un espesor cercano a los 70 km (Hora, 2007).

Debido al clima árido y la falta de erosión, la evidencia de volcanismo más antiguo no se ha borrado y, en consecuencia, la Zona Volcánica Central es un cinturón casi continuo de cientos de volcanes superpuestos y parcialmente superpuestos de diferentes tamaños, edad y duración eruptiva (González, 1995). En el área de estudio es posible encontrar numerosos centros volcánicos cuaternarios, entre los que se destacan el Complejo Volcánico Condoriri, Complejo Volcánico Larancagua, Volcán Quisiquisini, centros volcánicos Chucuyo y Caquena, Volcán Pomerape y finalmente Volcán Parinacota (Wörner et al., 2000; García et al., 2004), siendo este último uno de los volcanes más activos de la zona volcánica de los Andes Centrales durante el Holoceno (Clavero et al, 2004). Este intenso volcanismo del norte de Chile está relacionado con el proceso de subducción que empuja la placa oceánica de Nazca debajo de la placa de América del Sur (Stern, 2004).

El Maar de Michacollo y el Maar de Lliza se construyen en el margen occidental de la meseta andina (~4000 m) llamada Altiplano, en la XV Región de Arica y Parinacota, la cual se formó entre la Cordillera Oriental y Occidental durante la evolución del orógeno andino (0–27 Ma). Las rocas de la cordillera occidental varían en edad desde el precámbrico al Mioceno, donde la elevación de estas ocurrió por un sistema de empuje con vergencia al oeste durante el Mioceno (Wörner et al., 2000).

El basamento del maar Lliza se encuentra formado por secuencias volcanoclásticas, pertenecientes al Oligoceno Superior-Mioceno inferior, fuertemente deformadas conocida como la Formación Lupica, la cual está constituida principalmente por ignimbritas riolíticas soldadas, lavas andesíticas y areniscas epiclásticas (García et al., 2004) (figura 3).

El basamento del maar Michacollo se encuentra formado por secuencias volcanoclásticas y volcánicas principalmente andesíticas del Mioceno Medio. Incluye a un conjunto de rocas de edificios volcánicos, bien a medianamente conservados, y a remanente de estratovolcanes constituidos por lavas andesíticas a dacíticas (García et al., 2004) (figura 3).

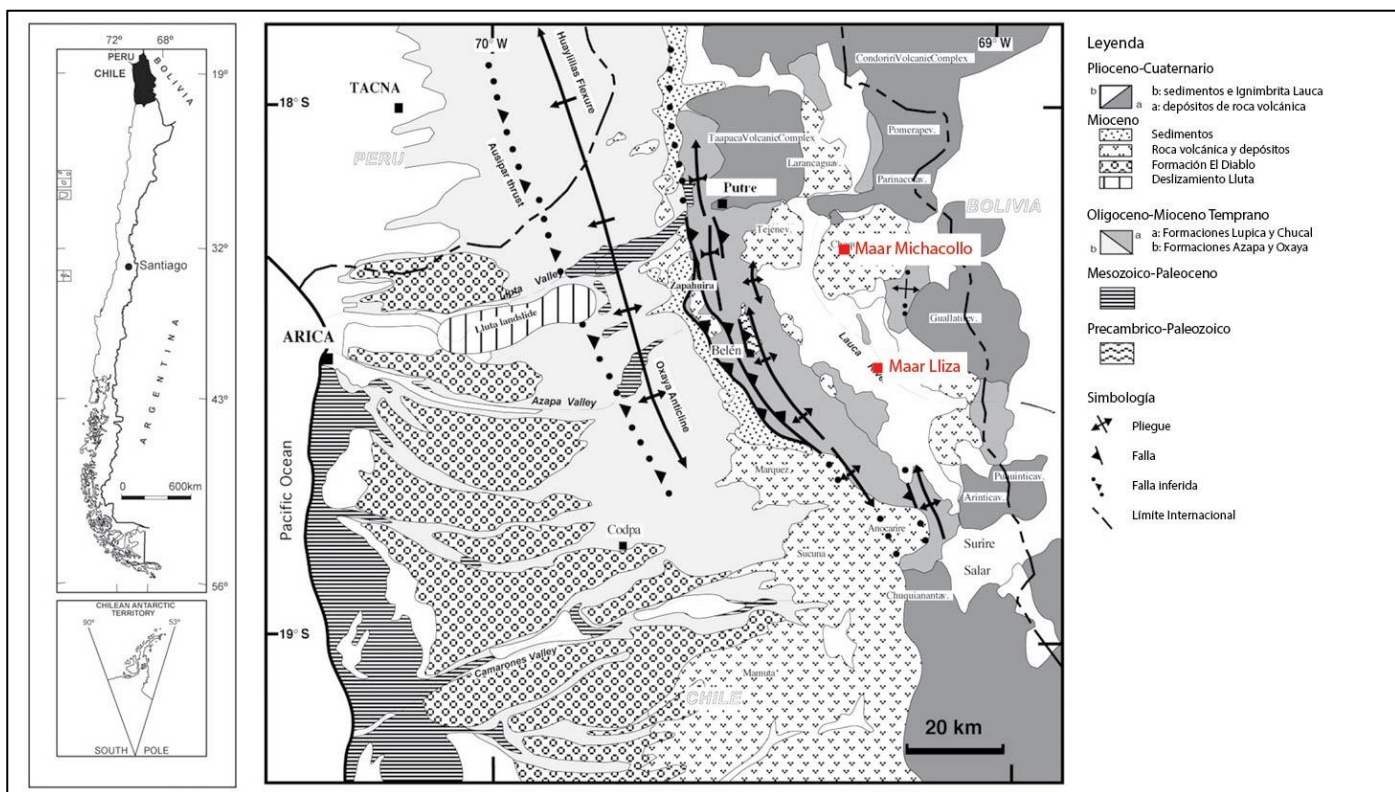


Figura 3. Mapa de ubicación de centros eruptivos Michacollo y Lliza en mapa geológico regional del norte de Chile (modificado de Clavero et al., 2004).

## 5. RESULTADOS

Como se mencionó anteriormente, los Maares de Michacollo y Lliza se ubican en la XV de Región de Arica y Parinacota, en la zona de la alta cordillera, específicamente en la localidad de Chucuyo y la localidad de Lliza, respectivamente.

La edad de emplazamiento de los centros volcánicos estudiados es Miocénica superior, cuyo basamento corresponde a secuencias volcánicas andesíticas y volcanoclásticas, en el caso del maar de Michacollo, y a secuencia de ignimbritas riolíticas, lavas andesíticas y areniscas epiclásticas, en el caso del maar de Lliza.

Los depósitos observados, corresponden a tobas volcánicas, las cuales se encuentran formadas por fragmentos juveniles y líticos.

En general, los afloramientos de los depósitos de ambos centros eruptivos se encuentran bien a medianamente conservados (figura 4 y figura 5), estando cubiertos en algunos sectores por suelo. La calidad de los afloramientos permite realizar estudios estratigráficos, sedimentológicos y petrográficos.

Los depósitos del maar de Michacollo alcanzan una extensión máxima de 200m, los cuales abarcarían un área aproximada de 30.000 m<sup>2</sup>, considerando que los depósitos poseen morfología circular.

La extensión de los depósitos del maar de Lliza no pudieron ser observados en terreno, dado la baja cantidad de puntos de control realizados. Aún así, más adelante en este informe, se entregará una extensión calculada aproximada dado el análisis de imágenes satelitales.



Figura 4. Vista en terreno de los depósitos del Maar de Michacollo



Figura 5. Vista en terreno de los depósitos del Maar de Lliza

## 5.1 ESTRATIGRAFÍA DE DEPÓSITOS ERUPTIVOS

El estudio detallado de la estratigrafía volcánica del Maar de Michacollo y del Maar de Lliza permitirá realizar reconstrucciones de los procesos físicos eruptivos que dieron origen a ambos depósitos freatomagmáticos, así como también permitirá entender las variaciones del estilo eruptivo y su evolución con el tiempo.

La descripción estratigráfica de los depósitos de ambos centros volcánicos se llevó a cabo desde base a techo. Los afloramientos fueron seleccionados con base a criterios de mejor exposición de los depósitos y accesos.

En el maar de Michacollo se realizaron columnas estratigráficas en tres puntos de observación (A, B, C). A la izquierda de la figura 6 se puede observar la ubicación satelital del centro eruptivo, y a la derecha, los puntos donde se realizaron las tres columnas estratigráficas.

En el maar de Lliza, se levantaron columnas estratigráficas en dos puntos (A, B) separados entre sí por una distancia de 500 m. A la izquierda de la figura 7 se puede observar la ubicación satelital del centro eruptivo, y a la derecha, los puntos donde se realizaron las dos columnas estratigráficas.

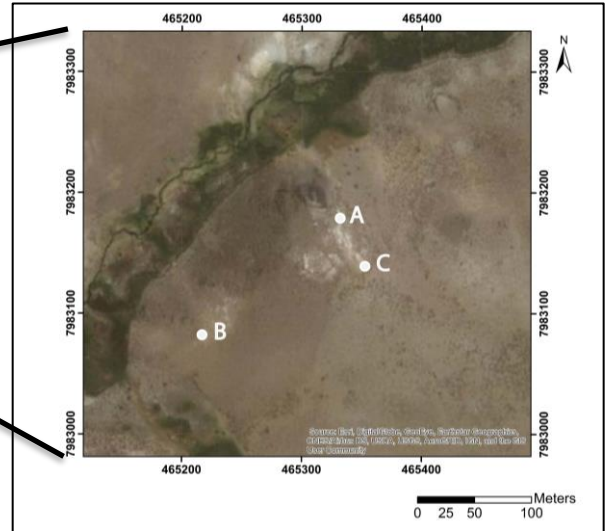
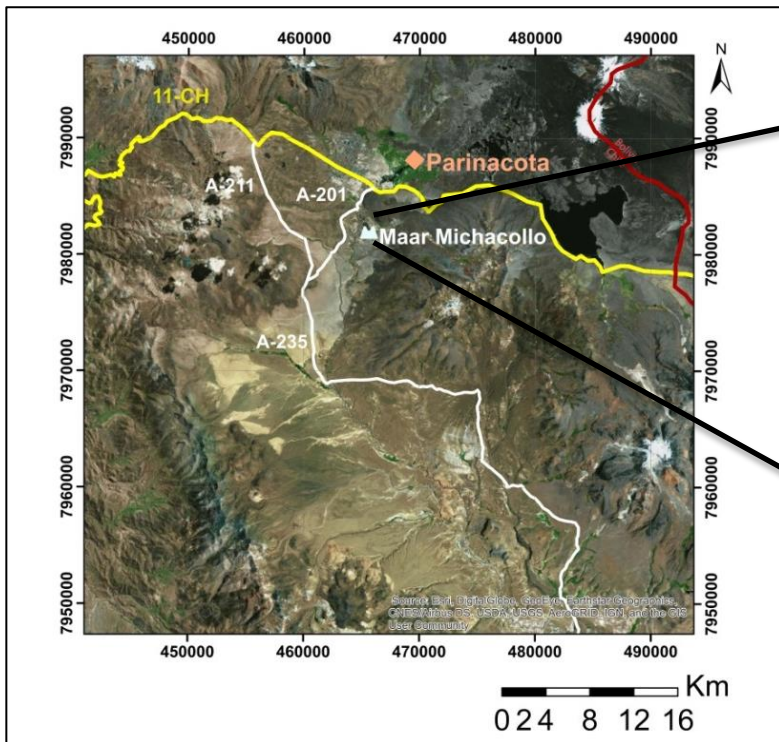


Figura 6. A la izquierda: ubicación centro eruptivo Michacollo. A la derecha: A, B, C representan los puntos de levantamiento de columnas estratigráficas.

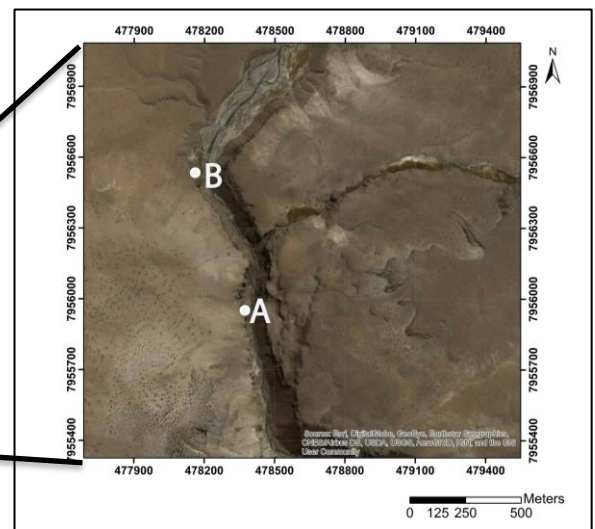
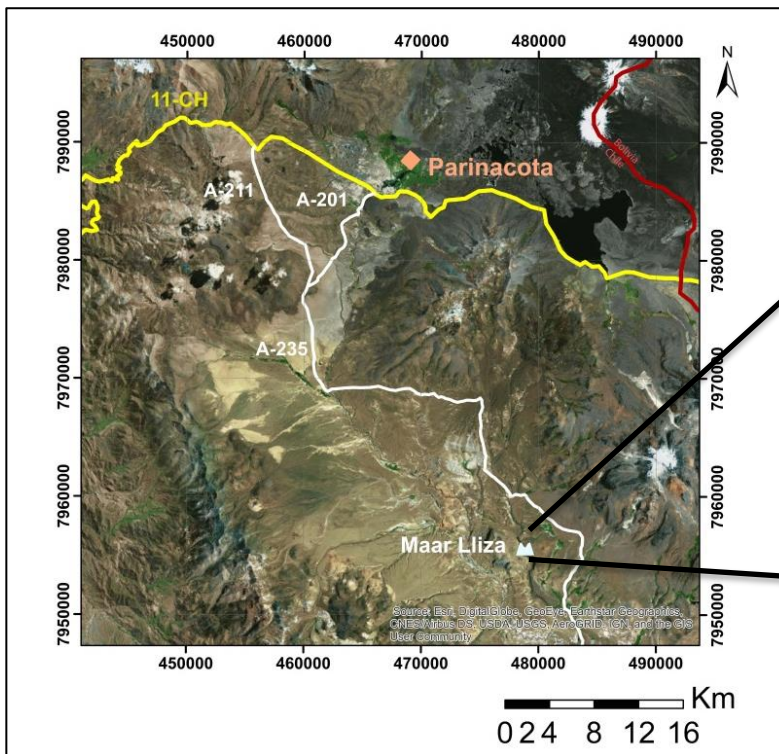


Figura 7. A la izquierda: ubicación centro eruptivo Lliza. A la derecha: A, B representan los puntos donde se realizó el levantamiento de las columnas estratigráficas.



### 5.1.1 Centro eruptivo Michacollo

En terreno, además de la descripción de la secuencia estratigráfica del maar, se realizaron mediciones de rumbo y manteos de las capas de los depósitos, lo cual permitió definir la morfología de estos y la probable ubicación del cráter del maar. Dado lo anterior, se presentará en primer lugar estas mediciones, ya que permitirá dilucidar de mejor manera la ubicación estratigráfica de los depósitos.

Las mediciones arrojaron manteos que van desde los 20° a los 45°, cuyas orientaciones varían, pero siempre apuntan hacia un centro común (el eventual cráter del maar).

En la figura 8 se graficaron los rumbos y manteos de los afloramientos, donde se aprecia como el rumbo de estos se curva, formando un depósito que, vistos desde altura, pareciera tener distribución radial, los cuales convergen hacia un centro común, el cual correspondería a el cráter del maar.

Como se mencionó anteriormente, los depósitos cubren un área aproximada de 30.000 m<sup>2</sup>, en cuyo centro se encontraría el eventual cráter del maar (figura 9). Por lo tanto, los tres puntos de control (A, B, C) se encuentran próximos al cráter, estando este de 50 a 100 m de distancia, donde A y C se ubicarían en los depósitos orientales y B, en los depósitos occidentales.

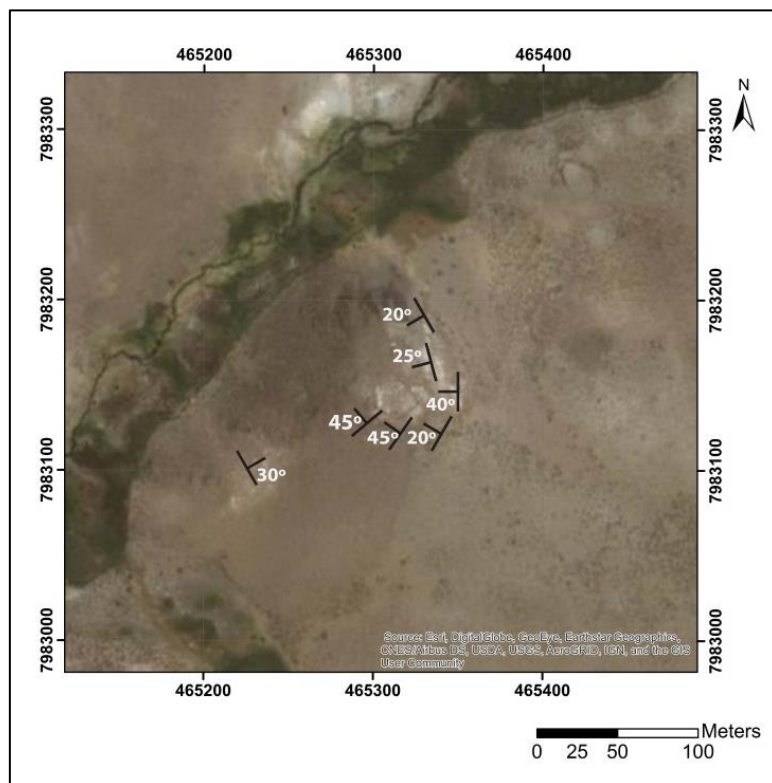


Figura 8. Imagen satelital del área de estudio, con rumbos y manteos medidos en centro eruptivo Michacollo.

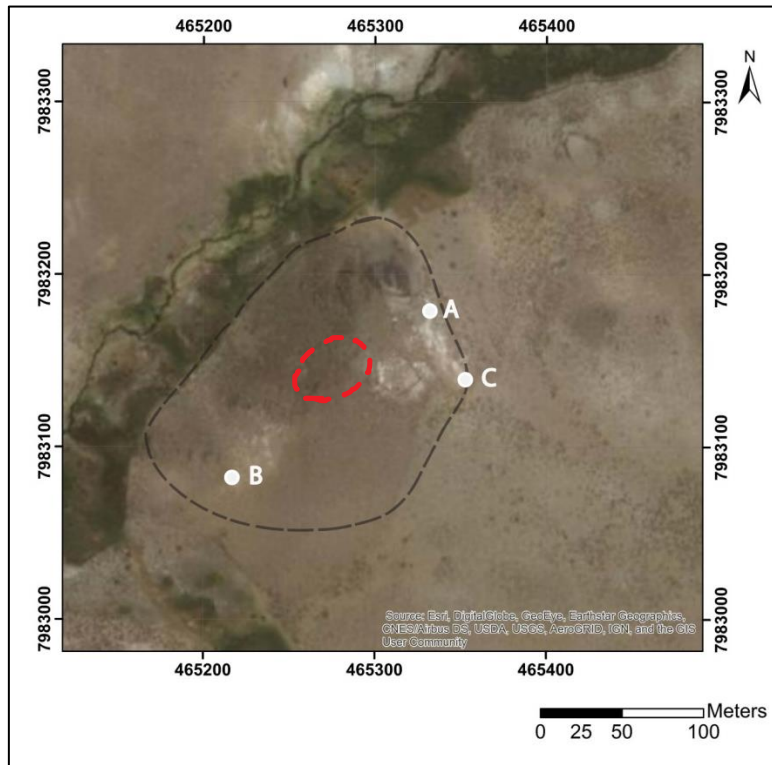


Figura 9. Imagen satelital del área de estudio, en donde con línea punteada negra se delimita la extensión probable de los depósitos del centro eruptivo Michacollo. Con línea punteada roja se delimita el eventual cráter. A, B, C: puntos donde se realizó el levantamiento de columnas estratigráficas.

En la figura 10 se grafican los tres perfiles estratigráficos, con la respectiva correlación entre ellos. A continuación, en la figura 11, se presenta la columna estratigráfica integrada, en la cual se definen 10 niveles. Estos niveles fueron definidos en base a las intercalaciones de subniveles, granulometría, estructuras y espesores de capas.

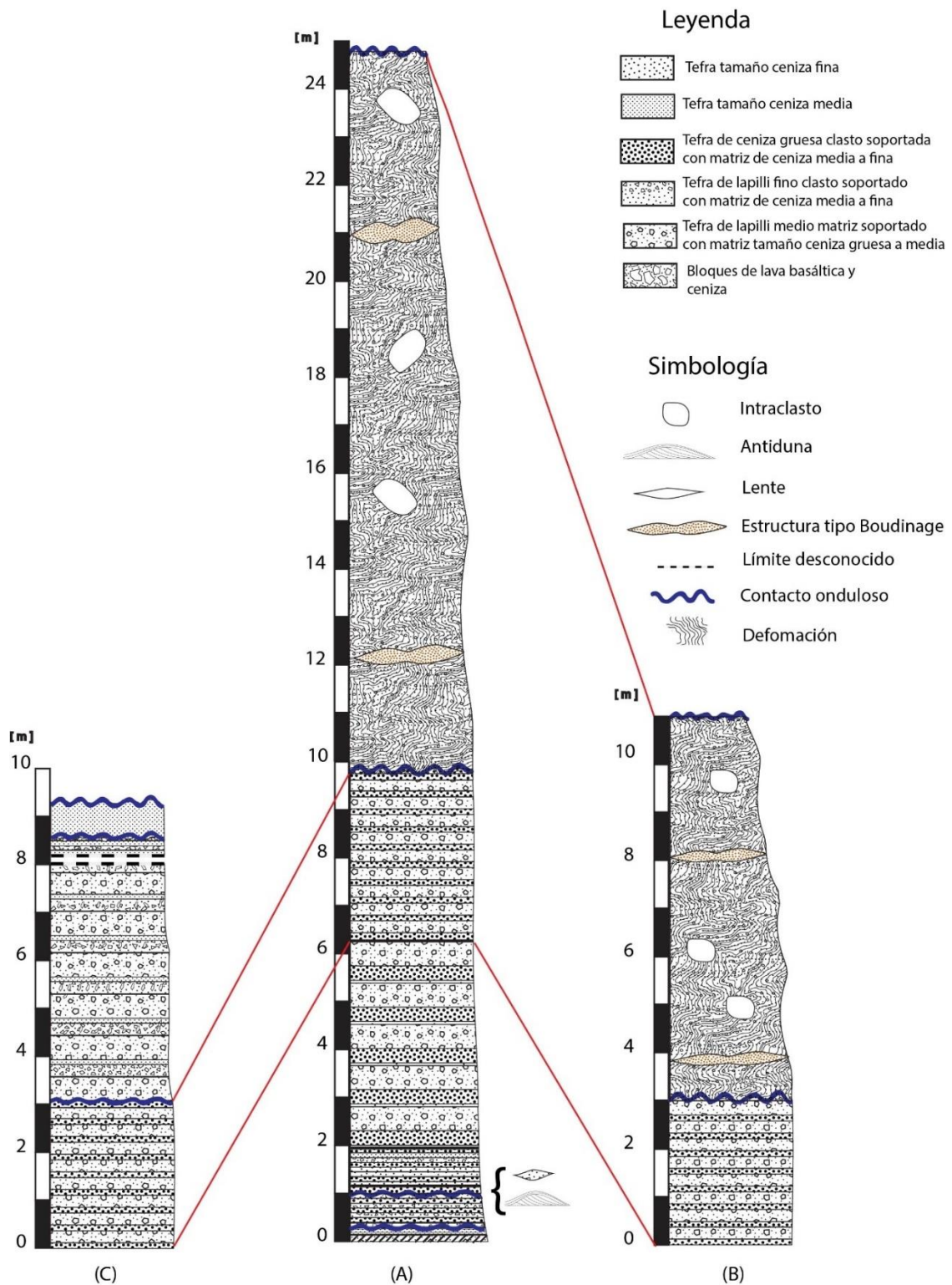


Figura 10. Correlación perfiles estratigráficos centro eruptivo Michacollo. A-C: cara oriental; B: cara occidental.

Al relacionar las tres columnas presentadas en la figura 10 se pudo determinar que el depósito posee un espesor mínimo total de 30.8 m, donde se pudieron definir diez niveles.

Sobre el depósito que conforma el centro eruptivo Michacollo, se reconoce un depósito volcánico diferente, post centro eruptivo, el cual corresponde a un depósito de flujo piroclástico de tipo bloques y ceniza.

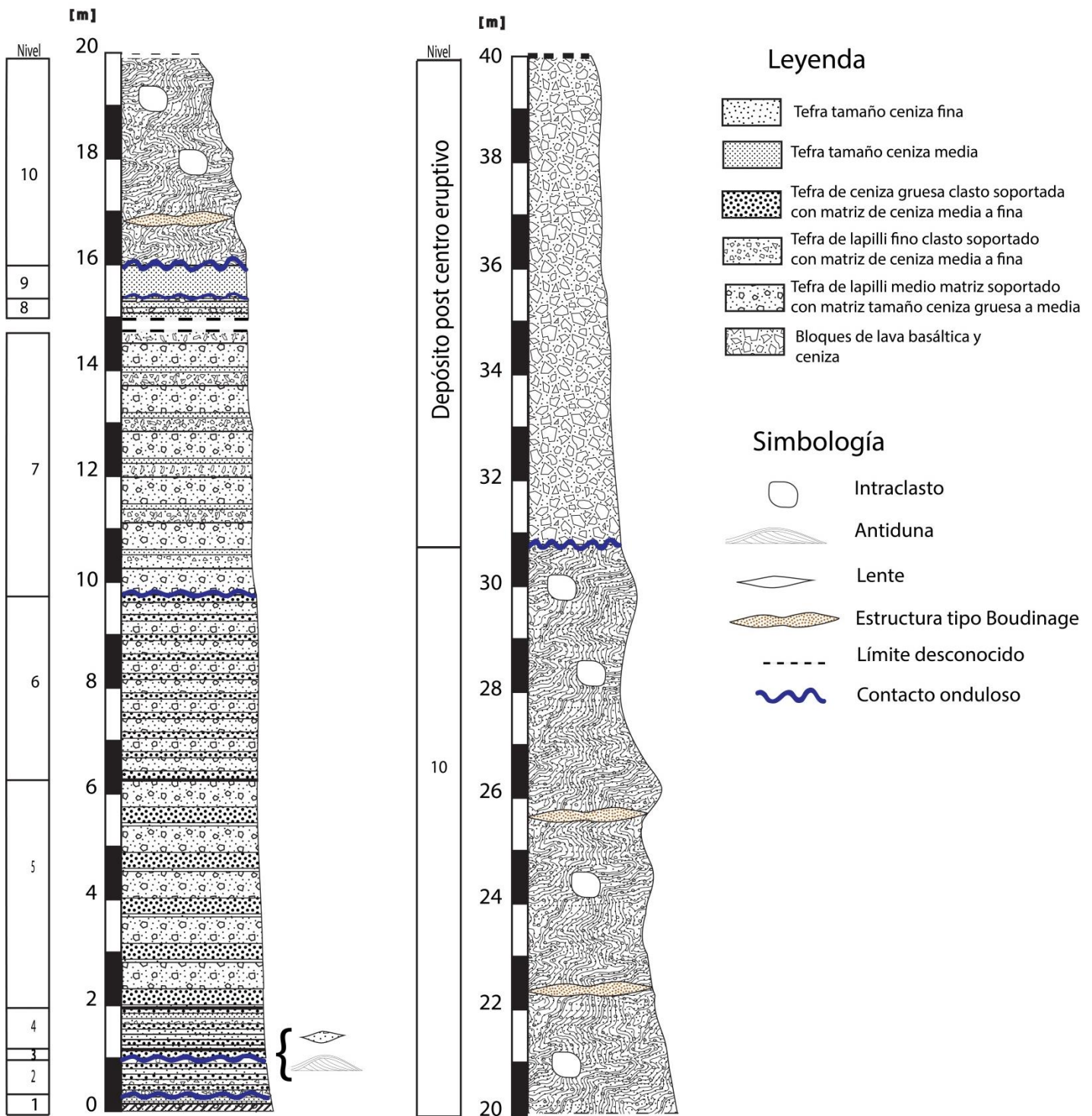


Figura 11. Columna estratigráfica generalizada, Maar Michacollo.

A continuación, se describen los diez niveles del depósito desde base a techo.

- **Nivel 1:** Base del depósito, color gris blanquecino, de consolidación media y espesor total de 30 cm. El nivel se divide en dos zonas, una inferior con laminación cruzada con franjas de espesor de 1 a 1.5 cm; y la superior, con laminación paralela con franjas de espesores milimétricos (figura 12).

El nivel posee contacto inferior desconocido y superior ondulado (figura 13).

En la zona de laminación cruzada, con espesor total de 22 cm, se distingue la intercalación de 2 franjas de distinta granulometría:

i. Espesor de 1 a 1.5 cm, clastosoportado, con fragmentos mayores (70%) tamaño lapilli fino a medio, de pómez (25%) y líticos volcánicos (45%) grises y rojizos. Tanto pómez como líticos poseen forma subangular a subredondeado y de alta esfericidad. La matriz (30%) es de tamaño ceniza gruesa, compuesta por líticos similares a fragmentos mayores (15%), cuarzo (10%) y biotita (5%).

ii. Espesor de 1 a 1.5 cm, matriz soportado, con fragmentos mayores (25%) tamaño ceniza gruesa, de líticos (10%) rojizos subangular y de alta esfericidad, cuarzo (10%) y biotita (5%). La matriz es de ceniza fina (75%).

En la zona con laminación paralela (figura 10), se observa solo una franja con espesor de 8 cm, matriz soportado, con fragmentos mayores (20%) tamaño ceniza gruesa, de líticos afaníticos (10%) subangulares y de alta esfericidad, cristales de cuarzo (5%) y biotita (5%). La matriz (80%) es de tamaño ceniza fina

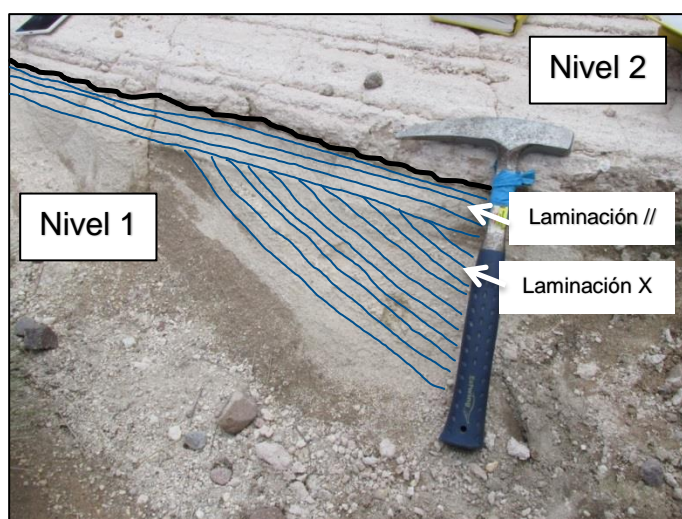


Figura 12. Nivel 1, centro eruptivo Michacolco. En la imagen se distingue zona inferior con laminación cruzada y zona superior con laminación paralela. Contacto superior ondulado con Nivel 2.

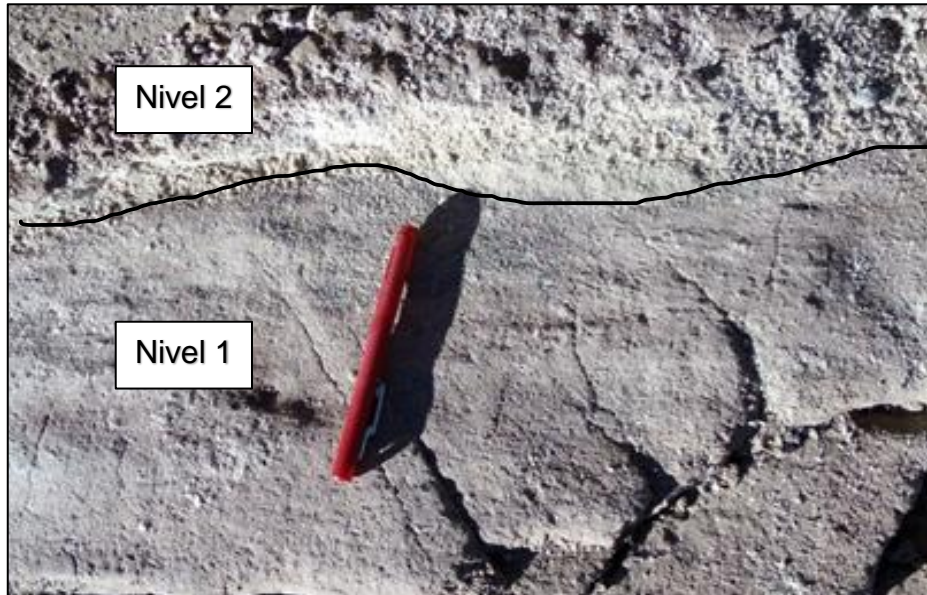


Figura 13. Nivel 1, centro eruptivo Michacollo. Contacto superior ondulado con Nivel 2.

- **Nivel 2:** color gris-blanquecino y marrón, consolidación media y espesor de 70 cm. Se distingue laminación paralela muy marcada, con espesor variable de 1-3 cm. Posee contacto superior e inferior ondulado. Se observa la intercalación de dos franjas de distinta granulometría (figura 14):
  - i. Espesor de 1 a 3 cm, clastosoportado, con fragmentos mayores (60%) tamaño lapilli fino de pómez (40%) y líticos afaníticos (20%) rojizos y negruzcos. Tanto pómez como líticos poseen forma subangular y de alta esfericidad. La matriz (40%) es de tamaño ceniza gruesa, formada por líticos (20%) subangulares y de alta esfericidad, similares a fragmentos mayores, pómez (15%) y cristales de cuarzo (5%).
  - ii. Espesor de 1 a 3 cm, matriz-soportado, con fragmentos mayores (30%) de tamaño ceniza gruesa, de pómez (15%), líticos negruzcos (10%) y cristales de cuarzo (5%). Tanto pómez como líticos poseen forma subangular y de alta esfericidad. La matriz (70%) es de ceniza fina.

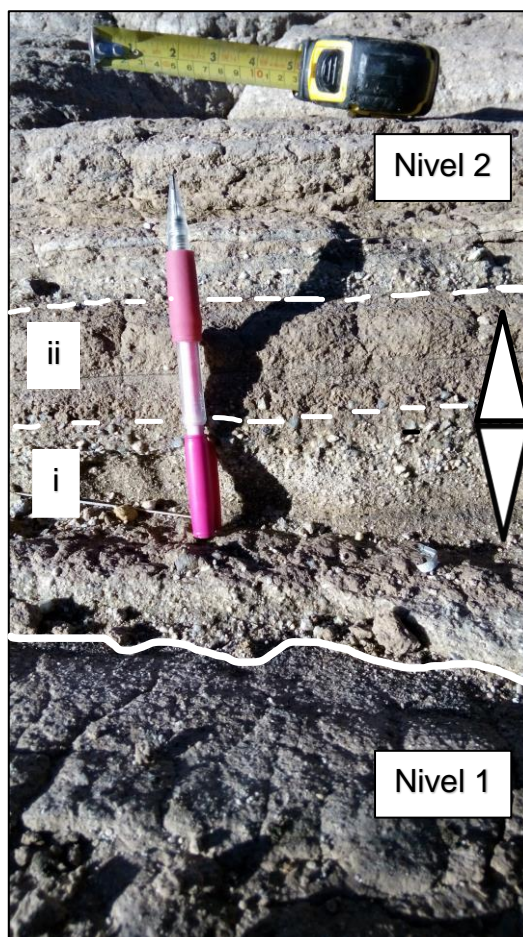


Figura 14. Nivel 2, centro eruptivo Michacollo. Con línea continua se delimita el contacto inferior ondulado con Nivel 1 y con línea punteada, los subniveles i y ii.

- **Nivel 3:** color marrón grisáceo, consolidación media y espesor de 10 cm. No se observa laminación. Posee contacto inferior ondulado y superior recto (figura 15).

En el techo del nivel, se observa una antiduna (figura 15), cuyo limbo oriental tiene un rumbo y manteo de  $N43^{\circ}E/19^{\circ}SO$  y el limbo occidental,  $NS/22^{\circ}O$ . La antiduna se extiende lateralmente por 60 cm y alcanza una altura máxima de 8 cm.

A 10 cm desde el extremo occidental de la antiduna se observa un lente pumiceo, con un espesor máximo de 4 cm y extensión lateral de 10 cm, con tamaño de grano lapilli fino. Las pómez que conforman el lente son grisáceas, redondeadas y subesféricas, poco fibrosas.

El nivel se caracteriza por ser matriz soportado, en donde sus fragmentos mayores (35%) son de tamaño ceniza gruesa a media. Se distinguen dos tipos de líticos volcánicos afaníticos (20%), unos negruzcos y otros rojizos, además de pómez fibrosas (15%). Tanto líticos como pómez son angulares a subangulares y de alta esfericidad. La matriz (65%) es de ceniza fina.

- **Nivel 4:** color marrón-grisáceo, consolidación media y espesor de 80 cm. Se observa laminación paralela muy marcada, cuyos espesores varía de 0.5 a 5 cm. Los contactos superior y basal son rectos.

Se observa intercalación de tres franjas de distinta granulometría (figura 15):

i. Espesor de 2.5 cm, clastosoportado con fragmentos mayores (60%) de tamaño lapilli fino, de pómez angular a subangular y de alta esfericidad. La matriz (40%) es de tamaño ceniza gruesa, y está formada por pómez (35%) angular a subangular y cristales de cuarzo (5%).

ii. Espesor varía de 2 a 5 cm, matriz soportada con fragmentos mayores (35%) tamaño ceniza gruesa a media de pómez angular a subangular y de alta esfericidad. La matriz (65%) es de tamaño ceniza media y está formada por pómez (60%) angular a subangular y de alta esfericidad, y cristales de cuarzo (5%).

iii. Espesor varía de 0.5 a 1 cm. La franja está compuesta en su totalidad por ceniza fina de color grisácea.



Figura 15. Contacto concordante entre Nivel 3 y Nivel 4, centro eruptivo Michacollo. En el techo del Nivel 3 se distingue una antiduna.



- **Nivel 5:** color gris-blanquecino con intercalaciones de capas rojizas, consolidación media baja y espesor de 4.4 m. Se observa laminación paralela muy marcada de espesores que van desde 8 a 50 cm. Tanto contacto superior como basal son rectos.

Se distingue intercalación de tres franjas de distinta granulometría (figura 16):

i. Espesor varía de 8-50 cm, clastosoportado con fragmentos mayores (55%) tamaño lapilli medio a fino, de líticos (30%) afaníticos grises, pómez (20%) blanquecina, ambos subredondeados y subsféricos, y fragmentos densos de vidrio (5%) incoloro bandeado. La matriz (45%) es de tamaño ceniza media y está compuesta de líticos (35%) grises, angulares a subangulares y de alta esfericidad, cristales de cuarzo (5%) y biotita (5%).

ii. Espesor de franja varía de 10-30 cm, clastosoportado con fragmentos mayores (50%) tamaño ceniza gruesa a media, de líticos afaníticos (40%) negruzcos, angulares a subangulares y de alta esfericidad, y cuarzos incoloros (10%). La matriz (50%) es de tamaño ceniza fina.

iii. Espesor varía de 1 a 8 cm. La franja está compuesta en su totalidad por ceniza fina de color blanquecina grisácea



Figura 16. Nivel 5, centro eruptivo Michacollo

- **Nivel 6:** color gris blanquecino, consolidación media y espesor de 3.5 m. Se observa laminación paralela muy marcada, de espesor que varía de 0.5 a 25 cm, y grietas de reajuste. Se observa contacto basal recto y superior discordante.

Se reconoce intercalación de dos franjas de distinta granulometría (figura 17):

- Espesor de franja varía de 5-25 cm, clastosoportado, con fragmentos mayores (60%) de tamaño lapilli medio, de pómez no fibrosas (40%), líticos afaníticos (15%), ambos subangulares y de alta esfericidad, y vidrio (5%) con fracturamiento perlítico. La matriz (40%) es de tamaño ceniza gruesa, y está compuesta de líticos (37%) similares a fragmentos mayores y vidrio (3%).
- Espesor varía de 0.5-12 cm, matriz soportado, con fragmentos mayores (30%) de tamaño ceniza gruesa, de líticos afaníticos (15%) negruzcos y pómez (15%), ambos subangulares y de esfericidad media. La matriz (70%) es rojiza, tamaño ceniza media, en donde se distinguen pómez poco fibrosas (45%), líticos (20%) similares a fragmentos mayores y cristales de biotita (5%).

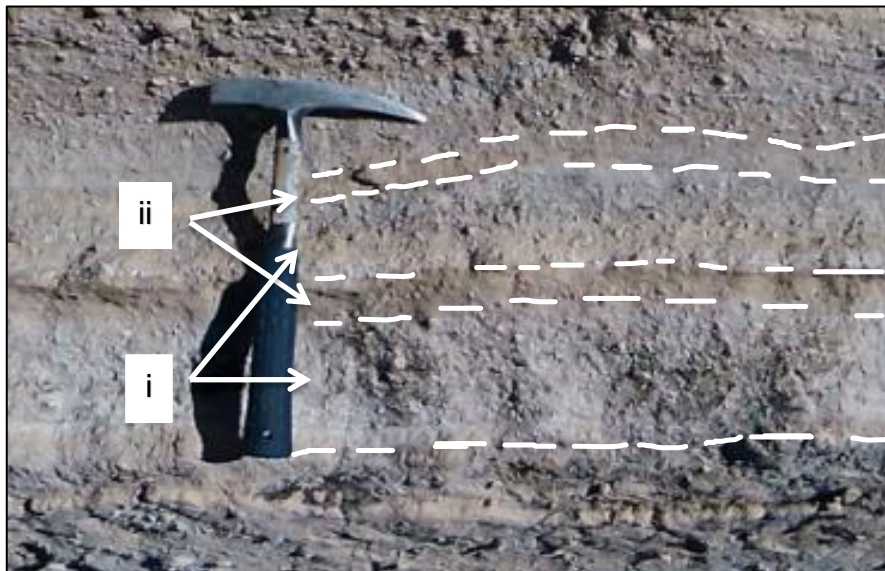


Figura 17. Nivel 6, centro eruptivo Michacollo. Con línea punteada se diferencian subniveles i y ii.

- **Nivel 7:** color gris-blanquesino, consolidación media y con espesor estimado mínimo de 5 m. No se observa contacto superior, ya que se encuentran tapados por regolito. Contacto basal discordante.

Se distingue intercalación de tres franjas con distinta granulometría (figura 18):

i. Espesor de franja varía de 30-80 cm, clastosoportado, con fragmentos mayores (65%) tamaño lapilli grueso, de pómez poco fibrosas (40%), líticos afaníticos (20%) negruzcos y rojizos, ambos subangulares y de esfericidad media, y cristales de cuarzo (5%). La matriz (35%) es de tamaño ceniza media, y está conformada por líticos similares a fragmentos mayores (25%), cristales de cuarzo (5%) y biotita (5%).

ii. Espesor varía de 18-30 cm, clastosoportado, con fragmentos mayores (55%) tamaño lapilli fino-ceniza gruesa, de pómez poco fibrosas (40%) y líticos afaníticos rojizos (15%), ambos subangulares y de esfericidad media. La matriz (45%) es tamaño ceniza media, y está conformada por pómez (30%), cristales de cuarzo (5%), biotita (5%) y plagioclasa (5%).

iii. Espesor de franja varía de 1.5 a 8 cm, matriz-soportado, con fragmentos mayores (25%) tamaño ceniza media, de pómez (12%) poco fibrosas, líticos afaníticos grises rojizos (8%), ambos subangulares y de esfericidad media, cristales de biotita (3%) y plagioclasa (2%). La matriz (75%) es de tamaño ceniza fina (figura 16).

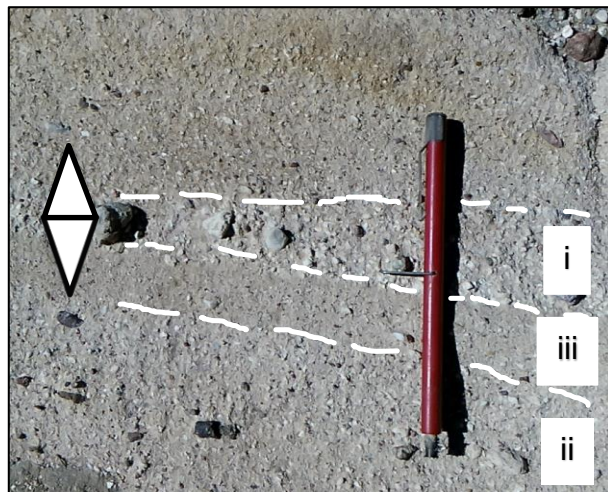


Figura 18. Nivel 7, centro eruptivo Michacollo. Con línea punteada se diferencian subniveles i, ii y iii.

- **Nivel 8:** color grisáceo, consolidación media y espesor estimado mínimo de 40 cm. No se observa el contacto basal, ya que se encuentra tapado por regolito. El contacto superior es ondulado.

Se distingue la intercalación de dos franjas de distinta granulometría (figura 19):

- i. Espesor de la franja es de 10 cm, clastosoportado, con fragmentos mayores (70%) tamaño lapilli medio, de líticos afaníticos rojizos (30%), grises (20%), negruzcos (15%), todos angulares a subangulares y de baja esfericidad, y cristales de cuarzo (5%). La matriz (30%) es de tamaño ceniza media y está conformada por fragmentos de pómez (25%), cristales de biotita (3%) y plagioclasa (2%).
  - ii. Espesor de 10 cm, matriz-soportado, con fragmentos mayores (20%) tamaño ceniza media, de líticos afaníticos gris oscuro (8%), pómez (5%), ambos subangulares y subesféricos, y cristales de cuarzo (4%), biotita (2%) y anfíbol (1%). La matriz (80%) es de tamaño ceniza fina.
- **Nivel 9:** color gris, consolidación media y espesor de 60 cm. No se distingue laminación ni otras estructuras. Se observa contacto basal erosivo y superior discordante (figura 19).

El nivel está conformado por fragmentos mayores (25%) tamaño ceniza media, de pómez (10%), líticos afaníticos grises (5%), ambos subangulares y de esfericidad media, y cristales de cuarzo (5%), biotita (3%) y anfíbol (2%). La matriz (75%) es de tamaño ceniza fina.

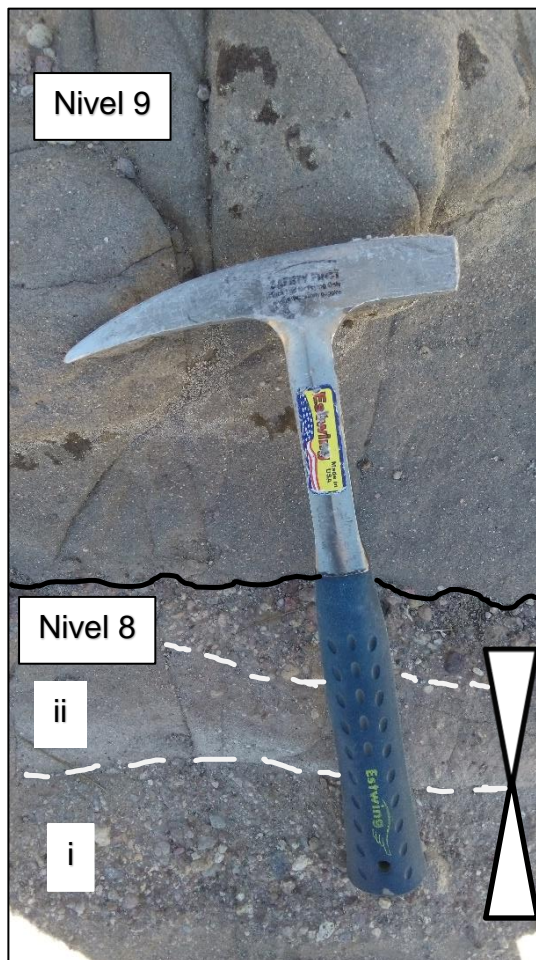


Figura 19. Con línea negra se demarca el contacto ondulado entre niveles 8 y 9, centro eruptivo Michacolco. Con línea punteada blanca se delimita subniveles i y ii.

- **Nivel 10:** color gris, consolidación media-alta y espesor de 15 m. Nivel muy deformado en donde se observan capas con laminación paralela y cruzada, boudinage (figura 20), fracturas de reacomodo y en echelon (figura 21), capas plegadas (figura 22) e intraclastos. Se tiene contacto basal y superior discordante. El nivel se encuentra subyaciendo a un depósito de flujo piroclástico de tipo bloques y ceniza (post centro eruptivo), del cual se desconoce su procedencia.

Dada la deformación que presenta, distinguir entre capas de distinta granulometría es difícil, por lo cual se realizó una descripción general de las capas apreciadas:

- i. Capa clastosoportada, con fragmentos mayores (55%) de tamaño lapilli fino a media, conformados por líticos afaníticos grises (30%), pómez blanquecina poco fibrosa (20%), vidrio con fracturamiento perlítico (3%) y juveniles (2%) de bordes irregulares (figura 23). La matriz (45%) es de tamaño ceniza media con una porción de ceniza fina (20%), en donde se observa pómez (10%), líticos similares a fragmentos mayores (10%) y vidrio (5%).

- ii. Capa matriz soportada, con fragmentos mayores (30%) tamaño ceniza gruesa, conformados por pómez poco fibrosas (20%) y juveniles densos (10%). La matriz (70%) es de tamaño ceniza fina.
  
- iii. Capa matriz soportada, con fragmentos mayores (12%) tamaño ceniza media. Se observan cristales de biotita (5%), plagioclasas (5%) y juveniles densos (2%). La matriz (88%) es de tamaño ceniza fina.



Figura 20. Boudinage c.e. Michacollo



Figura 21. Fracturas en echelon, c.e. Michacollo



Figura 22. A la izquierda: encerrado en un polígono rojo, juvenil de bordes irregulares. A la derecha: capas plegadas Nivel 10 de los depósitos del centro eruptivo Michacollo.

### 5.1.2 Depósito post centro eruptivo Michacollo

Sobreyaciendo a los depósitos del centro eruptivo Michacollo (figura 23), se reconoce un depósito de color gris-negruzco, de muy alta consolidación, espesor mínimo de 20 m, sin estructuras observables, monomítico y clasto soportado. Los clastos (75%) son de tamaño bloque (de 20 cm a 1.5 m aproximadamente), angulosos a subangulosos, y se caracterizan por presentar fracturas concéntricas (figura 24), los cuales se denominan *Prismatically Jointed Blocks* (PJB). Los clastos presentan fenocristales de plagioclasa (35%), con tamaños de 2-4 mm, y olivino (2%), tamaño máximo de 1 mm, inmersos en una masa fundamental oscura (63%) afanítica. La matriz (25%) es de tamaño lapilli fino a ceniza gruesa, en donde se distinguen clastos similares a los descritos anteriormente (10%), plagioclasa (5%) subhedral e incolora y una porción de ceniza fina (10%). Dada las características del depósito, se define como un flujo piroclástico de tipo bloque y ceniza.

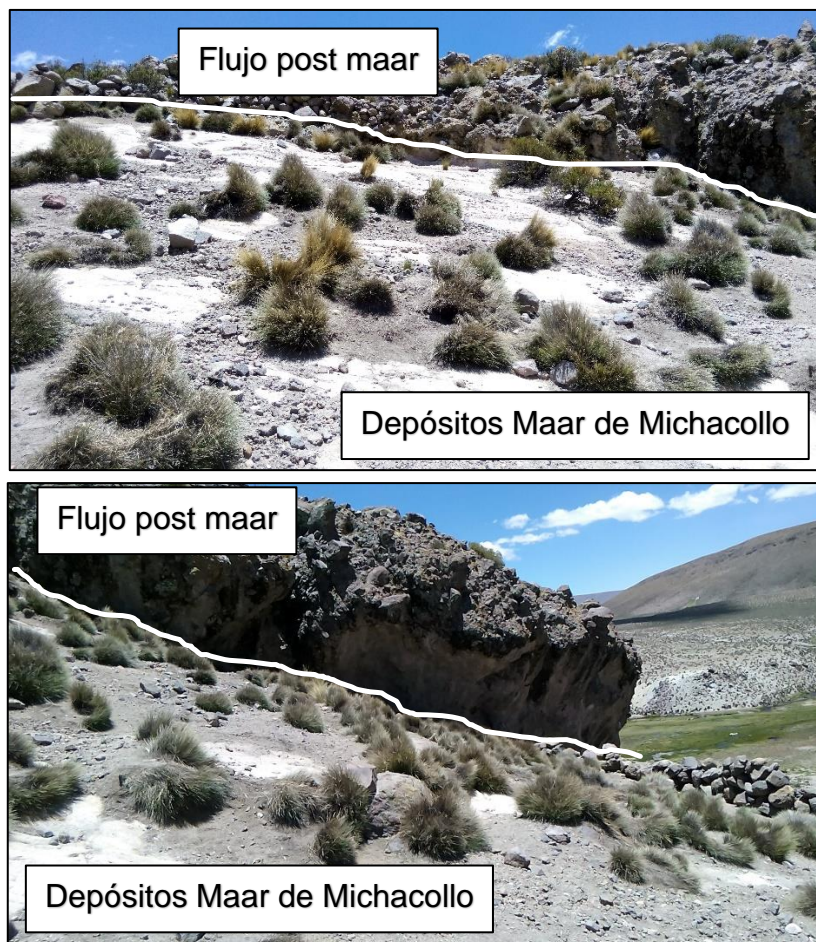


Figura 23. Vista del depósito de flujo piroclástico de tipo bloque y ceniza sobreyaciendo a depósitos del centro eruptivo Michacollo



Figura 24. Bloques con diaclasas prismáticas o PJB. Líneas blancas demarcan las trazas de las fracturas concéntricas

### 5.1.3 Centro eruptivo Lliza

Al igual que en el maar de Michacollo, en terreno, además de la descripción de la secuencia estratigráfica del maar de Lliza, se realizaron mediciones de rumbo y manteos de las capas de los depósitos, lo cual permitió definir la morfología de los depósitos y la probable ubicación del cráter del maar. Estas mediciones arrojaron manteos que van desde 1° a 2° hacia el oeste (figura 25). Dada las pocas mediciones realizadas, no se aprecia la curvatura que se esperaría tener en los rumbos de los depósitos.



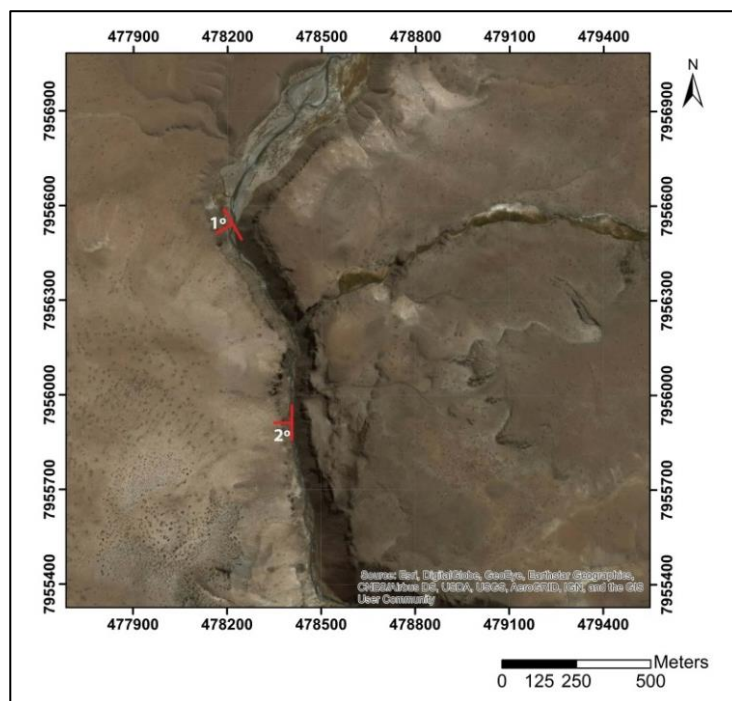
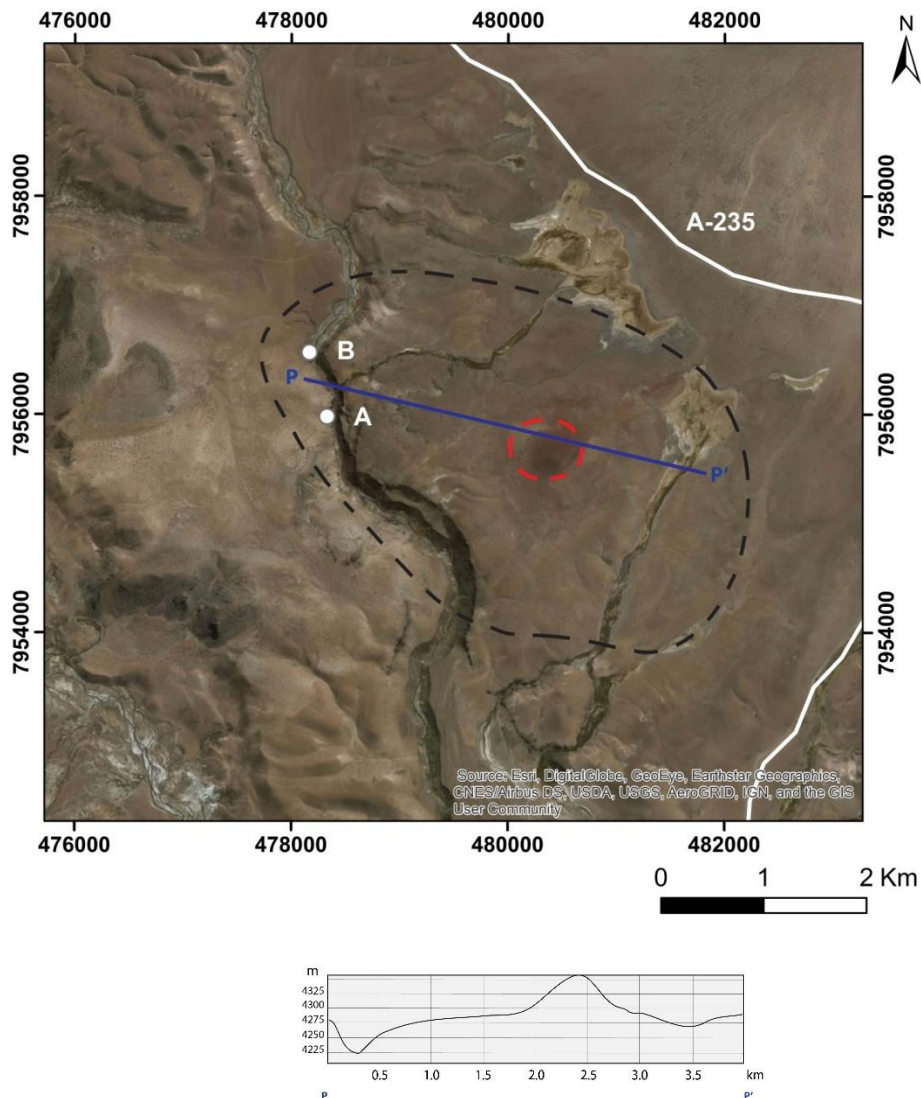


Figura 25. Imagen satelital de área de estudio, con los rumbos y manteos de los depósitos del centro eruptivo Liza.

Al analizar imágenes satelitales se pudo apreciar que hacia el oriente de los depósitos estudiados se encuentra lo que se cree es un cono de escoria. Al confeccionar perfiles de elevación, se observa claramente que la morfología concuerda con lo pensado, y dado por lo que se sabe de los maares, es bastante probable que hacia el final del volcanismo freatomagmático se haya tenido una etapa netamente magmática que permitió la formación de un cono. Es así como se proyecta el cráter del maar hacia esa zona (figura 26).

Se estima la extensión de los depósitos en 4 km, considerando que los depósitos vistos en terreno formarían parte de facies distales de los anillos de tefra del maar. Estos presentarían distribución radial, considerando la proyección desde el supuesto cráter (figura 26).



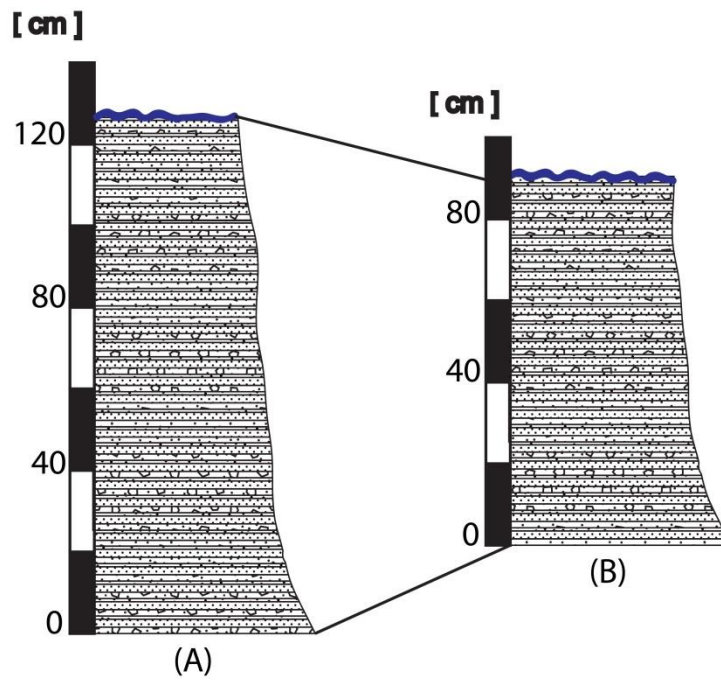
**Figura 26. Imagen satelital, centro eruptivo Lliza. Con línea negra punteada se delimita la extensión de los depósitos. Con línea punteada roja se delimita el cráter del maar. Se realiza perfil en P-P', el cual considera depósitos del maar, lava AA y cono de escoria.**

Los depósitos estudiados del centro eruptivo Lliza se encuentran bien conservados, con un grado de erosión leve. Están conformados principalmente por juveniles, líticos y cristales.

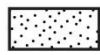
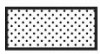

Sobre los depósitos que conforman el centro eruptivo Lliza, se reconocieron lavas de tipo AA de espesor mínimo observado de 120cm, y sobre estas, un domo de tipo riolítico de espesor desconocido.

En la figura 27 se ilustran los dos perfiles estratigráficos realizados en terreno, con la respectiva correlación entre ellos. A continuación, en la figura 28, se presenta la columna estratigráfica general.

Al correlacionar las dos columnas, se pudo determinar que el depósito posee un espesor mínimo total de 1.3m, distinguiéndose solo un nivel.



### Leyenda

-  Tefra tamaño ceniza fina
-  Tefra tamaño ceniza media
-  Tefra de lapilli medio matriz soportado con matriz tamaño ceniza gruesa a media

### Simbología


-  Contacto onduloso
-  Límite desconocido

Figura 27. Perfiles estratigráficos A y B, centro eruptivo Lliza.

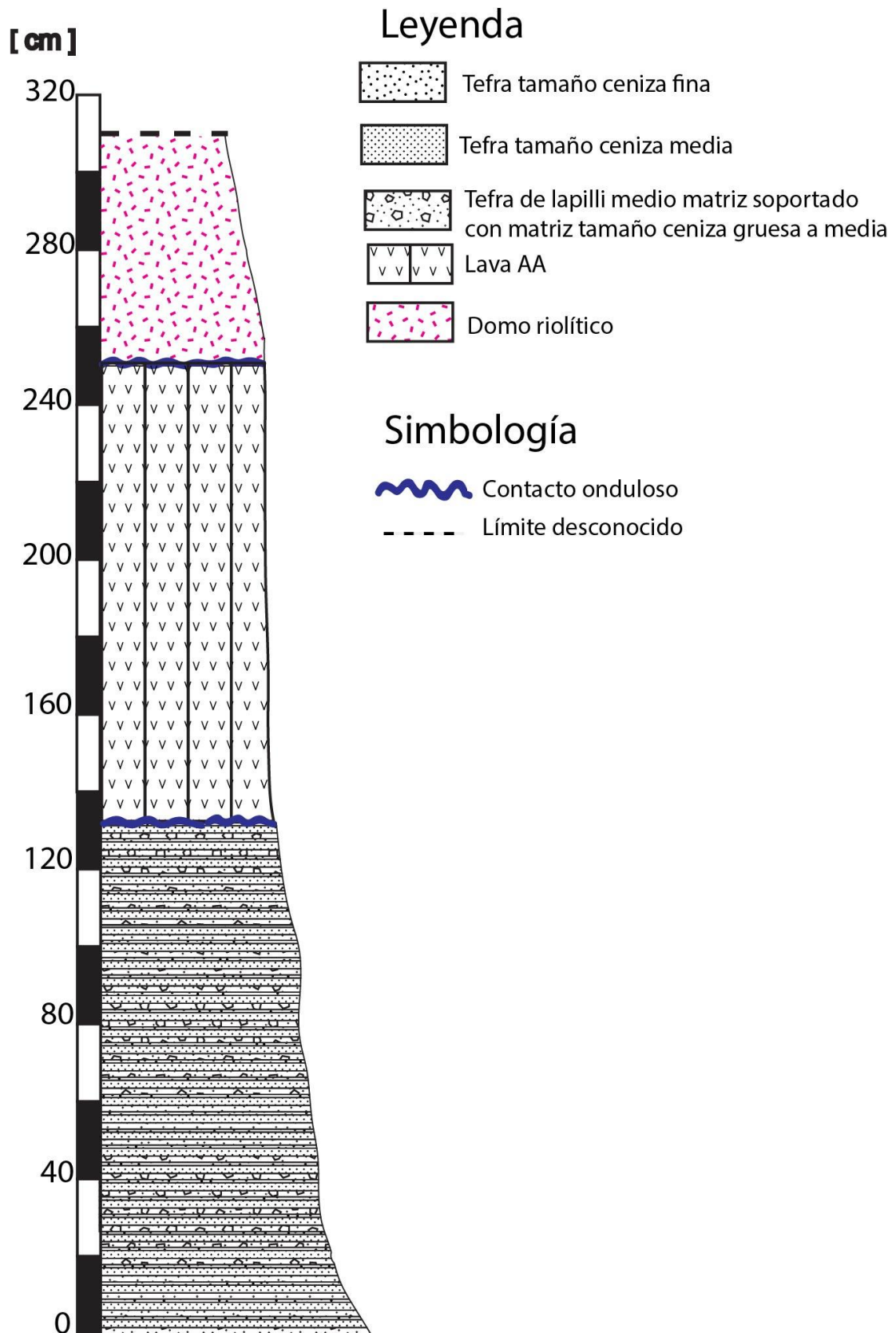


Figura 28. Perfil estratigráfico generalizado, centro eruptivo Lliza.

El nivel definido es de color gris blanquesino, consolidación media y espesor mínimo de 1.3 m. Se observó laminación paralela muy marcada, con espesores de capa que varían de 1 mm a 3 cm, y fracturas que cortan de manera casi perpendicular a la laminación (figura 29). No es posible observar el contacto basal, ya que se encuentra tapado por regolito. El contacto superior es de tipo discordante (figura 29), en donde el maar de Lliza se encuentra subyaciendo a un depósito de lava AA.

Se distingue la intercalación de tres franjas de distinta granulometría:

- i. Espesor de franja varía de 1 a 8 mm, clastosoportado, con fragmentos mayores (75%) de tamaño lapilli fino, conformados por líticos afaníticos grises (25%) y escorias poco vesiculadas (50%). La matriz (25%) es de tamaño ceniza fina a media, en donde se observa líticos (25%) similares a fragmentos mayores.
  
- ii. Espesor varía de 3 mm a 2 cm, matriz-soportado, con fragmentos mayores (40%) tamaño ceniza media, conformados por líticos afaníticos negruzcos (15%) y escorias (25%) poco vesiculadas. La matriz (60%) es de tamaño ceniza fina.
  
- iii. Espesor varía de 1 a 4 mm. La franja está compuesta en su totalidad por ceniza fina de color blanquecina grisácea

En algunos sectores del centro eruptivo, es posible apreciar bloques de lava AA inmersos en los depósitos de Lliza, lo que hace pensar que los depósitos del maar aún no estaban completamente consolidados cuando ocurrió el avance de la lava AA (figura 30).

La lava AA se encuentra a su vez subyaciendo de manera discordante a un domo rilítico (figura 31).



Figura 29. Con línea negra se demarca el contacto discontinuo entre depósitos de maar de Lliza y depósitos de lava AA.

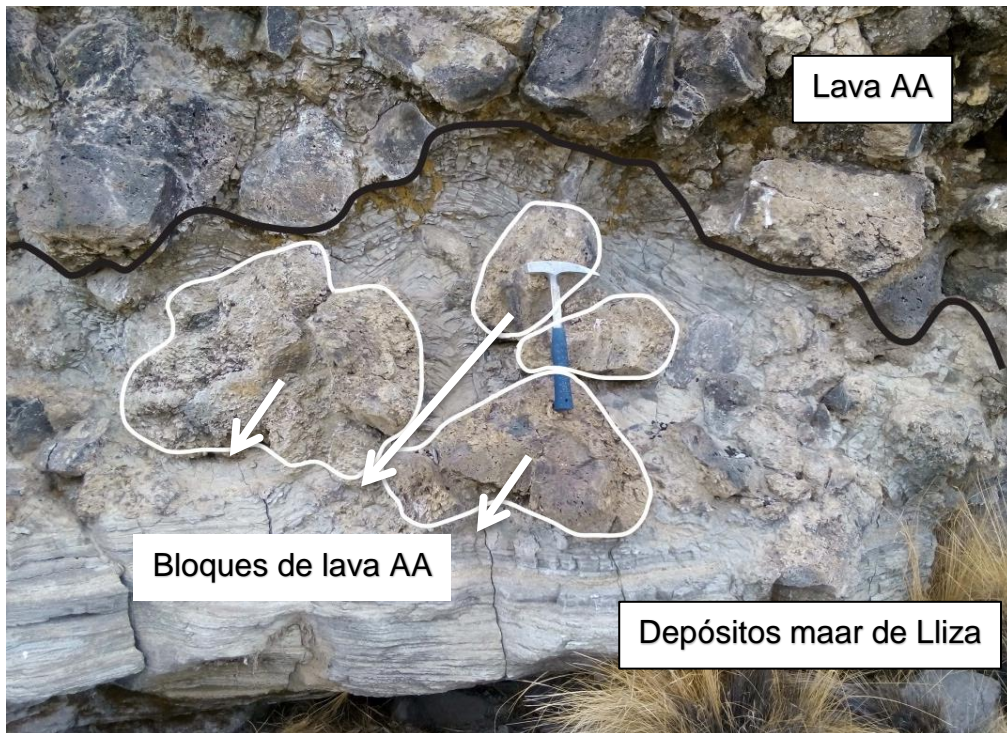


Figura 30. Bloques de lava AA inmersos en los depósitos del maar Lliza.

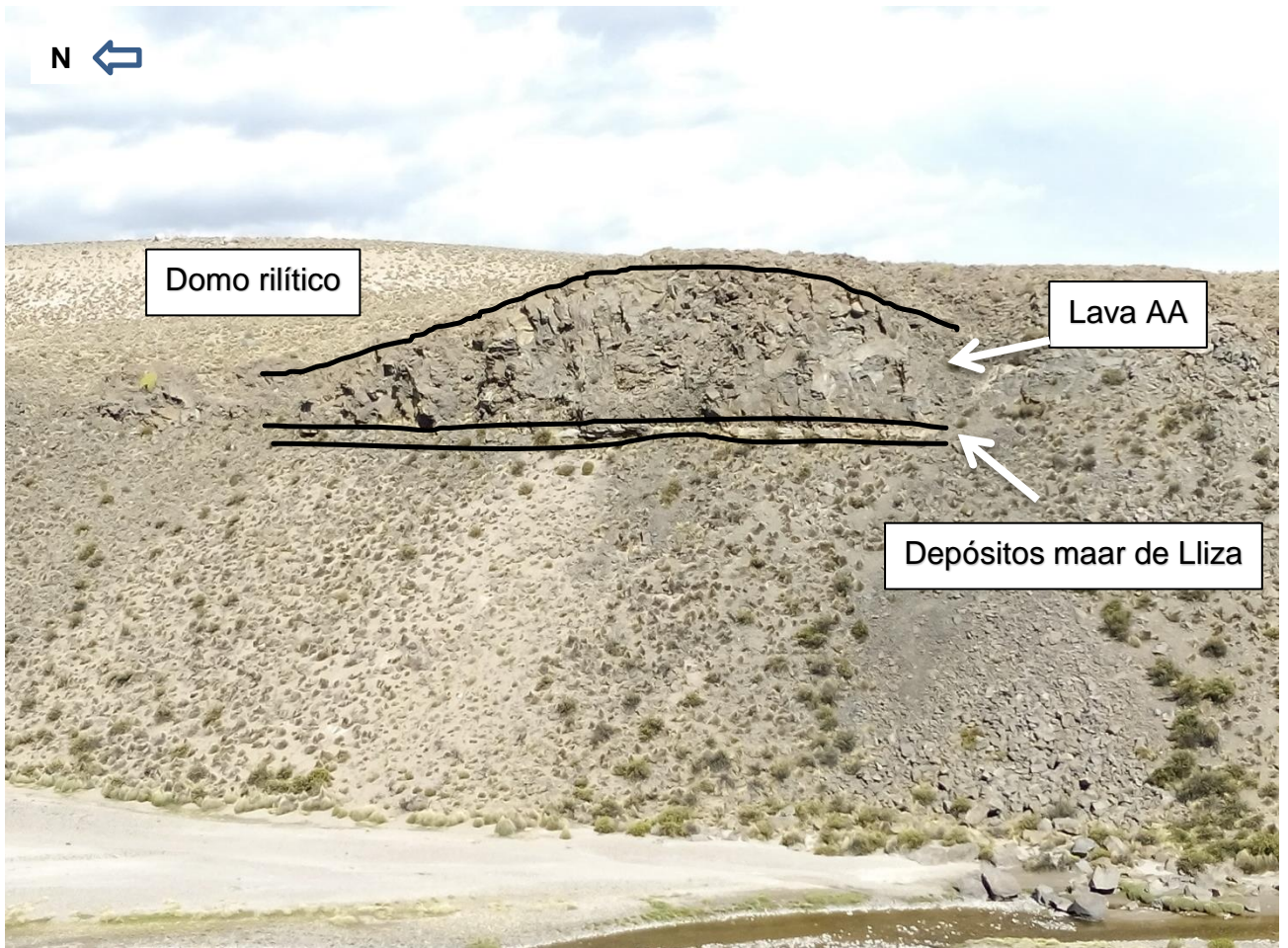


Figura 31. Vista hacia el este de los depósitos del Maar de Lliza. Se puede apreciar además el nivel de lava AA y del domo riolítico, sobreyaciendo los depósitos de Lliza.

## 5.2 ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO

El análisis sedimentológico se llevó a cabo solo para el centro eruptivo Michacollo, ya que la gran consolidación de capas que presentaban los depósitos del centro eruptivo Lliza, no lo permitieron.

Se seleccionaron 11 muestras desde el Maar Michacollo con el fin de estudiar granulometría y componentes. En la tabla 1 se detallan las muestras y el nivel al cual pertenecen y en la figura 32 se ilustra su ubicación en la columna estratigráfica.

Tabla 1. Muestras para granulometría.

Código Muestra	Nivel	Subnivel
PAL3-1	1	-
PAL3-3	3	-
PAL3-4C	4	i
PAL3-4A	4	iii
PAL3-5A	5	i
PAL3-5B	5	ii
PAL3-6A	6	i
PAL4-1B	6	ii
PAL6-2A	7	i
PAL6-2B	7	ii
PAL6-3A	8	-

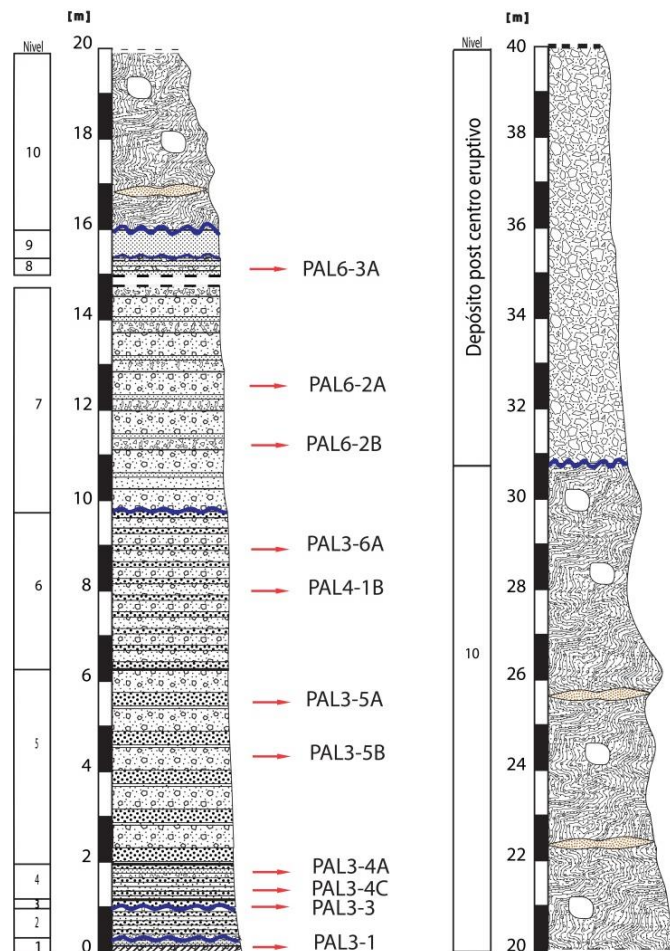


Figura 32. Ubicación de muestras tamizadas en perfil estratigráfico, Maar Michacollo.

Para realizar el análisis sedimentológico, se llevó a cabo, en primera instancia, el secado de las muestras en un horno a una temperatura de 80° C, para luego ser pesadas y a continuación tamizadas manualmente, por vía seca. El tamizado se llevó a cabo utilizando mallas de norma *astm*, siguiendo los valores de la escala phi (Tabla 2).



**Tabla 2. Escala Phi, Krumbein (1937)**

Escala phi	Escala en mm
-5	32
-4	16
-3	8
-2	4
-1	2
0	1
1	0,5
2	0,25
3	0,125
4	0,0625

### 5.2.1 Análisis granulométrico

Luego de tamizar y pesar las porciones de muestras retenidas en cada tamiz, se construyeron gráficos de porcentaje en peso versus intervalos de phi ( $\varphi$ ) (figura 40). A continuación, se graficaron las curva de frecuencia acumulativa para cada nivel muestreado con el fin de obtener, mediante el método de Folk y Ward (1957), los parámetros de selección, y mediana (ver Tabla 3). Para el caso de la selección, se utilizara el criterio de clasificación propuesta por Cas & Wriqth (1987), basada en los resultados de Walker (1971) (Tabla 4).

**Tabla 3. Fórmulas del método grafico de Folk y Ward, 1957.**

Parámetros estadísticos	Método Folk y Ward, 1957
selección	$\frac{(\varphi_{84}-\varphi_{16})}{4} + \frac{(\varphi_{95}-\varphi_5)}{6,6}$
mediana	$\varphi_{50}$

**Tabla 4. Grado de selección, referente a depósitos volcánicos primarios. Cas & Wright, 1987**

Selección	Cas & Wright (1987)
0 - 0,99 $\varphi$	Muy bien seleccionado
1,00 - 1,99 $\varphi$	Bien seleccionado
2,00 - 3,99 $\varphi$	Pobremente seleccionado
$\geq 4 \varphi$	Mal seleccionado

Según Walker (1971), valores superiores a  $\sigma_{\varphi}=2.0$  se asocian a flujos piroclásticos, los cuales se clasifican además como depósitos de pobre selección (Tabla 4), según Cas & Wright (1987). Las muestras analizadas presentan valores de  $\sigma_{\varphi}$  que van desde los 1.08 hasta 2.7 (Tabla 5), es decir se presentan niveles bien seleccionados y pobremente seleccionados.

Tabla 5. Mediana y selección, muestras centro eruptivo Michacollo

Muestra	Md Phi	Sigma Phi
PAL3-1	0,97	1,78
PAL3-3	1,29	1,08
PAL3-4C	0,61	1,98
PAL3-4A	0,87	2,17
PAL3-5A	0,26	1,86
PAL3-5B	0,69	1,41
PAL3-6A	0,17	2,01
PAL4-1B	0,64	2,25
PAL6-2A	-2,14	2,77
PAL6-2B	-0,81	2,41
PAL6-3A	-1,41	2,14

En la figura 33 se plotea la mediana versus la selección para las muestras del centro eruptivo Michacollo. Con línea negro se demarca el campo en el que caen los flujos piroclásticos, con línea verde, el campo de los depósitos de caída, y con línea roja, el campo de las oleadas piroclásticas. Todos campos fueron definidos en Walker (1971).

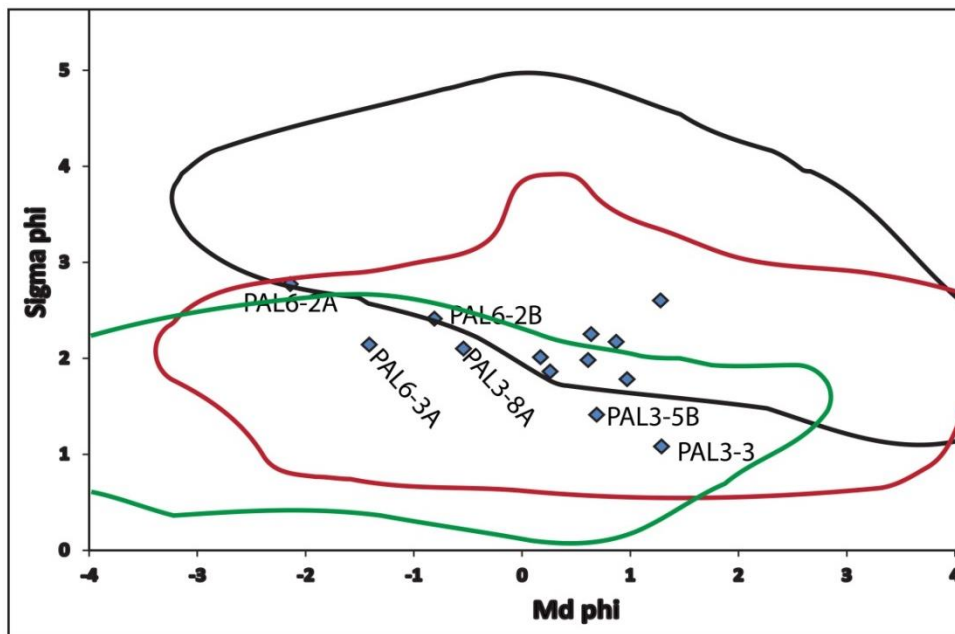


Figura 33. Ploteo de Mediana ( $Md\phi$ ) vs Selección ( $\sigma\phi$ ) para 13 muestras del centro eruptivo Michacollo. Campo delimitado con línea negra: flujos piroclásticos; Campo delimitado con línea verde: depósitos de caída; Campo delimitado con línea roja: oleadas piroclásticas.

En la figura 40 se grafican los parámetros de mediana y selección junto a su posición en la columna estratigráfica, donde se observan grandes variaciones en el tamaño medio de grano, sin una tendencia clara. Se comporta más bien de una manera caótica.

## 5.2.2 Análisis de Componentes

Dado los histogramas de porcentaje en peso según tamaño, analizados anteriormente, se decidió que la separación de los componentes, realizada a todas las muestras tamizadas, se llevaría a cabo desde el tamaño -4 a 1 phi. Se utilizó lupa binocular para porciones menores a -2 phi (4mm).

### 5.2.2.1 Discriminación por tipo

En el centro eruptivo Michacollo se distinguió solo un tipo de juvenil blanquecino poco fibroso, más bien masivo, el cual se clasificó como pómez (Figura 34).

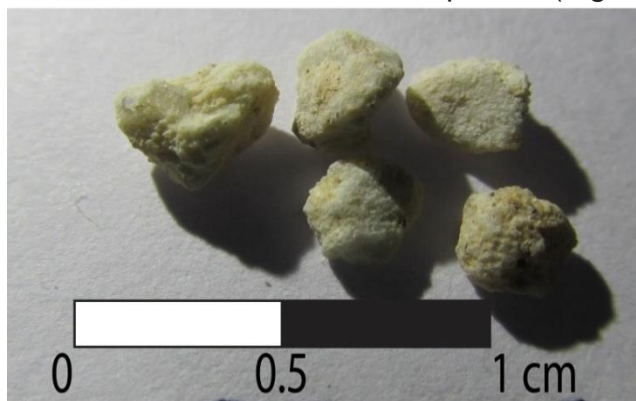


Figura 34. Juvenil presente en los depósitos del centro eruptivo Michacollo.

Se reconocieron cuatro tipos de líticos, los cuales se detallan a continuación:

- Lítico cristalino (Figura 35 A): Fragmentos de colores gris claro a incoloro. Textura afanítica donde es imposible apreciar cristales. Presentan forma subesférica y subangular. Es posible observarlos en todos los niveles del depósito y en todo el rango de tamaño (desde los 16 mm).
- Lítico gris oscuro (Figura 35 B): Presenta textura porfídica con fenocristales de plagioclasa, cuarzo, anfíbol y ortoclasa, inmersos en masa fundamental afanítica gris oscura. Tanto la masa como los cristales se encuentran alterados. Los fragmentos son subesféricos y subangulares. Se distinguen en tamaños de granos menores a 4 mm y se observan en todos los niveles del depósito.
- Lítico rojizo (Figura 35 C): Estos fragmentos se presentan obliterados, donde es imposible distinguir cristales o masa fundamental. Son subesféricos y subangulares, de tamaño menor a 4 mm.
- Lítico café/rosado (Figura 35 D): Presenta textura porfídica con fenocristales de Plagioclasa, inmersos en una masa fundamental de totalidad rosada/café. Presentan una alta esfericidad y son angulares. Observables en tamaños menores a 4 mm. Se clasifica como fragmentos de lava de erupciones anteriores.

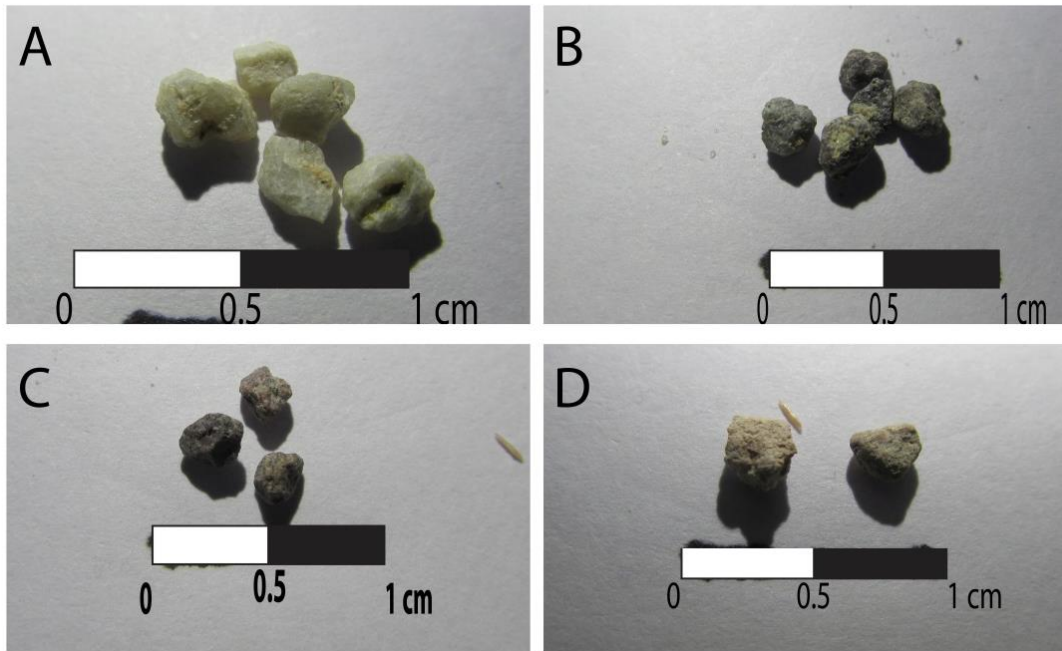


Figura 35. Tipos de líticos presente en el depósito del centro eruptivo Michacollo.

A: Líticos cristalinos. B: Líticos gris oscuro. C: Líticos rojizos. D: Líticos café/rosado

Se apreciaron, además, cristales de cuarzo, ortoclasa y biotita, siendo estos dos últimos de una proporción muy baja y solo apreciables para tamaños menores a 1mm (Figura 36). Los cristales de cuarzo son incoloros y anhedrales, los de biotita son de color negro y subhedrales y los cristales de ortoclasa son de color blanquesino y euhedrales.



Figura 36. A la izquierda, cristal de cuarzo. A la derecha, cristal de ortoclasa. Ambos presentes en el centro eruptivo Michacollo

Analizando el porcentaje de juveniles, líticos y cristales, según la clasificación de Le Maitre et al. (2002), casi todas las muestras analizadas del depósito caen dentro del campo de Toba vítrea, a excepción de las muestras PAL6-3A y PAL6-2A, la cuales se clasifican como Tobas Líticas (Figura 37).

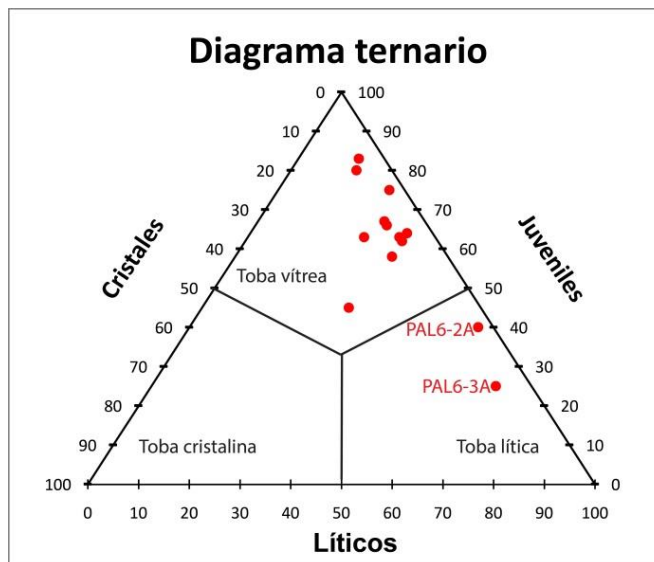


Figura 37. Triángulo de componentes del centro eruptivo Michacollo

En la figura 41 se observa el porcentaje de los componentes según el nivel. Aquí se observa que el porcentaje de juveniles a lo largo del depósito del centro eruptivo es variable, siendo mayor al 80% en los niveles 1 y 6, y siendo menor al 50% en los niveles 7 y 8. El porcentaje de fragmentos líticos también es variable, predominando en los niveles 7 y 8.

En la figura 42 se tiene la distribución de los componentes según el tamaño, para cada una de las muestras estudiadas, según su posición estratigráfica.

Todos los fragmentos estudiados en este punto fueron separados hasta una fracción de  $1 \varphi$  (0.5mm), lo que significaría que se estudió los componentes de cerca del 80%vol de cada nivel.

### 5.2.2.2 Discriminación por angulosidad

Analizar la angulosidad de los componentes en los niveles de los depósitos del centro eruptivo permitirá definir facies volcánicas, lo cual ayudara a determinar de mejor manera la evolución del centro.

La separación de los componentes por angulosidad se llevó a cabo desde el tamaño -4 a 0 phi. Se utilizó la tabla de morfología para clastos sedimentarios propuesta por Pettijohn (1987), y se discriminó entre redondeado, subredondeado, subanguloso y anguloso (Figura 38).













	Well rounded	Rounded	Subrounded	Subangular	Angular	Very angular
Low sphericity						
High sphericity						

Figura 38. Morfología clastos sedimentarios (Pettijohn et al. 1987).

En la figura 39 se muestra un ejemplo para la separación realizada a pómez según la morfología de los clastos.

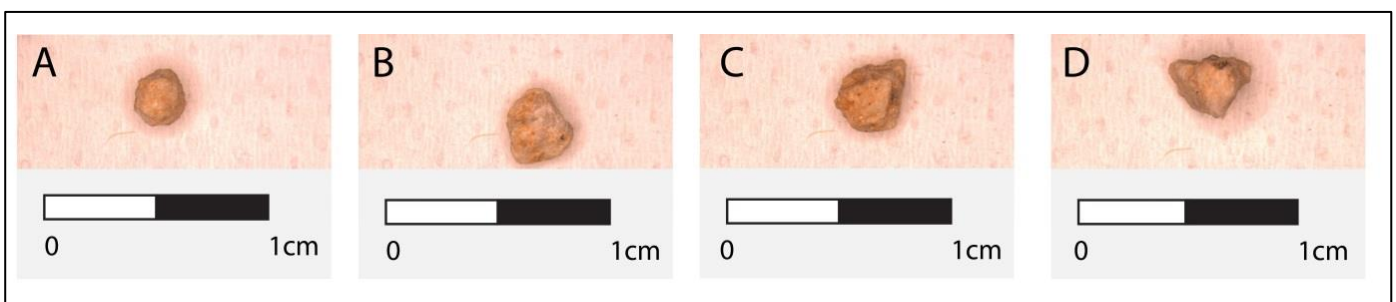


Figura 39. Ejemplo de separación por morfología de clastos sedimentarios (pómez). A: redondeado; B: subredondeado; C: subanguloso; D: anguloso

En la figura 40 se tiene la angulosidad de los clastos por nivel, del centro eruptivo Michacollo, según su posición estratigráfica. En los gráficos se observa que la morfología de los componentes es predominantemente subangulosa.

En la figura 41 y 42 se grafica el porcentaje de angulosidad para cada componente de las distintas muestras, según su posición estratigráfica, del centro eruptivo Michacollo.

Todos los fragmentos estudiados en este punto fueron separados hasta una fracción de  $0 \varphi$  (1mm), lo que significaría que se estudió la angulosidad de cerca del 65%vol de cada nivel.

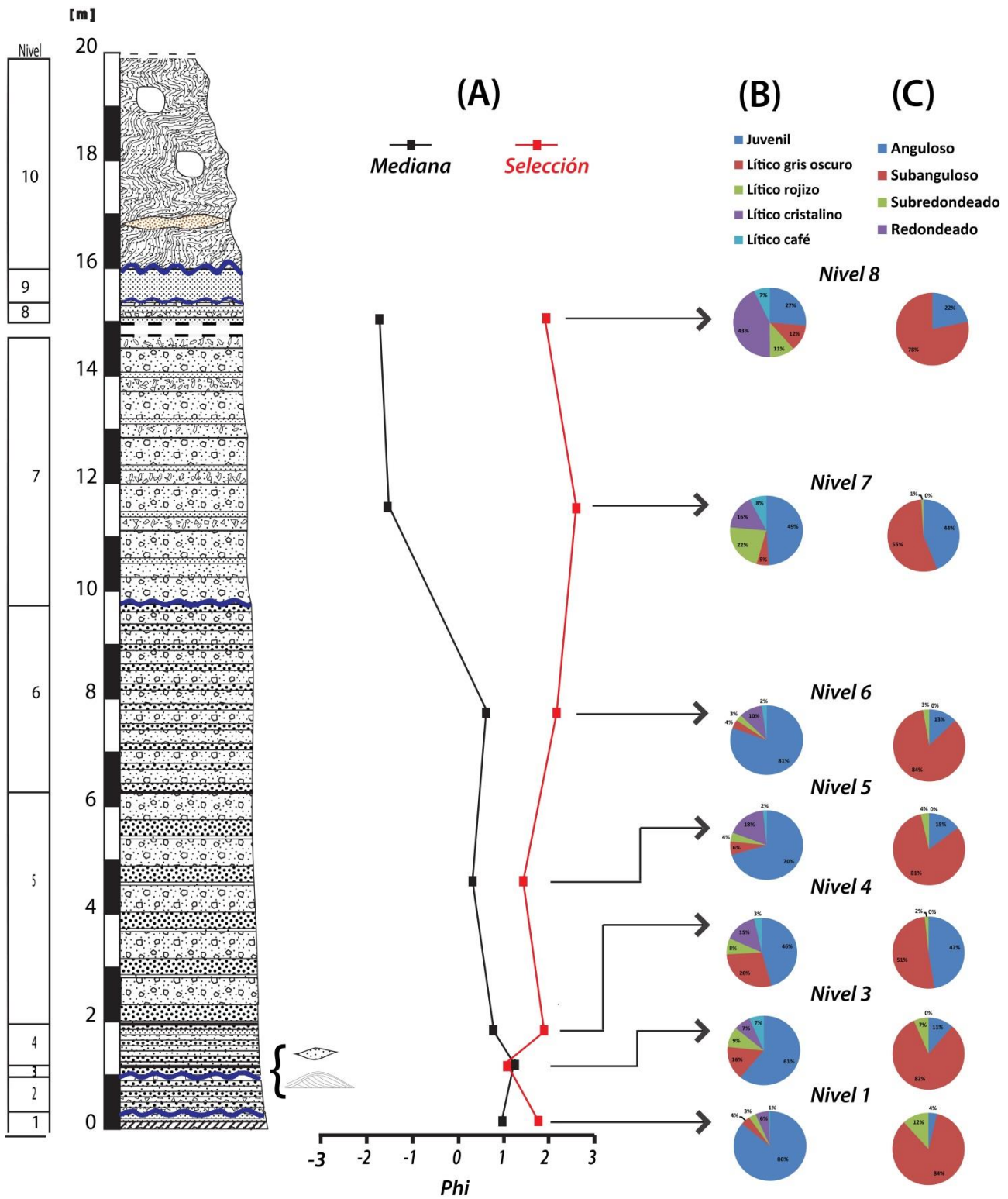


Figura 40. Compilación de información. Se grafica parámetros de mediana y selección (A), distribución de angulosidad (B) y de componentes (C) para cada nivel estudiado de los depósitos del centro eruptivo Michacollo.



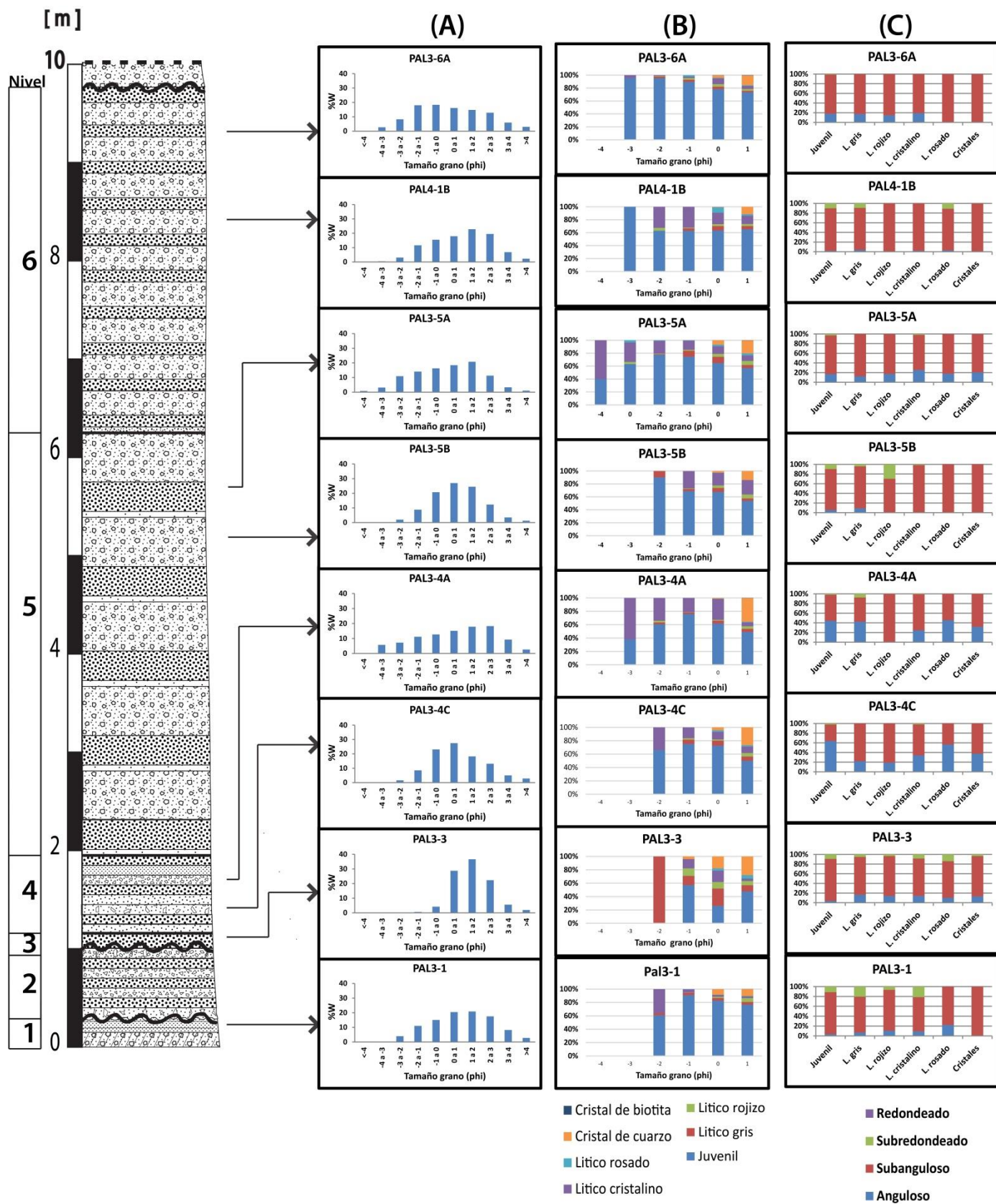


Figura 41. Compilación de información. Se grafica curvas de porcentaje en peso versus tamaño de grano (A), porcentaje de componentes según tamaño de grano (B) y distribución de angulosidad según tipo de componente (C). Parte I.

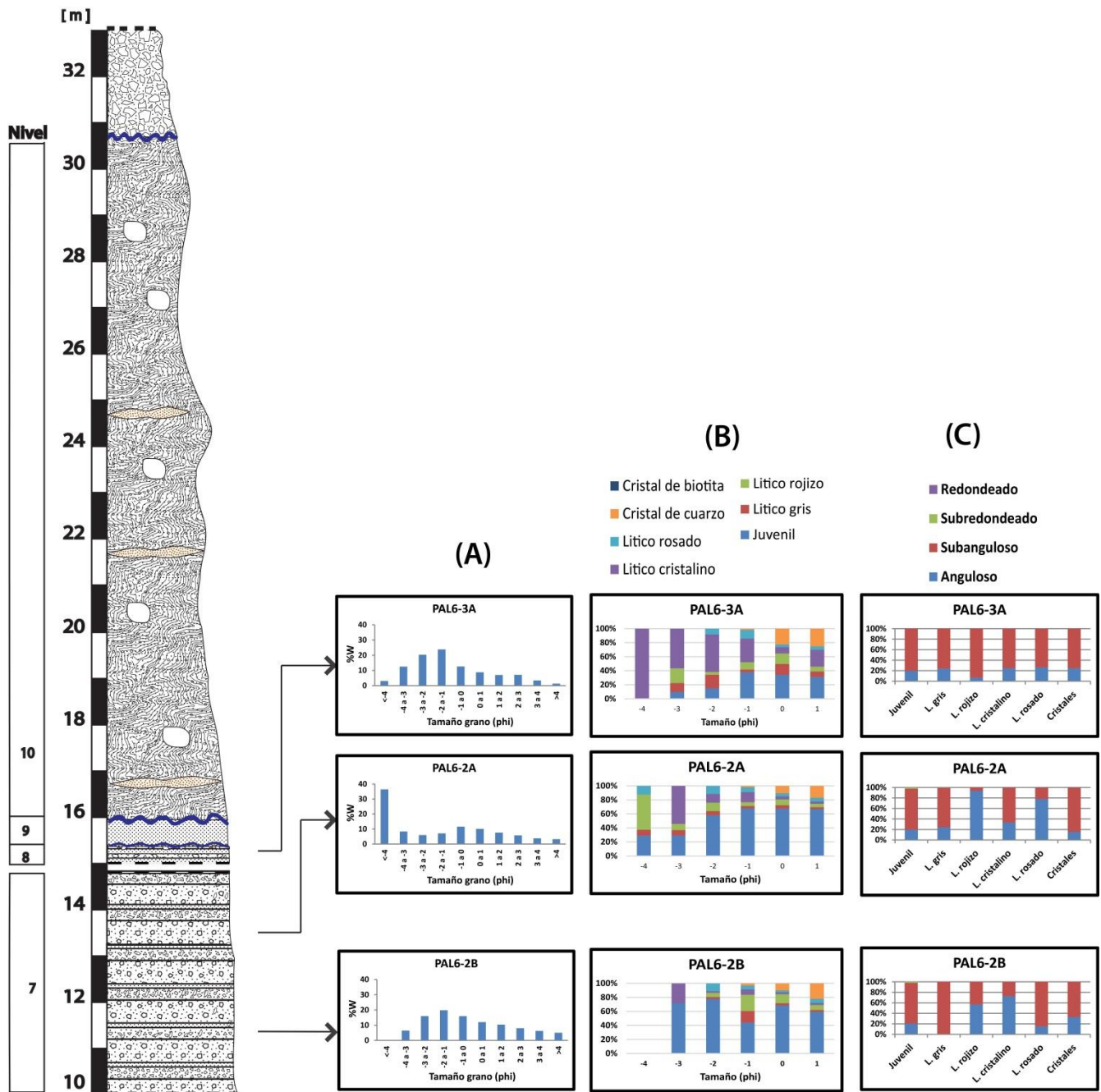


Figura 42. Compilación de información. Se grafica curvas de porcentaje en peso versus tamaño de grano (A), porcentaje de componentes según tamaño de grano (B) y distribución de angulosidad según tipo de componente (C). Parte II.

### 5.3 ANÁLISIS PETROGRÁFICO

La descripción petrográfica consistió en una descripción macroscópica y microscópica de depósitos de niveles del maar de Michacollo, maar de Lliza y a bloque del depósito del flujo piroclástico de tipo bloques y ceniza, el cual se encuentra sobreyaciendo a depósitos de Michacollo.

La descripción microscópica fue en microscopios de luz transmitida, utilizando rangos de aumento entre los 5X y 20X.

Debido a que los depósitos de los maares no son uniformes, los cortes realizados no son completamente representativos a lo que es el depósito en su totalidad.

#### 5.3.1 Maar de Michacollo

**Muestra PAL3-4B:** corresponde al nivel 4 del centro eruptivo, y se clasifica como depósito de toba lítica con textura piroclástica. Esta muestra se caracteriza por presentar fragmentos mayores de pómez (15%vol) subangular y de baja esfericidad, cuarzo (10%vol), plagioclasa (1%vol) y cuatro tipos de líticos distintos: Lítico andesítico (5%vol) subangular y de baja esfericidad; lítico andesítico rojizo (5%vol) subredondeado y de baja esfericidad; lítico granitoidal (2%vol) redondeado y de alta esfericidad; lítico andesítico café rojizo (6%vol) subredondeado y de baja esfericidad. La matriz (50%vol) se conforma por cristales de cuarzo, plagioclasa, pómez, vidrio y opacos. Presenta vesículas (5%vol) que da textura vesicular a la roca

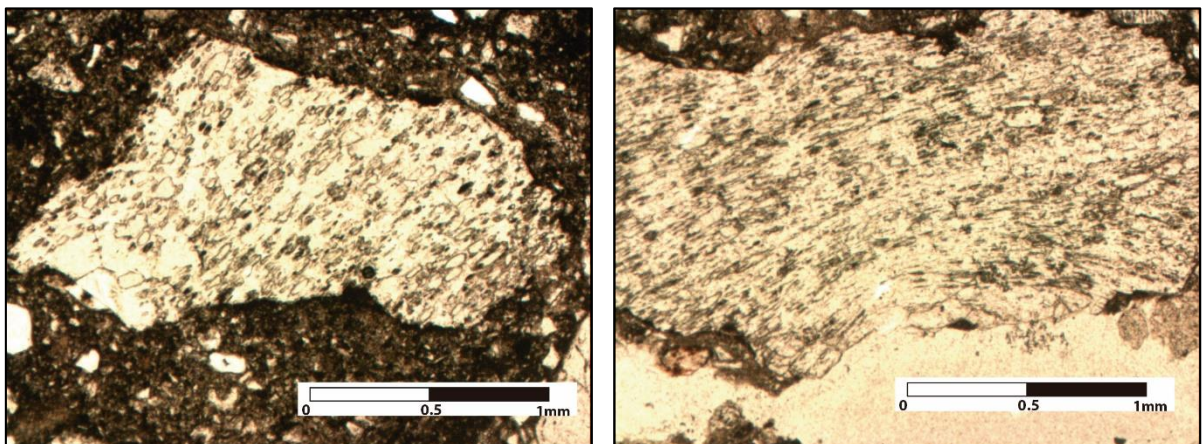


Figura 43. Imagen de sección delgada de depósitos del Maar de Michacollo. Ambas ilustraciones corresponden a juveniles pumíceos.

**Muestra PAL4-2B:** corresponde a la base del nivel 10 del centro eruptivo, y se clasifica como depósito de toba lítica con textura piroclástica. Esta muestra se caracteriza por presentar fragmentos mayores de pómez (10%vol) subredondeado y de baja esfericidad, cuarzo (5%vol), plagioclasa (2%vol), opacos (2%vol) y tres tipos de líticos distintos: Lítico andesítico rojizo (8%vol) subangular y de alta esfericidad; Líticos obliterados (5%vol) subredondeados y de alta esfericidad; Lítico andesítico café (3%vol) subangular y de baja esfericidad. La matriz (63%vol) está conformada por cristales de cuarzo, opacos, biotita, plagioclasa, vidrio y fragmentos de pómez. Presenta vesículas (2%vol) que dan textura vesicular a la roca.

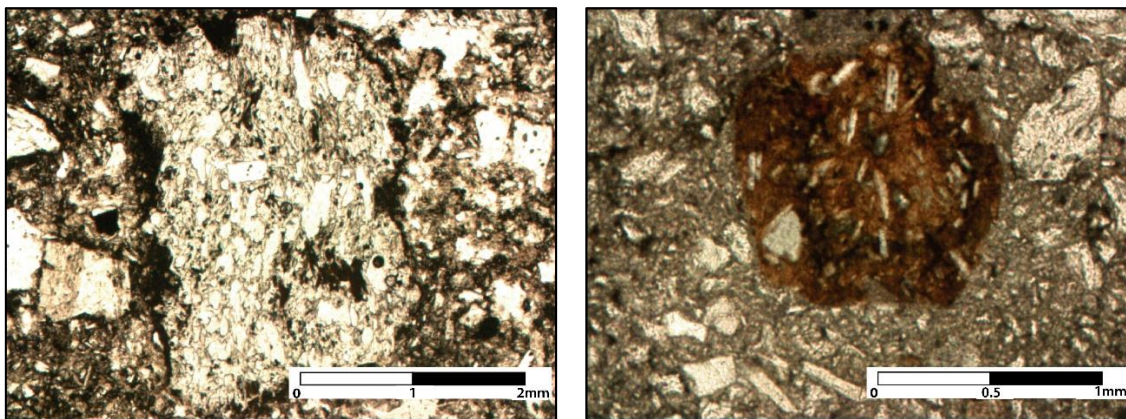


Figura 44. Imagen de sección delgada de depósitos del Maar de Michacollo. A la izquierda se tiene juvenil pumíceo vesiculado con fenocristales de plagioclasa en masa fundamental vítrea. A la derecha se tiene lítico andesítico rojizo, con fenocristales de plagioclasa y anfíbol en masa fundamental vítrea.

**Muestra PAL6-A:** corresponde al nivel 9 del centro eruptivo, y se clasifica como depósito de toba lítica con textura piroclástica. Esta muestra se caracteriza por presentar fragmentos mayores de pómez (3%vol) subredondeado y de baja esfericidad, cuarzo (10%vol), plagioclasa (10%vol), feldespatos (5%vol), biotita (1%vol), anfíbol (1%vol) y opacos (7%vol) y tres tipos de líticos diferentes: lítico andesítico (20%vol) subangular y de baja esfericidad; lítico andesítico rojizo (8%vol) subredondeado y de alta esfericidad; lítico obliterado (15%vol) subredondeado y de baja esfericidad. La matriz (15%vol) está conformada por cristales de cuarzo, plagioclasa, opacos, fragmentos de pómez, arcillas y vidrio, todos menores a 0.05 mm. Presenta vesículas (2%vol) de bordes irregulares.

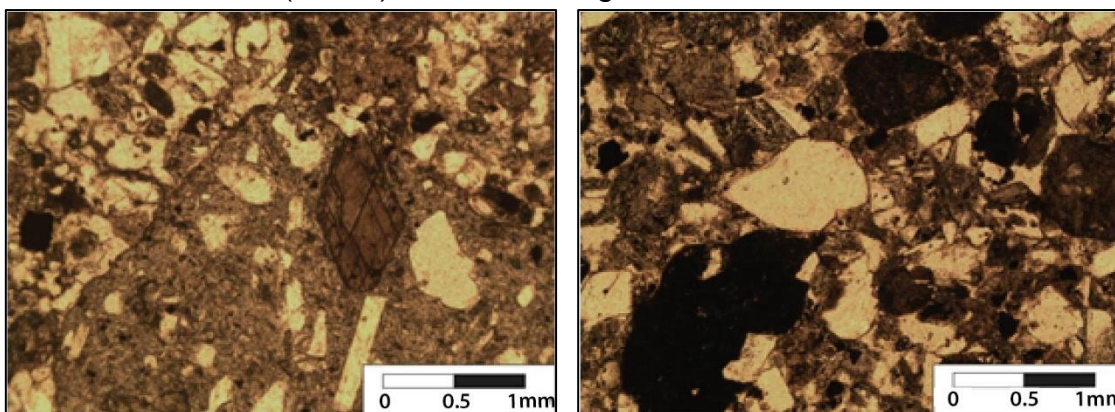


Figura 45. Imagen a nicos paralelos de sección delgada de depósitos del Maar de Michacollo. A la izquierda se observa lítico andesítico con fenocristales de anfíbol, cuarzo y plagioclasa, en masa fundamental vítrea con cristales de plagioclasa. A la derecha se tiene fragmentos de cuarzo, feldespatos y opacos.

**Muestra PAL3-7A:** corresponde a la parte superior del nivel 10 del centro eruptivo, y se clasifica como depósito de toba cristalina con textura piroclástica. Esta muestra se caracteriza por presentar fragmentos mayores de pómez (15%vol) subangular y de baja esfericidad, cuarzo (15%vol), plagioclasa (10%vol), magnetita (4%vol), biotita (1%vol) y tres tipos de líticos distintos: Lítico andesítico gris (10%vol) subangular y de alta esfericidad; Líticos andesítico café (5%vol) redondeados y subesféricos; Lítico andesítico gris rojizo (10%vol) subredondeado y de baja esfericidad. La matriz (25%vol) está conformada por cristales de cuarzo, opacos, biotita, plagioclasa, fragmentos de pómez y vidrio. Presenta vesículas (5%vol) que dan textura vesicular a la roca.

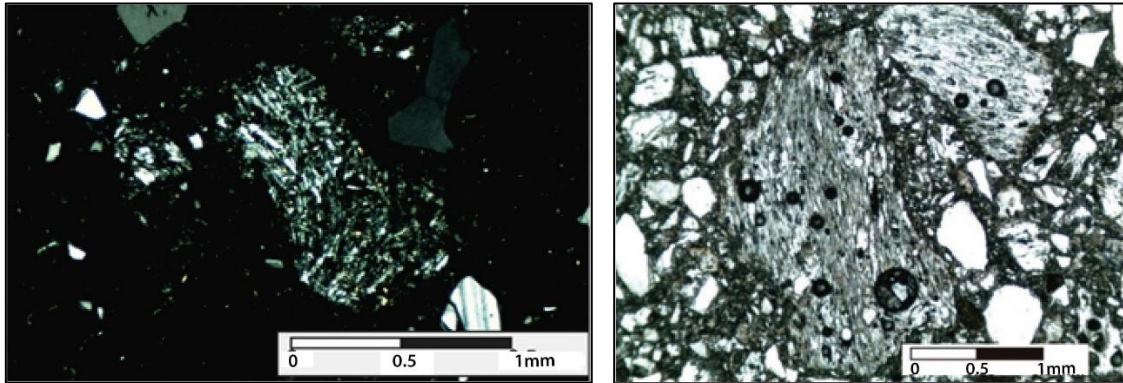


Figura 46. Imagen de sección delgada de depósitos del Maar de Michacollo. A la izquierda en nicoles cruzados se observa lítico andesítico, compuesto por fenocristales de plagioclasa en masa fundamental vítrea. A la derecha en nicoles paralelos se observa juvenil pumíceo.

**Muestra B&A:** se obtuvo de un bloque del depósito del depósito de flujo piroclástico de tipo bloque y cenizas, post centro eruptivo Michacollo. Esta muestra se caracteriza por presentar textura porfídica con fenocristales de olivino (15%vol), plagioclasa (10%vol) y minerales opacos (5%vol), inmersos en una masa fundamental cristalina de textura pilotaxítica, compuesta por plagioclasa (45%vol), piroxeno (20%vol) en los intersticios y óxidos de Fe-Ti (5%vol). Los fenocristales de olivinos se encuentran fracturados y presentan bordes de reacción de iddingsita.

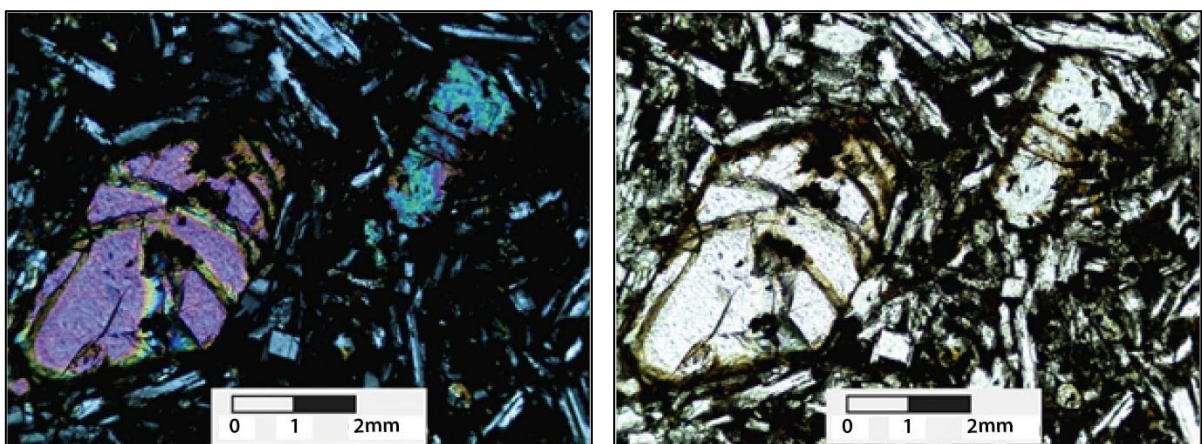


Figura 47. Imagen de sección delgada de bloque perteneciente a flujo piroclástico de tipo bloque y ceniza. A la izquierda en nicoles cruzados se observa fenocristal de olivino inmersa en masa fundamental compuesta por plagioclasa y piroxeno. A la derecha se observa en nicoles paralelos.

### 5.3.2 Maar de Lliza

**Muestras PAL6-1 y PAL5-1:** cortes correspondientes a depósitos de Lliza. Se clasifican como depósitos de toba vítrea con textura piroclástica. Esta muestra se caracteriza por presentar fragmentos mayores tamaño ceniza media a lapilli fino de escoria (50%vol) subangular y de baja esfericidad y líticos negros (5%vol) subangulares a angulares, de baja esfericidad, de composición similar a juveniles. La matriz (40%vol), tamaño ceniza fina, se compone de vidrio y se encuentra palagonitizada. Presenta vesículas (5%vol) que dan textura vesicular a la roca.

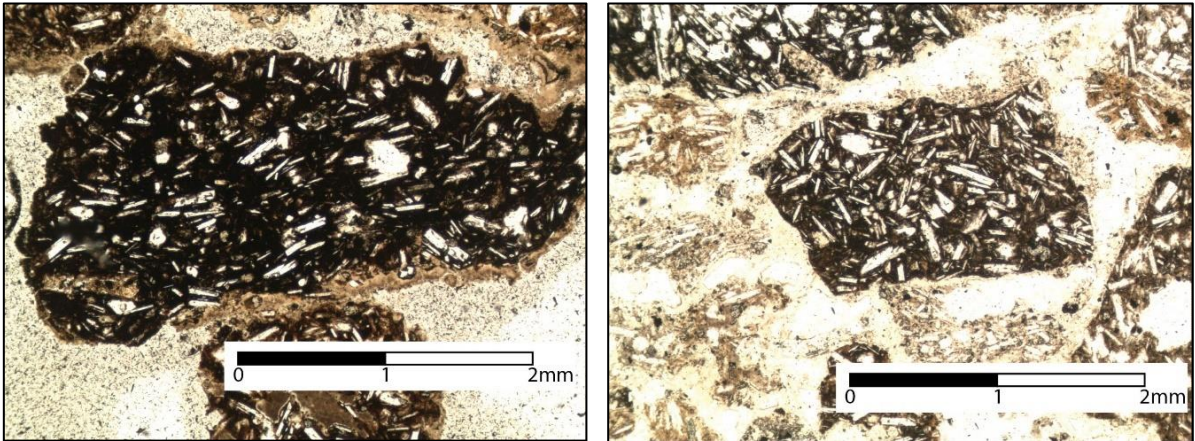


Figura 48. Imagen de sección delgada de depósitos del Maar de Lliza. A la izquierda se tiene juvenil escoráceo con fenocristales de plagioclasa y piroxeno en masa fundamental vítrea. A la derecha se tiene lítico andesito-basáltico, con fenocristales de plagioclasa y piroxeno en masa fundamental vítrea.

## 6. DISCUSIONES

Según las dataciones realizadas en Clavero et al. (2018), los maares de Michacollo y Lliza se emplazaron durante el Mioceno Superior. En esta época el área de estudio se caracterizó por presentar volcanismo de tipo andesítico-dacítico, con la formación de estratovolcanes y calderas silíceas de gran tamaño (García et al., 2004).

A partir de las evidencias del trabajo de campo, análisis granulométricos y de componentes, además del estudio petrográfico, ha sido posible determinar los mecanismos eruptivos asociados a ambos centros eruptivos en estudio, estableciendo así secuencias de eventos que permiten interpretar y reconstruir las evoluciones eruptivas de ambos volcanes.

Es importante destacar que en los depósitos de alta energía (erupción explosiva), donde el magma interactúa con el agua, los componentes líticos representan el lugar donde la roca de caja fue fracturada e incorporada durante el ascenso del magma. Es por esto por lo que el tipo de fragmento y su abundancia indican el nivel estratigráfico de la interacción hidrovolcánica (Wohletz, 1986).

### 6.1 CONSIDERACIONES INICIALES

En Michacollo, las características sedimentológicas de los depósitos, junto a los rumbos y manteos medidos que muestran como los depósitos se curvan y mantean hacia un centro común (el cráter), permitirían afirmar que los depósitos estudiados se ubicaban bajo del suelo pre-eruptivo (figura 49), los cuales fueron expuestos en superficie mediante procesos de erosión o levantamientos geológicos.

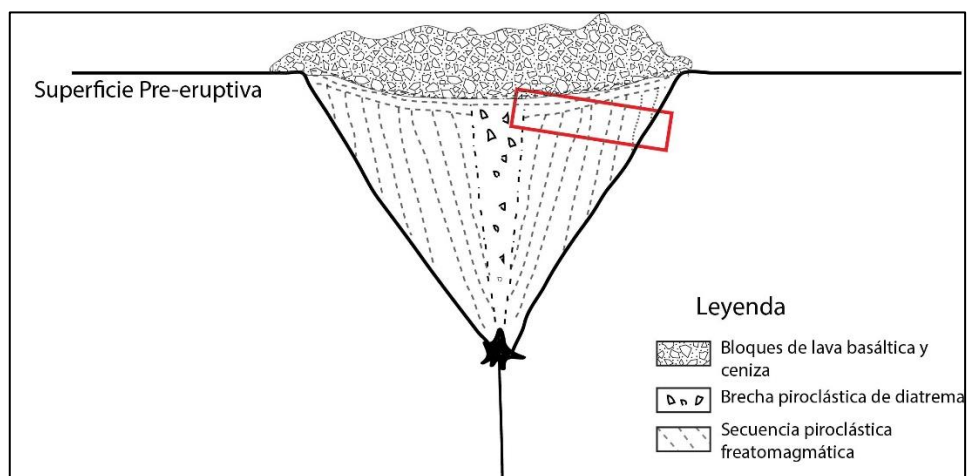


Figura 49. Esquema simple del centro eruptivo Michacollo. Con el rectángulo rojo se demarca el lugar en donde se estima se ubiquen los depósitos estudiados.

En Lliza, las características sedimentológicas, rumbos y manteos medidos de los depósitos, junto con el análisis de imágenes satelitales desarrollado, permiten afirmar que los depósitos estudiados corresponden a los anillos de tefra que rodean radialmente el cráter del maar (figura 50).

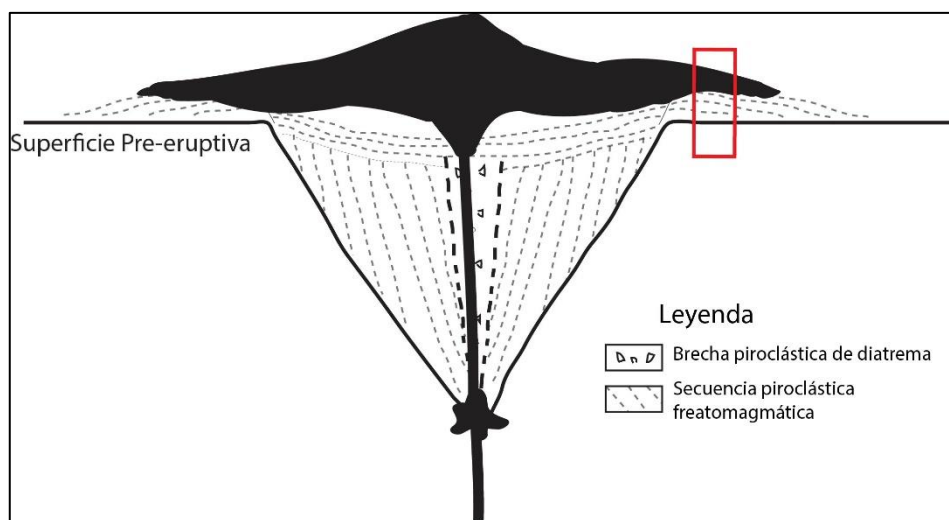


Figura 50. Esquema simple del centro eruptivo Lliza. Con el rectángulo rojo se demarca el lugar en donde se estima se encuentran los depósitos estudiados.

## 6.2 UNIDADES DE FLUJO

### 6.2.1 Centro eruptivo Michacollo

Al analizar y asociar los niveles anteriormente descritos, junto con los datos granulométricos y de componentes obtenidos, se definieron ocho unidades de flujo para el centro eruptivo Michacollo, los cuales se describen a continuación:

**UNIDAD A:** Esta unidad solo incluye al nivel 1. Presenta contacto inferior desconocido y superior ondulado. Presenta buena selección en el tamaño de los granos. El alto porcentaje de componentes juveniles presente en el depósito (86%), además de su morfología principalmente subangulosa, indican que hacia el inicio de la erupción, esta tuvo mayor participación magmática, aumentando de energía con el tiempo. Esta combinación de facies con laminación cruzada y laminación paralela indicaría la ocurrencia de un flujo de oleada piroclástica basal (Crowe y Fisher, 1973).

**UNIDAD B:** Esta unidad solo incluye al nivel 2. Presenta contacto superior e inferior ondulado. El porcentaje de juveniles es similar a la Unidad A y la morfología de los clastos es principalmente subangulosa.

El porcentaje de juveniles demuestra que esta unidad también tuvo una participación importante del magma.

La marcada laminación paralela es indicativa de oleadas basales con un grado de energía menor comparado con el techo de la Unidad A.



**UNIDAD C:** Esta unidad solo incluye al nivel 3. Presenta contacto inferior onduloso y superior recto. Se observa una estructura de antiduna, las cuales son bastantes comunes en oleadas basales húmedas. Presenta buena selección en el tamaño de los granos, teniendo una media cercana a 1 phi. El alto porcentaje de componentes juveniles presente en el depósito (61%), indican que la erupción tuvo una alta participación magmática, pero en menor medida que las unidades A y B. Resalta el porcentaje de líticos grises andesíticos (16%).

Todo lo anterior es indicativo de que la energía disminuye en comparación a la Unidad B, pero se tiene una mayor participación freatomagmática.

Por lo tanto la unidad se define como producto de oleadas piroclásticas basales de baja energía.

**UNIDAD D:** Esta unidad incluye al nivel 4. Presenta contacto superior e inferior recto y laminaciones con espesores de hasta 5 cm. Presenta tamaño medio de grano cercano a 1 phi, siendo estos buenos a pobremente seleccionados. El porcentaje de juveniles baja al 46%, mientras que el porcentaje de líticos grises andesíticos aumenta al 26%. En esta unidad la morfología de los clastos es de tipo subangulosa a angulosa, siendo evidente el aumento del porcentaje de estos últimos, en comparación a las unidades anteriores.

Todo lo anterior es indicativo que en esta unidad la participación magmático disminuye, en comparación a las unidades tempranas, adquiriendo mayor importancia la actividad freatomagmática. La morfología de los clastos también indica mayor grado de fracturamiento de la roca de caja, lo que podría significar mayor índice de explosividad.

La unidad se define como producto de oleadas piroclásticas basales de energía moderada.

**UNIDAD E:** Esta unidad incluye a los niveles 5 y 6. Presenta contacto superior onduloso e inferior recto. En esta unidad se aprecia un aumento de la participación del magma, comparado con la unidad anterior, dado que el porcentaje de juveniles se eleva hasta el 70-80%. Con respecto al porcentaje de líticos, se observa que el lítico cristalino sobrepasa en concentración al lítico andesítico gris, lo que hace pensar que quizás la continua excavación del cráter, debido a las explosiones repetidas, permitieron llegar a una unidad pre-eruptiva nueva, donde el lítico cristalino sería su principal formador. Presenta tamaño medio de grano cercano a 0.5 phi, siendo estos buenos a pobremente seleccionados. En esta unidad la morfología de los clastos es de tipo subangulosa.

Todo lo anterior es indicativo que en esta unidad la participación magmático disminuye, en comparación a las unidades tempranas, adquiriendo mayor importancia la actividad freatomagmática.

La unidad se define como producto de oleadas piroclásticas basales de baja energía a energía moderada.

**UNIDAD F:** Esta unidad incluye a los niveles 7 y 8. Presenta contacto superior e inferior onduloso. Entre estos niveles no se pudo observar el contacto, pero dada las características que presentan, se asume que existiría continuidad entre ellos, y por lo tanto podrían conformar solo una unidad. Hacia la base de la unidad se observa laminaciones de hasta 80 cm de espesor. Hacia el techo, se tiene laminación paralela de hasta 10cm. El tamaño medio de grano ronda los  $-1\phi$ , siendo los depósitos pobremente seleccionados. Con respecto a los juveniles, estos disminuyen hacia el techo de la unidad, presentando concentraciones menores a las unidades anteriores (49-27%). Los líticos aumentan sus concentraciones, donde destaca el lítico rojizo en la base (27%) y el lítico cristalino (43%) en el techo de la unidad. La morfología de los clastos es principalmente subangulosa a angulosa, siendo esta última importante en la base de la unidad.

Todo lo anterior es indicativo de que la participación freatomagmática es considerable, disminuyendo la participación magmática a medida que se sube en la unidad. El gran porcentaje de líticos rojizos, los cuales se consideran como obliterados, pueden ser clastos reciclados de explosiones anteriores.

La unidad se define como producto de oleadas piroclásticas basales de moderada a alta energía.

**UNIDAD G:** Esta unidad incluye al nivel 9. Presenta contacto superior e inferior onduloso. No presenta estructuras planares. Se define como una facie nueva, donde los fragmentos mayores alcanzan el 80%. La concentración de pómez corresponde al 3%vol y el lítico dominante corresponde al lítico rojizo (10%vol).

Todo lo anterior indica que corresponde a un flujo piroclástico denso, el cual erosiona la parte superior de la Unidad F.

**UNIDAD H:** Esta unidad incluye al nivel 10. Presenta contacto superior e inferior onduloso, y se encuentra subyaciendo a un depósito de flujo piroclástico de tipo bloques y ceniza. Su gran deformación presente, junto a los intraclastos observados, indicaría que el nivel corresponde a la unidad más cercana al conducto del cráter del maar. La deformación presenta sería de tipo *slump*, provocada por la gravedad y la pendiente de la depositación.

### 6.2.2 Centro eruptivo Lliza

El Lliza se identifica solo una unidad de flujo (Unidad L), la cual corresponde a una corriente de densidad piroclástica diluida subaereal que erosiona la parte basal. Presenta laminación paralela muy marcada y se caracteriza por presentar gran porcentaje de escorias, las cuales dominan sobre los líticos andesito-basálticos identificados. Se encuentra en contacto superior con una lava de tipo AA.

### 6.3 FACIES DEL MAAR

El término facies se refiere a la identificación, descripción e interpretación de distintos intervalos que se repiten en una secuencia estratigráfica para un depósito, y consiste del carácter que la distingue como textura, composición, estructuras sedimentarias presentes, geometría de los depósitos, etc. Dichas características corresponden al reflejo de las condiciones dadas en el ambiente deposicional, y pueden ser aplicadas a cualquier escala. Una vez que se han definido los distintos tipos de facies dentro de las secuencias estratigráficas, será necesario realizar una asociación de facies y ver la relación que guardan entre ellas con el objetivo de evaluar su relación genética, para subsecuentemente relacionarlas a un episodio o fase eruptiva (Cas y Wright, 1987).

Para lograr entender los procesos asociados al volcanismo de Michacollo y Lliza, y con el objetivo de reconstruir la evolución eruptiva de ambos centros, se definieron cuatro tipos de facies presentes en la estructura de un maar. Estas facies fueron definidas analizando las descripciones estratigráficas antes realizadas:

- Facies de relleno del cráter:
- Facies de relleno del conducto
- Facies de relleno del conducto próximo a diatrema
- Facies extra maar

Fue así como en Michacollo, a medida que se subía en la columna estratigráfica, se pasaba de facies de relleno del conducto, a facies de relleno del cráter, para finalmente llegar a depósitos de pertenecientes a facies de relleno del conducto próximo a diatrema.

En Lliza los depósitos correspondían solo a facies extra maar.

Se definen también Facies magmáticas post maar, pertenecientes al mismo evento, donde en Lliza se reconocerían a el flujo de lava junto a la formación del cono de escoria, las cuales se condicen al agotamiento de agua subterránea.

## 6.4 UNIDADES FINALES

Con lo anteriormente descrito en los puntos 6.2 y 6.3 se definieron finalmente unidades correspondientes a la formación del maar y unidades post-maar. Es así como se presentan tablas resumen para ambos centros eruptivos:

**Tabla 6. Tabla resumen centro eruptivo Michacollo**

Facies	Unidades de Flujo	Unidades
Facies de relleno del conducto	Unidad A Unidad B Unidad C Unidad D Unidad E Unidad F	Unidad I. Formación del maar
Facies de relleno del cráter	Unidad G	
Facies de relleno del conducto próximo a diatrema	Unidad H	

**Tabla 7. Tabla resumen centro eruptivo Liza**

Facies	Unidades de Flujo	Unidades
Facies extra maar	Unidad L	Unidad I. Formación del Maar
Facies magmáticas	Lava AA	Unidad II. Post maar

## **6.5 EVOLUCIÓN DE CENTROS ERUPTIVOS**

A partir de las evidencias del trabajo de campo, de los análisis granulométricos y de componentes, así como la descripción y análisis de facies, ha sido posible establecer una secuencia de eventos registrados en las columnas estratigráficas levantadas, que han permitido interpretar y reconstruir la evolución eruptiva de ambas estructuras volcánicas en estudio. Los parámetros anteriores han permitido determinar que los depósitos de maar han sido emplazados a través de diferentes mecanismos eruptivos, asociados principalmente a oleadas piroclásticas basales y caída de lapilli.

### **6.5.1 Reconstrucción eruptiva Maar Michacollo**

1° etapa: inicio de la actividad freatomagmática, la cual se causa por el ascenso del magma a través de un conducto vertical y la interacción con el agua subterránea. La interacción fue de baja escala, siendo la parte magmática la dominante. Esto puede ser explicado debido a la baja permeabilidad de la roca de caja, lo que limita el contacto del agua subterránea con el cuerpo magmático.

2° etapa: aumento de actividad freatomagmática, debido a la mayor participación de agua subterránea. A medida que avanzaba la erupción, las continuas explosiones locales que se producían permitieron que la interacción entre los dos cuerpos (magma/agua) aumentara, adquiriendo la erupción mayores características freatomagmáticas, lo que permitió la incorporación de cantidades importantes de líticos de roca de caja andesíticos en los productos volcánicos.

3° etapa: nuevo aumento de actividad freatomagmática. A medida que la erupción avanzaba, las explosiones permitieron abrir zonas de la roca de caja donde el agua subterránea estaba atrapada, lo que permitió aumentar la interacción del cuerpo magmático con el agua subterránea. El aumento de las explosiones freatomagmáticas permitieron a su vez excavar en un nuevo nivel de roca de caja, la cual se caracteriza por presentar características cristalinas.

4° etapa: cese de actividad freatomagmática. No se tiene evidencia de ocurrencia de actividad magmática hacia el final de la erupción, pero por literatura de piensa que es altamente probable.

Existe además una etapa post maar, que comprende un flujo piroclástico de tipo bloque y cenizas, el cual ocurre cuando los depósitos del maar estaban aún en estado plástico (figura 51).

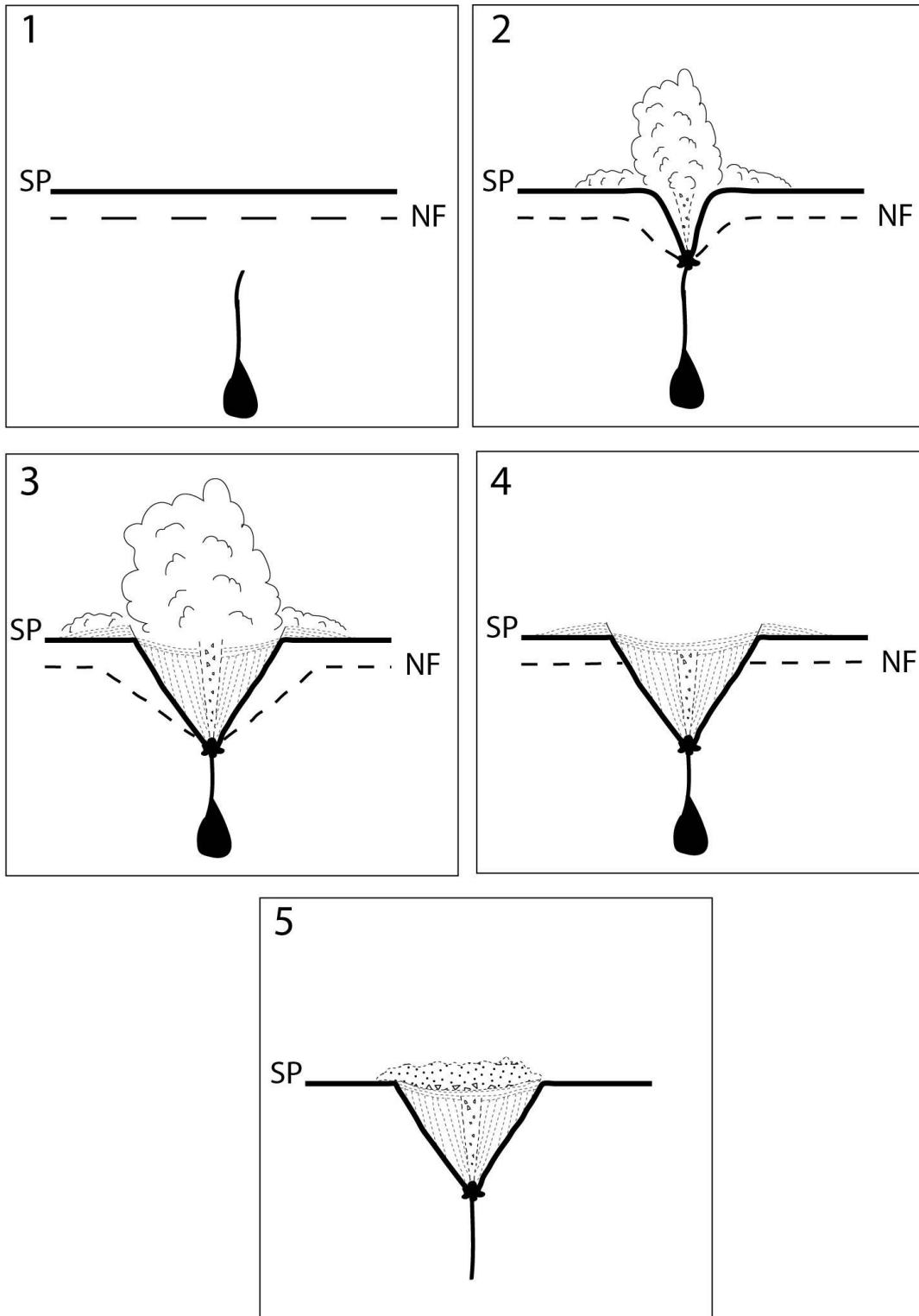


Figura 51. Reconstrucción evolución eruptiva, centro eruptivo Michacollo.

### 6.5.2 Reconstrucción eruptiva Maar Lliza

1° etapa: de características netamente freatomagmáticas, la cual se causa por el ascenso del magma a través de un conducto vertical y la interacción con el agua subterránea, con la subsecuente formación de un cráter y eyección de material piroclástico. La roca de caja se caracteriza por presentar características basálticas (figura 52).

2° etapa: de características netamente magmáticas. Con el cese de la inyección de agua al sistema, la erupción adquiere características magmáticas, lo que produce la formación de una colada de lava AA y un cono de escoria (figura 52-4).

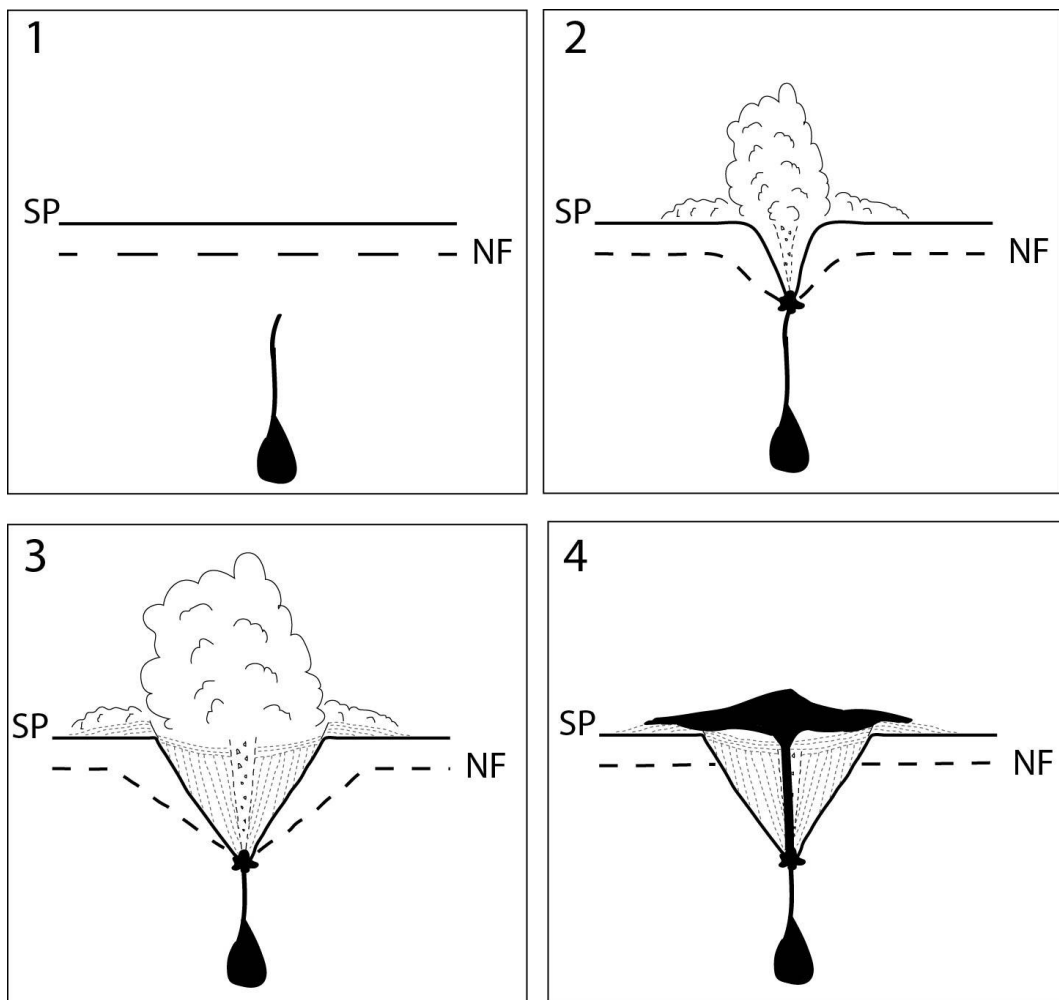


Figura 52. Reconstrucción evolución eruptiva, centro eruptivo Lliza.

## 6.6 CONSIDERACIONES FINALES

En todos los niveles descritos para ambos centros volcánicos, se observó una baja vesicularidad de los juveniles, alrededor del 5%, lo que es indicación de que la liberación explosiva de los volátiles magmáticos desempeñó un papel limitado en el comportamiento eruptivo y que gran parte de la energía de la erupción provino de la conversión de agua externa en vapor (Schmincke, 1977).

A lo largo de todo el depósito se tiene la presencia de fragmentos densos de vidrio con fracturamiento perlítico, lo que sería clara indicación de que el magma estuvo en contacto con el agua. El porcentaje de estos cambia constantemente a medida que se sube en la columna estratigráfica, lo que quizás se correlacionaría a cambios en el grado de interacción del agua-magma.

Se esperaría encontrar lapilli acrecional en los depósitos, dado que es típico de los depósitos de erupción freatomagmática, ya que son una evidencia fuerte de la presencia de agua en el sistema de transporte (Lorenz, 1973), pero en ningún nivel se pudo observar. Se desconoce el motivo y sería provechoso estudiar a futuro las posibles causas.

En el análisis de componentes resalta el lítico gris oscuro, siendo clasificado como lítico andesítico, el cual, dado el contexto geológico en el que se produce el centro eruptivo, correspondería a la roca de caja, la cual fue fracturada en el momento de la explosión y arrastrada hacia la superficie. La unidad geológica que podría conformar el suelo pre-eruptivo, definida por García et al (2004), es la unidad informal "Volcanes y Remanentes de Volcanes del Mioceno Inferior" (Miv). Las rocas que conforman la unidad son predominantemente lavas andesíticas y dacíticas, de color oscuro y textura porfídica con fenocristales de plagioclasa, orto y clinopiroxeno.

Con respecto al magma participante en las erupciones de Michacollo, la presencia de feldespatos, cuarzo y biotita en los cortes transparentes de las muestras, además de la nula presencia de escorias, indicaría que el magma es de tipo félsico. Se estima, en base a la presencia de los minerales antes mencionados, que el magma participante posee un porcentaje de SiO<sub>2</sub> mayor al 60%, correspondiente a una dacita-riolita.

En cambio, con respecto al magma participante en las erupciones de Lliza, la presencia de abundantes escorias, piroxeno y plagioclasa observados en los cortes transparentes indicaría que el magma es de tipo andesito-basáltico.

Finalmente, con respecto al acuífero participante en las erupciones, dada la poca información que se tiene sobre la hidrología de la zona durante el Mioceno, se propone la teoría de la existencia de un acuífero fracturado, ya que se observa una predominancia de líticos andesíticos a lo largo de todos los niveles del maar Michacollo. Esto permite proponer que el foco de las explosiones ocurrió en una zona



dominada por lavas de esa composición (roca de caja) y se asume que la única forma que esas rocas podrían tener cierta cantidad de agua atrapada sería por medio de las fracturas que las contiene (Cano y Carrasco, 2008).

En un medio poroso el agua se mueve despacio siguiendo un flujo laminar, pero en un medio fracturado se comporta como un flujo turbulento, aumentando la velocidad del flujo después de las primeras explosiones (Wohletz-Heiken, 1992). Por lo tanto, se asume que las primeras explosiones aumentaron la fragmentación del sustrato rocoso facilitando el flujo y por consiguiente el aporte de agua al sistema agua-magma logrando una mezcla optima hacia el final, reflejándose en erupciones más explosivas lo que también expresa mayor aporte de material juvenil (Puente-Solís, 2004).

## 7. CONCLUSIONES

El estudio detallado de la estratigrafía permitió proponer que el maar Michacollo se desarrolló a través de 5 episodios explosivos, en donde ocurren alternancia de pulsos muy energéticos con un grado de fragmentación muy eficiente originando depósitos de grano muy fino con laminación paralela muy delgada y pulsos de menor energía con un tamaño de grano grueso con laminación paralela de mayor espesor.

Las erupciones freatomagmáticas ocurren en forma de pulsos recurrentes que van agotando de manera temporal el abasto del agua, dando lugar al eventual ascenso de magma que llega hasta la superficie, sin una aparente interacción con el acuífero. Cabe destacar que el desarrollo y morfología de los volcanes tipo maar dependerá del sistema de aporte magmático, de la velocidad de ascenso, composición, temperatura y viscosidad (Wohletz y Sheridan, 1983). Pero por otra parte, el tipo de acuífero influenciará en gran parte el o los estilos eruptivos que se presenten (Lorenz, 2003).

Se recomienda realizar una caracterización geoquímica e isotópica para conocer las características petrogenéticas del magma involucrado en el vulcanismo de ambos centros eruptivos.

Los depósitos del mar Michacollo se han emplazados a través de diferentes mecanismos eruptivos asociados principalmente a oleadas basales y caída de lapilli.

El magma participante en el ciclo eruptivo de Michacollo tenía características riolíticas a dacíticas, y su evolución presentó cinco etapas eruptivas, en donde ocurrieron secuencias alternadas de flujos piroclásticos y caída de tefra. Los mecanismos de formación de la estructura del maar de Michacollo supone un abatimiento progresivo del nivel freático conforme avanza la erupción (Lorenz, 1986).

La roca de caja que conforma el suelo pre-eruptivo consiste en una unidad de lavas andesíticas, la cual se define como la unidad informal propuesta por García et al. (2004), "Volcanes y Remanentes de Volcanes del Mioceno Inferior".

El agua que participó en la erupción hidromagmática fue exclusivamente de tipo subterránea, proveniente de un acuífero fracturado contenido en la unidad de lavas andesíticas.

Por otro lado, el maar de Lliza presenta características monogenéticas, y a diferencia de Michacollo, el magma participante tenía características basálticas.

Las erupciones freatomagmáticas ocurren en forma de pulsos recurrentes que van agotando de manera temporal el abasto del agua, dando lugar al eventual ascenso de magma que llega hasta la superficie, sin una aparente interacción con el acuífero, formando así depósitos de lava AA y posteriormente el cono de escoria.

Para futuros estudios de los centros volcánicos Michacollo y Lliza, se recomienda realizar análisis químicos, para obtener certeramente el tipo de magma y el contenido de agua que participo en la erupción.

Finalmente, es importante destacar que la edad de los maares (Miocénica Superior) no implica riegos a la población que habita o circula por la zona.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

**Cano, M.; Carrasco, G. (2008).** Evolución de un cráter de explosión rilitico (maar): Hoya de Estrada, campo volcánico Valle de Santiago, Guanajuato, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 25(3), 549-564

**Carey, S. N. (1991).** Transport and deposition of tephra by pyroclastic flows and surges. *Sedimentation in volcanic Settings*, SEPM Special Publication 45, 39-57.

**Cas, R.; Wright, J. V. (1987).** Volcanic successions modern and ancient: A geological approach to processes, products and successions. Springer Science & Business Media.

**Clavero, J.E.; Sparks, R.S.J.; Polanco, E.; Pringle, M. (2004).** Evolution of Parinacota volcano, Central Andes, northern Chile. *Revista Geológica de Chile* 31(2): 317-347.

**Clavero, J.; Droguett, B.; Quiroga, R.; Álvarez, P. (2018).** Carta lago Chungará, región de Arica y Parinacota. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 194, p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

**Fisher, R. V.; Waters, A. C. (1970).** Base surge bed forms in maar volcanoes. *American Journal of Science*, 268(2), 157-180.

**Fisher, R. V.; Schmincke, H. U. (1984).** *Pyroclastic rocks*, 472 pp. Springer, Berlin, 178-193.

**Folk, R. L.; Ward, W. C. (1957).** Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1), 3-26.

**García, M.; Gardeweg, M.; Clavero, J.; Hérail, G. (2004).** Hoja Arica, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 84, 150 p., 1 mapa escala 1:250.000.

**González, O. (1995).** *Volcanes de Chile*. Instituto Geográfico Militar, 541 p. Santiago, Chile.

**Hora, J. M., Singer, B.S., Wörner, G. (2007).** Volcano evolution and eruptive flux on the thick crust of the Andean Central Volcanic Zone:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  constraints from Volcán Parinacota, Chile. *Geological Society of America Bulletin* 119: 343-362.

**Jicha, B.R.; Laabs, B.J.C.; Hora, J.M.; Singer, B.S.; Caffee, M.W. (2015).** Early Holocene collapse of Volcán Parinacota, central Andes, Chile: Volcanological and paleohydrological consequences. *Geological Society of America Bulletin* 11-12(127).

**Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M. J., Bonin, B., Bateman, P., Lameyre, J. A. (2002).** Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge University Press.

**Lorenz, V. (1973).** On the formation of maars. *Bulletin volcanologique*, 37(2), 183-204.

**Lorenz, V. (1986).** On the growth of maars and diatremes and its relevance to the formation of tuff rings. *Bulletin of volcanology*, 48(5), 265-274.

**Lorenz, V. (2003).** Maar-diatreme volcanoes, their formation, and their setting in hard-rock or soft-rock environments. *Geolines*, 15, 72-83.

**Lorenz, V. (2007).** Syn-and post-eruptive hazards of maar–diatreme volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 159(1-3), 285-312.

**Moore, J. G. (1967).** Base surge in recent volcanic eruptions. *Bulletin volcanologique*, 30(1), 337.

**Morrissey, M. (2000).** Phreatomagmatic fragmentation. *Encyclopedia of volcanoes*, 431-445.

**Pardo, N. (2008).** Estratigrafía e historia eruptiva del Maar Asososca, Nicaragua. Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

**Pettijohn, F. J., Potter, P. E., Siever, R. (1987).** Sand and Sandstone. Springer-Verlag, New York, Segunda edición.

**Puente-Solís, I. (2004).** Estratigrafía e historia eruptiva del cráter de explosión Hoya Cíntora, Gto.: Universidad Autónoma de San Luis Potosí (Doctoral dissertation, Tesis profesional, 107 p).

**Schmincke, H. U. (1977).** Eifel-Vulkanismus östlich des Gebietes Rieden-Mayen. *Fortschritte der Mineralogie*, 55, 1-31.

**Schmincke, H. U. (2004).** *Volcanism* (Vol. 28). Springer Science & Business Media.

**Stern, C.R. (2004).** Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 31, No. 2, p. 161-206.

**Valentine, G. A. (1987).** Stratified flow in pyroclastic surges. *Bulletin of Volcanology*, 49(4), 616-630.

- Valentine, G. A., White, J. D. (2012).** Revised conceptual model for maar-diatremes: Subsurface processes, energetics, and eruptive products. *Geology*, 40(12), 1111-1114.
- Walker, G. P. (1971).** Grain-size characteristics of pyroclastic deposits. *The Journal of Geology*, 79(6), 696-714.
- Walker, G. P. L., Croasdale, R. (1971).** Characteristics of some basaltic pyroclastics. *Bulletin volcanologique*, 35(2), 303-317.
- White, J. D., Ross, P. S. (2011).** Maar-diatreme volcanoes: a review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201(1), 1-29.
- Wohletz, K. H. (1986).** Explosive magma-water interactions: Thermodynamics, explosion mechanisms, and field studies. *Bulletin of Volcanology*, 48(5), 245-264.
- Wohletz, K., Heiken, G. (1992).** *Volcanology and geothermal energy* (Vol. 432). Berkeley: University of California press.
- Wohletz, K. H., Sheridan, M. F. (1983).** Hydrovolcanic explosions; II, Evolution of basaltic tuff rings and tuff cones. *American Journal of Science*, 283(5), 385-413.
- Wörner, G.; Hammerschmidt, K.; Henjes-Kunst, F.; Lezaun, J.; Wilke, H. (2000).** Geochronology (Ar-Ar, K-Ar, and He-exposure ages) of Cenozoic magmatic rocks from northern Chile (18-22°S): implications for magmatism and tectonic evolution of the central Andes. *Revista Geológica de Chile* 27(2): 205-240.
- Zimanowski, B., Büttner, R., Lorenz, V., Häfele, H. G. (1997).** Fragmentation of basaltic melt in the course of explosive volcanism. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B1), 803-814.

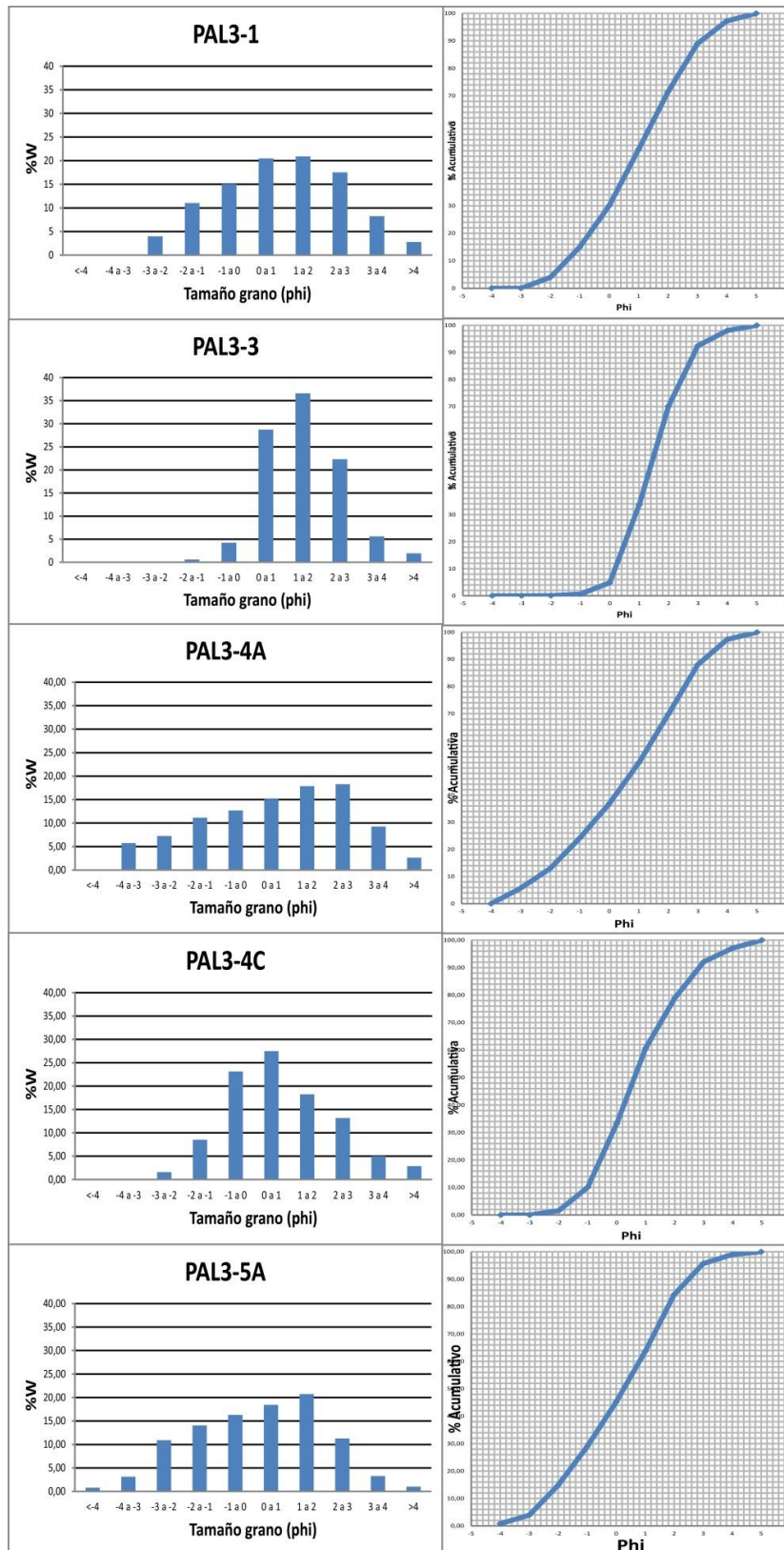
## 9. Anexos

### Anexo A: Ubicación de Muestras

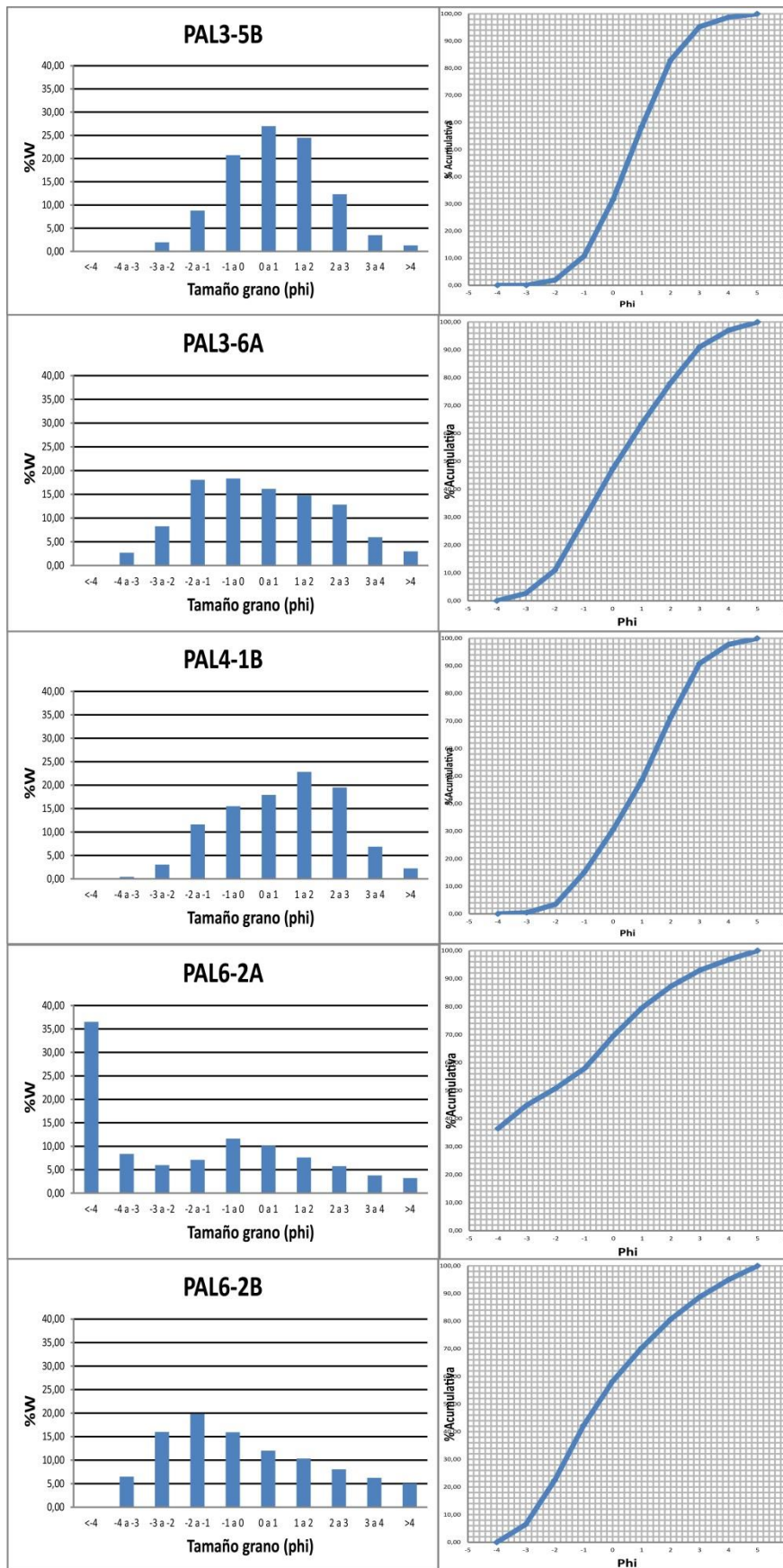
Código Muestra	Fecha Control	Coord. UTM X	Coord. UTM Y
PAL3-1	28-01-2017	465327	7983181
PAL3-2A	28-01-2017	465327	7983181
PAL3-2B	28-01-2017	465327	7983181
PAL3-3	28-01-2017	465327	7983181
PAL3-4A	28-01-2017	465327	7983181
PAL3-4B	28-01-2017	465327	7983181
PAL3-4C	28-01-2017	465327	7983181
PAL3-5A	28-01-2017	465327	7983181
PAL3-5B	28-01-2017	465327	7983181
PAL3-5C	28-01-2017	465327	7983181
PAL3-6A	28-01-2017	465327	7983181
PAL4-1A	29-01-2017	465226	7983100
PAL3-6B	28-01-2017	465327	7983181
PAL4-1B	29-01-2017	465226	7983100
PAL6-2A	30-01-2017	478136	7956880
PAL6-2B	30-01-2017	478136	7956880
PAL6-2C	30-01-2017	478136	7956880
PAL6-3A	30-01-2017	478136	7956880
PAL6-4	31-01-2017	465353	7983138
PAL3-7A	28-01-2017	465327	7983181
PAL3-7B	28-01-2017	465327	7983181
PAL3-7C	28-01-2017	465327	7983181
PAL8-1	31-01-2017	465304	7983194
PAL3-8A	28-01-2017	465327	7983181
PAL5-1	30-01-2017	478389	7955910
PAL6-1	31-01-2017	465353	7983138

## Anexo B: Análisis Granulométrico

Histogramas de porcentaje en peso según tamaño y curva de frecuencia acumulada, centro eruptivo Michacollo.







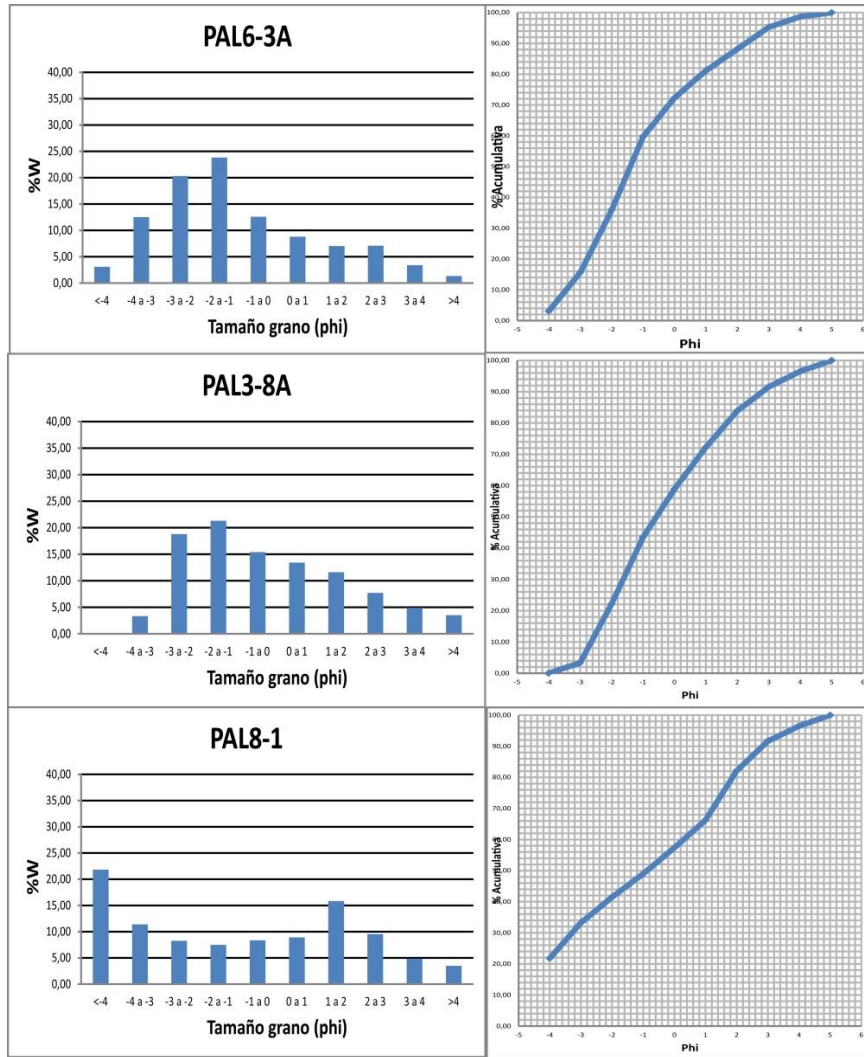


Tabla de tamizaje de las muestras, en donde se incluye el porcentaje perdido

Muestras	Peso inicial (g)	Phi -4 (g)	Phi -3 (g)	Phi -2 (g)	Phi -1 (g)	Phi 0 (g)	Phi 1 (g)	Phi 2 (g)	Phi 3 (g)	Phi 4 (g)	Phi >4 (g)	Peso final (g)	Porcentaje perdido
PAL3-1	286,9	0,0	0,0	11,3	31,4	42,8	58,2	59,4	49,8	23,4	7,9	284,2	1,0
PAL3-3	255,1	0,0	0,0	0,1	1,5	10,7	72,9	92,8	56,6	14,2	4,9	253,7	0,5
PAL3-4A	165,9	0,0	9,4	11,8	18,2	20,7	24,6	29,1	29,8	15,1	4,3	163,0	1,8
PAL3-4C	242,8	0,0	0,0	3,9	20,6	55,8	66,3	44,0	31,8	12,1	7,0	241,5	0,5
PAL3-5A	1523,0	12,2	49,4	165,9	213,8	247,6	280,1	315,2	171,5	50,1	15,4	1521,2	0,2
PAL3-5B	655,5	0,0	0,0	12,7	57,1	135,0	175,5	159,0	79,9	22,6	8,3	650,1	0,9
PAL3-6A	886,9	0,0	23,9	73,1	159,6	162,1	142,8	130,5	113,6	52,9	26,5	885,0	0,2
PAL4-1B	640,2	0,0	2,8	19,5	59,4	98,9	114,4	145,5	124,4	43,8	14,4	623,2	0,4
PAL6-2A	468,6	170,4	39,0	27,8	17,2	31,2	47,1	35,4	26,8	17,6	15,1	427,5	0,5
PAL6-2B	180,5	0,0	11,6	28,6	18,5	16,1	21,5	18,5	14,4	11,2	9,0	149,5	0,9
PAL6-3A	218,1	6,6	26,9	43,6	45,7	27,0	18,9	15,1	15,2	7,3	2,9	209,2	1,6
PAL8-1	278,6	59,9	31,3	22,7	20,6	23,0	24,5	43,5	26,2	13,3	9,6	274,5	1,5
PAL3-8A	152,2	0,0	5,0	28,3	32,1	23,2	20,2	17,5	11,6	7,4	5,3	150,6	1,0

## Anexo C: Análisis de Componentes

**Tabla C.1:** Peso en gramos de componentes separados muestra PAL3-1

Tamaño Componentes	-4	-3	-2	-1	0	1
Juvenil	0,000	0,000	6,870	28,490	35,360	44,590
Lítico gris oscuro	0,000	0,000	0,390	1,140	1,690	2,410
Lítico rojizo	0,000	0,000	0,000	0,120	0,840	3,380
Lítico cx	0,000	0,000	4,040	1,490	1,130	1,380
Lítico café	0,000	0,000	0,000	0,130	0,180	0,440
Cx Qzo	0,000	0,000	0,000	0,000	3,580	5,910
Cx Bt	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,030

**Tabla C.2:** Peso en gramos de componentes separados muestra PAL3-3

Tamaño Componentes	-4	-3	-2	-1	0	1
Juvenil	0,000	0,000	0,000	0,853	2,788	34,758
Lítico gris oscuro	0,000	0,000	0,140	0,209	2,776	6,717
Lítico rojizo	0,000	0,000	0,000	0,168	1,052	4,713
Lítico cx	0,000	0,000	0,000	0,208	1,809	2,682
Lítico café	0,000	0,000	0,000	0,000	0,373	3,697
Cx Qzo	0,000	0,000	0,000	0,059	1,902	20,333
Cx Bt	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**Tabla C.3:** Peso en gramos de componentes separados muestra PAL3-4C

Tamaño Componentes	-4	-3	-2	-1	0	1
Juvenil	0,000	0,000	2,554	15,458	40,633	33,234
Lítico gris oscuro	0,000	0,000	0,000	1,346	4,119	4,183
Lítico rojizo	0,000	0,000	0,000	0,458	1,050	3,492
Lítico cx	0,000	0,000	1,314	3,322	6,259	6,369
Lítico café	0,000	0,000	0,000	0,000	1,366	1,367
Cx Qzo	0,000	0,000	0,000	0,000	2,404	17,687
Cx Bt	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**Tabla C.4:** Peso en gramos de componentes separados muestra PAL3-4A

Tamaño Componentes	-4	-3	-2	-1	0	1
Juvenil	0,000	3,533	7,074	13,828	12,781	12,059
Lítico gris oscuro	0,000	0,000	0,339	0,443	0,857	1,156
Lítico rojizo	0,000	0,000	0,298	0,078	0,273	0,961
Lítico cx	0,000	5,816	3,988	3,852	6,467	1,422
Lítico café	0,000	0,000	0,000	0,000	0,082	0,249
Cx Qzo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,240	8,680
Cx Bt	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,071

**Tabla C.5:** Peso en gramos de componentes separados muestraPAL3-5B

Tamaño Componentes	-4	-3	-2	-1	0	1
Juvenil	0,000	0,000	11,450	39,370	91,322	94,217
Lítico gris oscuro	0,000	0,000	1,260	1,885	8,346	6,726
Lítico rojizo	0,000	0,000	0,000	0,497	5,081	10,829
Lítico cx	0,000	0,000	0,000	15,316	26,470	39,270
Lítico café	0,000	0,000	0,000	0,000	0,211	0,274
Cx Qzo	0,000	0,000	0,000	0,041	3,520	24,167
Cx Bt	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**Tabla C.6:** Peso en gramos de componentes separados muestraPAL3-5A

Tamaño Componentes	-4	-3	-2	-1	0	1
Juvenil	4,910	31,200	128,406	159,342	159,908	159,665
Lítico gris oscuro	0,000	0,000	1,760	19,869	24,319	13,504
Lítico rojizo	0,000	1,690	1,440	3,329	11,089	17,586
Lítico cx	7,300	14,840	30,614	30,286	29,554	23,998
Lítico café	0,000	0,000	1,670	0,973	6,143	8,662
Cx Qzo	0,000	0,000	0,000	0,000	16,587	56,187
Cx Bt	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,497

**Tabla C.7:** Peso en gramos de componentes separados muestraPAL4-1B

Tamaño Componentes	-4	-3	-2	-1	0	1
Juvenil	0,000	2,810	12,290	37,324	62,627	74,545
Lítico gris oscuro	0,000	0,000	0,000	2,369	6,728	5,682
Lítico rojizo	0,000	0,000	0,890	0,668	2,995	3,761
Lítico cx	0,000	0,000	6,357	19,066	17,569	14,576
Lítico café	0,000	0,000	0,000	0,000	8,280	2,680
Cx Qzo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,700	13,156
Cx Bt	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**Tabla C.8:** Peso en gramos de componentes separados muestra PAL3-6A

Tamaño Componentes	-4	-3	-2	-1	0	1
Juvenil	0,000	22,752	69,711	142,945	126,712	104,736
Lítico gris oscuro	0,000	0,000	1,781	5,275	6,422	3,490
Lítico rojizo	0,000	0,000	0,712	4,399	6,328	3,997
Lítico cx	0,000	1,120	0,922	3,279	14,799	6,716
Lítico café	0,000	0,000	0,000	3,702	1,186	1,481
Cx Qzo	0,000	0,000	0,000	0,000	6,346	21,791
Cx Bt	0,000	0,000	0,000	0,000	0,307	0,588

**Tabla C.9:** Peso en gramos de componentes separados muestra PAL6-2B

<b>Tamaño Componentes</b>	-4	-3	-2	-1	0	1
Juvenil	0,000	8,320	22,240	13,765	11,039	12,753
Lítico gris oscuro	0,000	0,000	0,790	1,395	0,508	0,586
Lítico rojizo	0,000	0,000	1,720	1,989	2,070	1,516
Lítico cx	0,000	3,280	0,650	0,656	0,417	0,637
Lítico café	0,000	0,000	0,000	0,468	0,455	1,242
Cx Qzo	0,000	0,000	0,000	0,267	1,610	4,750
Cx Bt	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,016

**Tabla C.10:** Peso en gramos de componentes separados muestra PAL6-2A

<b>Tamaño Componentes</b>	-4	-3	-2	-1	0	1
Juvenil	40,891	11,400	16,130	11,665	21,026	31,535
Lítico gris oscuro	11,440	2,990	1,670	0,594	1,542	1,263
Lítico rojizo	70,560	3,460	3,380	0,940	2,579	2,345
Lítico cx	29,980	21,130	3,410	2,460	1,402	1,484
Lítico café	17,349	0,000	3,230	1,189	1,369	2,550
Cx Qzo	0,000	0,000	0,000	0,357	3,244	7,953
Cx Bt	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**Tabla C.11:** Peso en gramos de componentes separados muestra PAL6- 3A

<b>Tamaño Componentes</b>	-4	-3	-2	-1	0	1
Juvenil	0,000	2,650	6,530	17,292	9,275	5,916
Lítico gris oscuro	0,000	3,360	8,370	1,770	4,139	1,445
Lítico rojizo	0,000	5,650	1,827	4,785	4,044	1,308
Lítico cx	6,630	15,190	23,300	15,461	2,413	4,550
Lítico café	0,000	0,000	3,564	5,615	1,066	0,911
Cx Qzo	0,000	0,000	0,000	0,790	6,074	4,771
Cx Bt	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

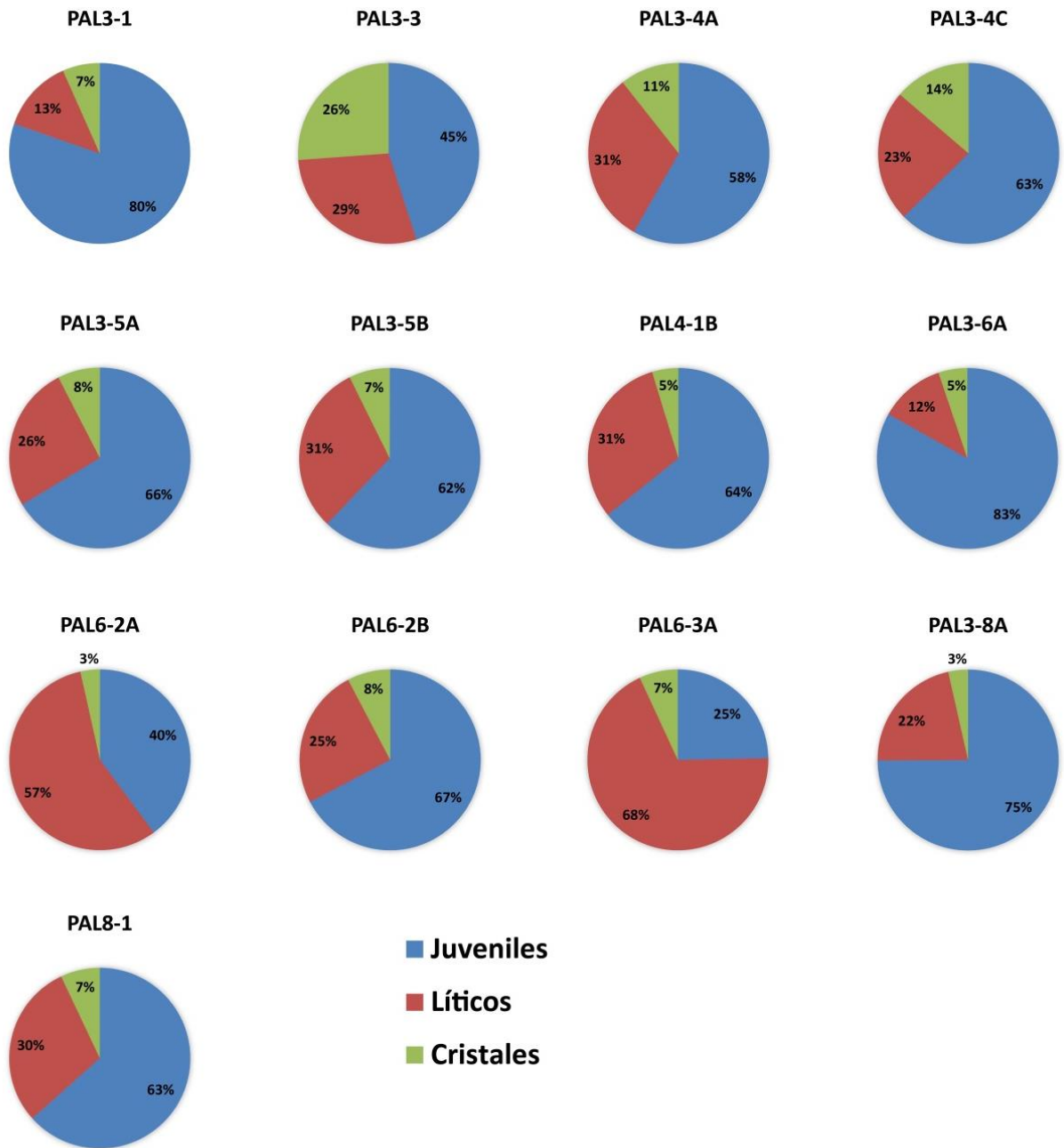
**Tabla C.12:** Peso en gramos de componentes separados muestraPAL3- 8A

<b>Tamaño Componentes</b>	-4	-3	-2	-1	0	1
Juvenil	0,000	1,840	16,830	28,677	19,511	14,677
Lítico gris oscuro	0,000	3,170	9,340	2,841	1,019	0,803
Lítico rojizo	0,000	0,000	1,150	0,268	0,702	0,547
Lítico cx	0,000	0,000	0,980	0,313	0,706	0,575
Lítico café	0,000	0,000	0,000	0,000	0,570	0,455
Cx Qzo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,691	3,142
CxBt	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**Tabla C.13:** Peso en gramos de componentes separados muestraPAL8-1

<b>Tamaño Componentes</b>	-4	-3	-2	-1	0	1
Juvenil blanquesino	45,340	6,290	6,800	5,488	5,341	5,633
Juvenil gris	8,590	13,850	9,020	5,914	2,402	0,630
Lítico gris oscuro	0,000	5,030	1,210	2,366	2,871	0,682
Lítico rojizo	5,960	3,820	2,160	2,437	2,871	2,945
Lítico cx	0,000	2,310	3,430	3,288	2,987	4,540
Lítico café	0,000	0,000	0,000	0,189	3,884	0,849
Cx Qzo	0,000	0,000	0,000	0,710	2,284	7,820
Cx Ortoclasa	0,000	0,000	0,080	0,189	0,350	1,350

**Figura C.1.** Porcentaje de componentes para cada muestra tamizada centro eruptivo Michacollo





## Anexo D: Análisis de Angulosidad de Componentes

**Tabla D.1:** Peso en gramos de componentes separados por angulosidad muestra PAL3-1

	PAL3-1	Juvenil	L. gris	L. rojizo	L. cristalino	L. rosado	Cristales
-4	A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-3	A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-2	A	0,511	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	4,050	0,209	0,000	2,973	0,000	0,000
	SR	2,309	0,181	0,000	1,067	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-1	A	1,017	0,147	0,000	0,541	0,068	0,000
	SA	25,488	0,730	0,120	0,728	0,062	0,000
	SR	1,986	0,262	0,000	0,221	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0	A	0,822	0,068	0,100	0,061	0,000	0,000
	SA	30,831	1,409	0,676	0,941	0,180	3,580
	SR	3,707	0,213	0,064	0,128	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**A: anguloso, SA: sub-anguloso, SR: sub-redondeado, R: redondeado**

**Tabla D.2:** Peso en gramos de componentes separados por angulosidad muestra PAL3-3

	PAL3-3	Juvenil	L. gris	L. rojizo	L. cristalino	L. rosado	Cristales
-4	A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-3	A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-2	A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	0,000	0,140	0,000	0,000	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-1	A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	0,719	0,209	0,168	0,208	0,000	0,059
	SR	0,134	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0	A	0,145	0,517	0,171	0,283	0,038	0,255
	SA	2,446	2,100	0,839	1,357	0,283	1,579
	SR	0,197	0,159	0,042	0,168	0,052	0,068
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**A: anguloso, SA: sub-anguloso, SR: sub-redondeado, R: redondeado**

**Tabla D.3:** Peso en gramos de componentes separados por angulosidad muestra PAL3-4C

	PAL3-4C	Juvenil	L. gris	L. rojizo	L. cristalino	L. rosado	Cristales
-4	A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-3	A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-2	A	0,411	0,000	0,000	0,684	0,000	0,000
	SA	2,143	0,000	0,000	0,631	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-1	A	4,075	0,221	0,000	1,052	0,066	0,000
	SA	10,760	1,125	0,458	2,270	0,066	0,000
	SR	0,623	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0	A	32,889	0,966	0,286	1,954	0,779	0,901
	SA	7,098	3,153	0,765	4,116	0,586	1,503
	SR	0,645	0,000	0,000	0,190	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**A: anguloso, SA: sub-anguloso, SR: sub-redondeado, R: redondeado**

**Tabla D.4:** Peso en gramos de componentes separados por angulosidad muestra PAL3-4A

	PAL3-4A	Juvenil	L. gris	L. rojizo	L. cristalino	L. rosado	Cristales
-4	A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-3	A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	3,533	0,000	0,000	5,816	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-2	A	3,390	0,339	0,000	2,546	0,000	0,000
	SA	3,684	0,000	0,298	1,442	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-1	A	11,480	0,122	0,000	0,919	0,000	0,000
	SA	1,882	0,321	0,078	2,933	0,000	0,000
	SR	0,466	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0	A	1,576	0,232	0,000	1,443	0,037	0,076
	SA	10,979	0,502	0,273	4,895	0,045	0,164
	SR	0,226	0,123	0,000	0,129	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**A: anguloso, SA: sub-anguloso, SR: sub-redondeado, R: redondeado**

**Tabla D.5:** Peso en gramos de componentes separados por angulosidad muestra PAL3-5A

	PAL3-5A	Juvenil	L. gris	L. rojizo	L. cristalino	L. rosado	Cristales
-4	A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-3	A	4,851	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	26,349	0,000	0,000	14,840	1,687	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-2	A	24,960	0,705	0,584	9,522	0,636	0,000
	SA	103,446	1,055	0,856	23,092	1,034	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-1	A	24,807	3,756	1,025	13,444	0,309	0,000
	SA	134,535	16,113	2,304	16,842	0,664	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0	A	26,196	1,112	1,116	4,245	0,898	3,392
	SA	119,640	23,207	9,973	23,348	5,244	13,195
	SR	14,072	0,000	0,000	1,961	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**A: anguloso, SA: sub-anguloso, SR: sub-redondeado, R: redondeado**

**Tabla D.6:** Peso en gramos de componentes separados por angulosidad muestra PAL3-5B

	PAL3-5B	Juvenil	L. gris	L. rojizo	L. cristalino	L. rosado	Cristales
-4	A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-3	A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-2	A	7,945	0,472	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	3,505	0,788	0,000	0,000	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-1	A	0,000	0,408	0,063	0,000	0,000	0,000
	SA	36,435	1,477	0,434	15,316	0,000	0,041
	SR	2,935	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0	A	0,000	0,154	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	80,389	7,706	3,419	25,844	0,211	3,520
	SR	10,933	0,486	1,662	0,626	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**A: anguloso, SA: sub-anguloso, SR: sub-redondeado, R: redondeado**

**Tabla D.7:** Peso en gramos de componentes separados por angulosidad muestra PAL4-1B

	PAL4-1B	Juvenil	L. gris	L. rojizo	L. cristalino	L. rosado	Cristales
-4	A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-3	A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	2,810	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-2	A	1,880	0,000	0,000	0,829	0,000	0,000
	SA	10,410	0,000	0,890	5,528	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-1	A	0,374	0,340	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	34,198	1,493	0,668	19,066	0,000	0,000
	SR	2,753	0,537	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0	A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,241	0,000
	SA	53,751	6,415	2,995	17,569	7,130	0,700
	SR	8,877	0,313	0,000	0,000	0,909	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**A: anguloso, SA: sub-anguloso, SR: sub-redondeado, R: redondeado**

**Tabla D.8:** Peso en gramos de componentes separados por angulosidad muestra PAL3-6A

	PAL3-6A	Juvenil	L. gris	L. rojizo	L. cristalino	L. rosado	Cristales
-4	A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-3	A	4,684	0,000	0,000	1,120	0,000	0,000
	SA	14,770	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SR	3,297	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-2	A	18,295	0,502	0,122	0,357	0,000	0,000
	SA	51,416	1,279	0,590	0,565	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-1	A	18,509	0,434	0,468	0,274	0,000	0,000
	SA	124,436	4,841	3,931	3,005	3,702	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0	A	23,470	1,398	1,082	2,075	0,000	0,000
	SA	103,243	5,025	5,245	12,723	1,186	6,346
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**A: anguloso, SA: sub-anguloso, SR: sub-redondeado, R: redondeado**



**Tabla D.9:** Peso en gramos de componentes separados por angulosidad muestra PAL6-2A

	PAL6-2A	Juvenil	L. gris	L. rojizo	L. cristalino	L. rosado	Cristales
-4	A	0,000	0,000	70,670	5,605	17,349	0,000
	SA	40,891	11,468	0,000	24,392	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-3	A	6,910	2,990	3,460	12,177	0,000	0,000
	SA	4,490	0,000	0,000	8,953	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-2	A	7,244	1,221	1,093	0,825	0,526	0,000
	SA	8,886	0,326	2,287	2,585	2,704	0,000
	SR	0,000	0,123	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-1	A	3,198	0,217	0,140	0,956	0,193	0,000
	SA	7,526	0,378	0,800	1,504	0,996	0,357
	SR	0,941	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0	A	2,572	0,000	0,457	0,000	0,000	0,555
	SA	17,003	1,542	2,122	1,402	1,369	2,689
	SR	1,451	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**A: anguloso, SA: sub-anguloso, SR: sub-redondeado, R: redondeado**

**Tabla D.10:** Peso en gramos de componentes separados por angulosidad muestra PAL6-2B

	PAL6-2B	Juvenil	L. gris	L. rojizo	L. cristalino	L. rosado	Cristales
-4	A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-3	A	6,748	0,000	0,000	3,280	0,000	0,000
	SA	1,572	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-2	A	4,056	0,000	1,283	0,358	0,370	0,000
	SA	18,184	0,790	0,437	0,292	2,850	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-1	A	0,541	0,000	1,846	0,000	0,255	0,000
	SA	12,361	1,395	0,143	0,656	0,213	0,267
	SR	0,864	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0	A	0,000	0,000	0,154	0,000	0,000	0,618
	SA	10,755	0,508	1,915	0,417	0,455	0,992
	SR	0,283	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

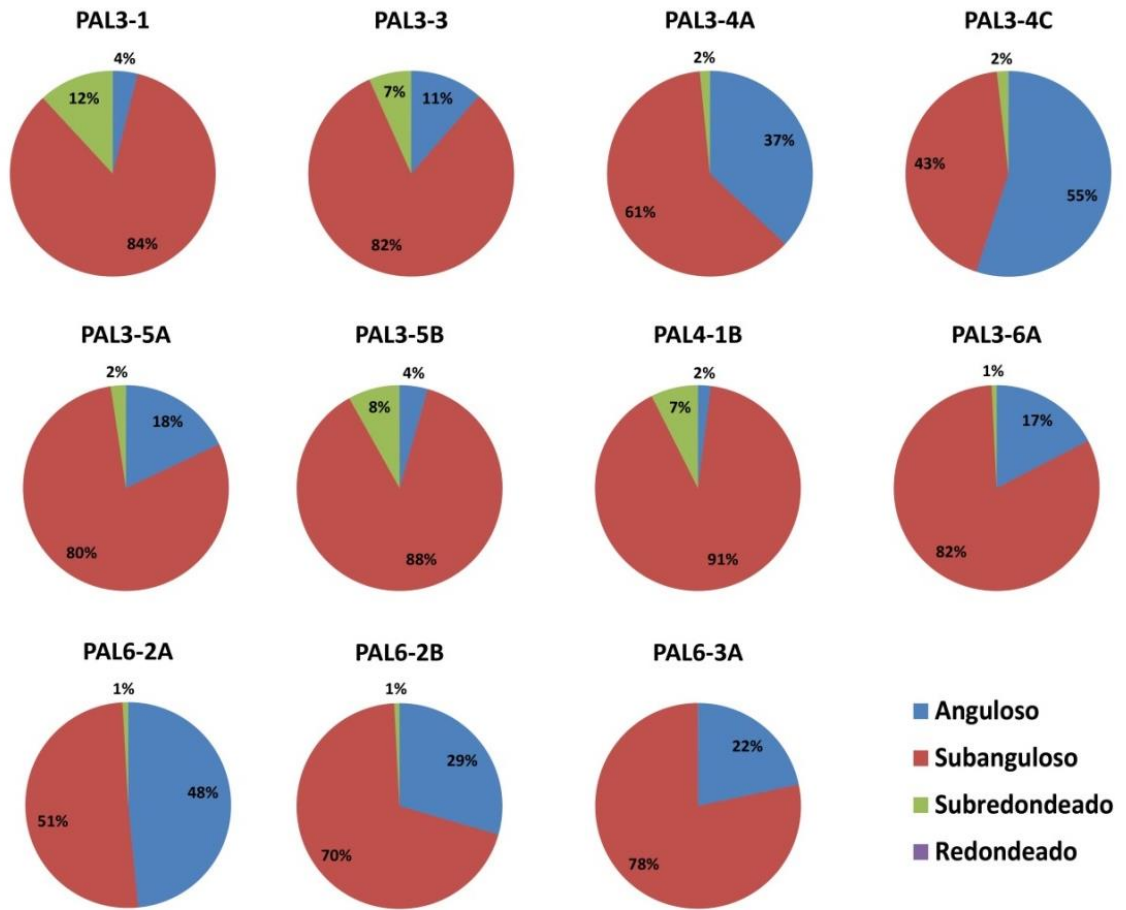
A: anguloso, SA: sub-anguloso, SR: sub-redondeado, R: redondeado

**Tabla D.11:** Peso en gramos de componentes separados por angulosidad muestra PAL6-3A

	PAL3-4A	Juvenil	L. gris	L. rojizo	L. cristalino	L. rosado	Cristales
-4	A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	SA	0,000	0,000	0,000	6,646	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-3	A	0,000	0,000	0,000	8,620	0,000	0,000
	SA	2,650	3,360	5,650	6,570	0,000	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-2	A	2,643	2,660	0,000	4,099	1,718	0,000
	SA	3,887	5,710	1,827	19,201	1,845	0,000
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-1	A	3,552	0,576	0,746	2,186	0,698	0,000
	SA	13,740	1,194	4,039	13,275	4,917	0,790
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0	A	0,893	1,037	0,394	0,670	0,287	1,695
	SA	8,382	3,102	3,650	1,742	0,779	4,379
	SR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	R	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**A: anguloso, SA: sub-anguloso, SR: sub-redondeado, R: redondeado**

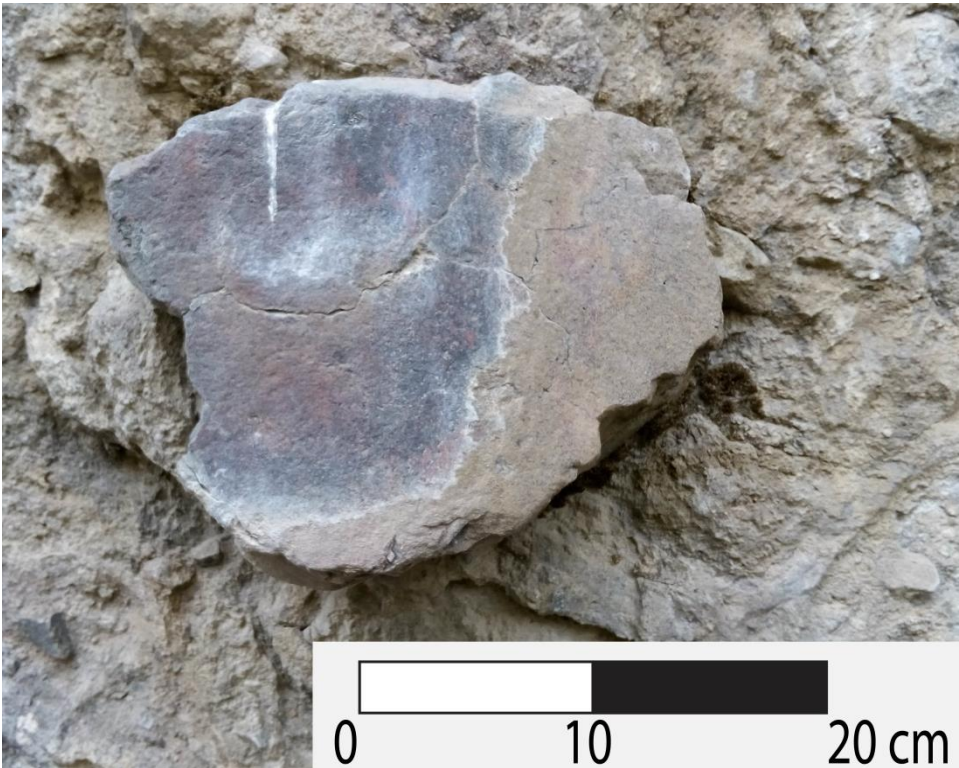
**Figura D.1.** Porcentaje de angulosidad de clastos para muestras del centro eruptivo Michacollo



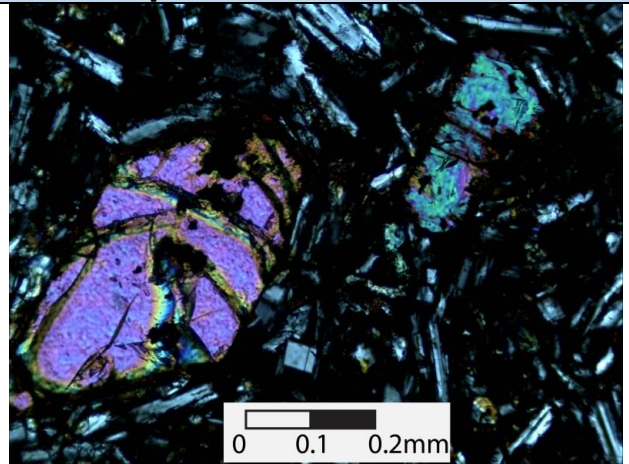
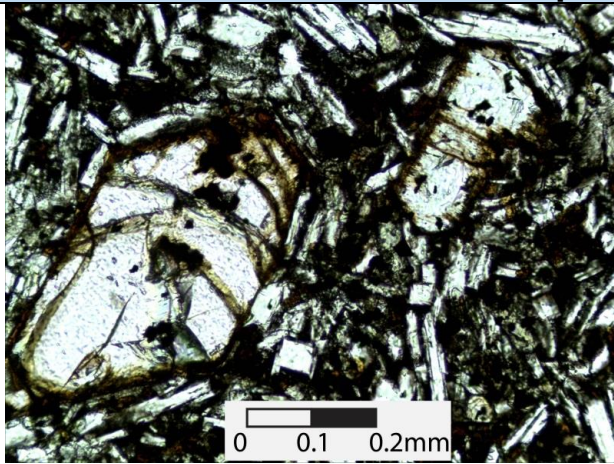
## Anexo E: Análisis Petrográfico

**Tabla E.1:** Descripción petrográfica muestra Block & Ash

Descripción Petrográfica	
Código	PAL3-0
Tipo	Lava
Procedencia	Flujo piroclástico
Ubicación (Coordenadas UTM)	7983201/465293
Clasificación Petrográfica	Basalto/ Andesita Basáltica

Descripción macroscópica
Roca con textura microporfírica dada por fenocristales de plagioclasa y olivino de tamaño menor a 0.5 mm inmersos en masa fundamental microcristalina. Presenta vesículas de hasta 1 mm de diámetro. La superficie presenta tonalidades rojizas debido a oxidación.

<b>Figura E.1:</b> Bloque de lava en una matriz de ceniza.

## Descripción microscópica



**Figura E.2: A)** Imagen a nicoles paralelos de fenocristal de olivino inmerso en masa fundamental compuesta de Plagioclasa y piroxenos, de textura pilotaxítica. **B)** Imagen a nicoles cruzados de fenocristales de olivino.

### Fenocristales (15% del total)

Mineral	% Vol	Modo de ocurrencia
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Olivino</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cristales subhedrales y anhedrales de 0.2 a 0.8 mm de tamaño. Se presentan fracturados y con bordes de reacción de iddingsita.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plagioclasa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cristales subhedrales de 0.2-0.5 mm de tamaño. Se observan maclas de carlsbag.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minerales opacos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cristal opaco, de tamaño 0.01 a 1 mm.</li> </ul>

### Masa fundamental (80% del total)

Agregados de cristales finos (menores a 0.2mm) de plagioclasa (5%), piroxeno (10%) y óxidos de Fe y Ti (20%).

### Texturas

Tipo	Descripción
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porfídica</li> <li>• Pilotaxítica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fenocristales de Olivino y Plagioclasa en masa fundamental cristalina</li> <li>• Masa fundamental con cristales de Plagioclasa dispuestos en forma subparalela. En los intersticios se observa Piroxeno</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bordes de reacción</li> <li>• Sieve</li> <li>• Vesicular</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Iddingsita reemplazando a Olivino</li> <li>• Inclusiones vítreas en Plagioclasa</li> <li>• Vesículas en masa fundamental</li> </ul>

### Estructuras (5% del total)

Vesículas (de hasta 0.4 mm) de bordes irregulares que dan textura vesicular a la roca.

### Observaciones

Los porcentajes reportados son estimaciones observadas desde la preparación del corte transparente, por lo que no reflejan el total de la muestra.

**Tabla E.2:** Descripción petrográfica muestra PAL3-7A

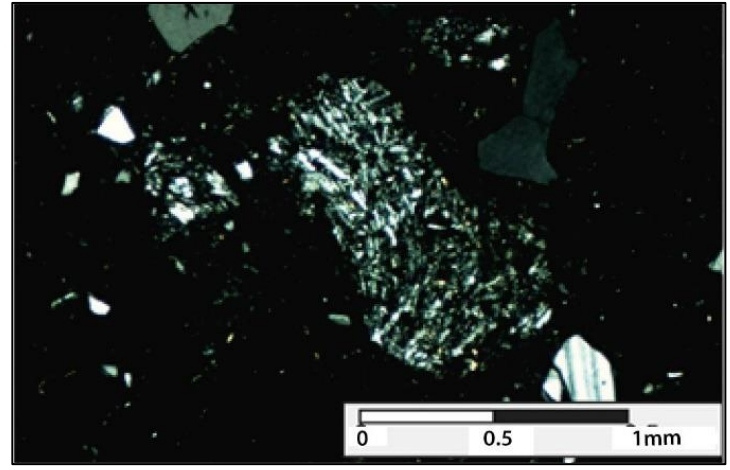
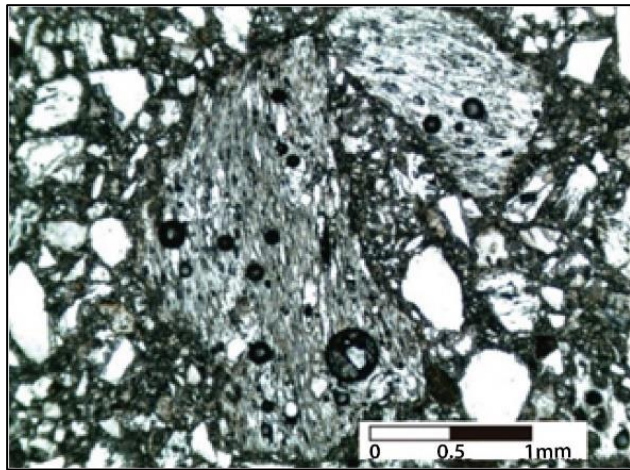
<b>Descripción Petrográfica</b>	
Código	PAL3-7A
Tipo	Flujo piroclástico
Procedencia	Maar Michacollo
Ubicación (Coordenadas UTM)	7983181/465327
Clasificación Petrográfica	Toba cristalina

<b>Descripción macroscópica</b>
Roca con textura piroclástica en donde se observan fragmentos mayores tamaño lapilli grueso a lapilli fino de pómez, tres tipos de líticos afaníticos y cristales de cuarzo, plagioclasa y biotita, inmersos en una matriz de ceniza media, la cual está conformada por pómez, cristales de biotita y cuarzo, junto a una porción de ceniza fina.



**Figura E.3:** Toba cristalina perteneciente al nivel 10 del centro eruptivo Michacollo

## Descripción microscópica



**Figura E.4:** a) Imagen a nicoles paralela de fragmento de pómez vesiculada y fibrosa. Se observa además la textura fragmentada de la roca, con cristales de cuarzo, plagioclasa y líticos. b) Imagen de lítico andesítico, compuesta por fenocristales plagioclasas inmersos en una masa fundamental vítrea.

### Fragmentos mayores (70% del total)

Tipo	% Vol	Descripción
• Cuarzo	• 15	Cristal blanquesino, subangular y de baja esfericidad. Tamaño varía de 0.4 a 2mm. En algunos granos se distinguen fracturas, sin relleno.
• Plagioclasa	• 10	Cristal blanquesino, euhedral. Tamaño varía de 0.3 a 0.5mm. En algunos cristales se distinguen maclas de carlsbad.
• Opaco	• 4	Cristal opaco. Tamaño varía de 0.3 a 0.4mm.
• Biotita	• 1	Cristal café claro, sob a euhedral. Tamaño varía de 0.3 a 0.4mm. Se encuentra ligeramente alterado.
• Pómez	• 15	Juvenil blanquesino, subangular y de baja esfericidad. Se distinguen vesículas (2%) alargadas, de bordes irregulares, y tamaño variable de 0.5 a 3 mm. Presenta textura porfídica, con fenocristales (2%) de cuarzo subhedrales de aproximadamente 0.3mm y opacos de hasta 0.01mm. La masa fundamental (96%) está formada por vidrio fibroso.
• Lítico andesítico gris	• 10	Componente de color gris, subangular y de alta esfericidad. Tamaño variable de 0.5 a 1.5mm. Presenta textura vitrofírica, con fenocristales (80%) de Plagioclasa (70%) subhedrales desde 0.03 hasta 0.1mm, las cuales se disponen de manera subparalela, opacos (8%) de hasta 0.02 mm y piroxenos (2%) tabulares, de hasta 0.01mm. La masa fundamental (20%) está formada por palagonita.

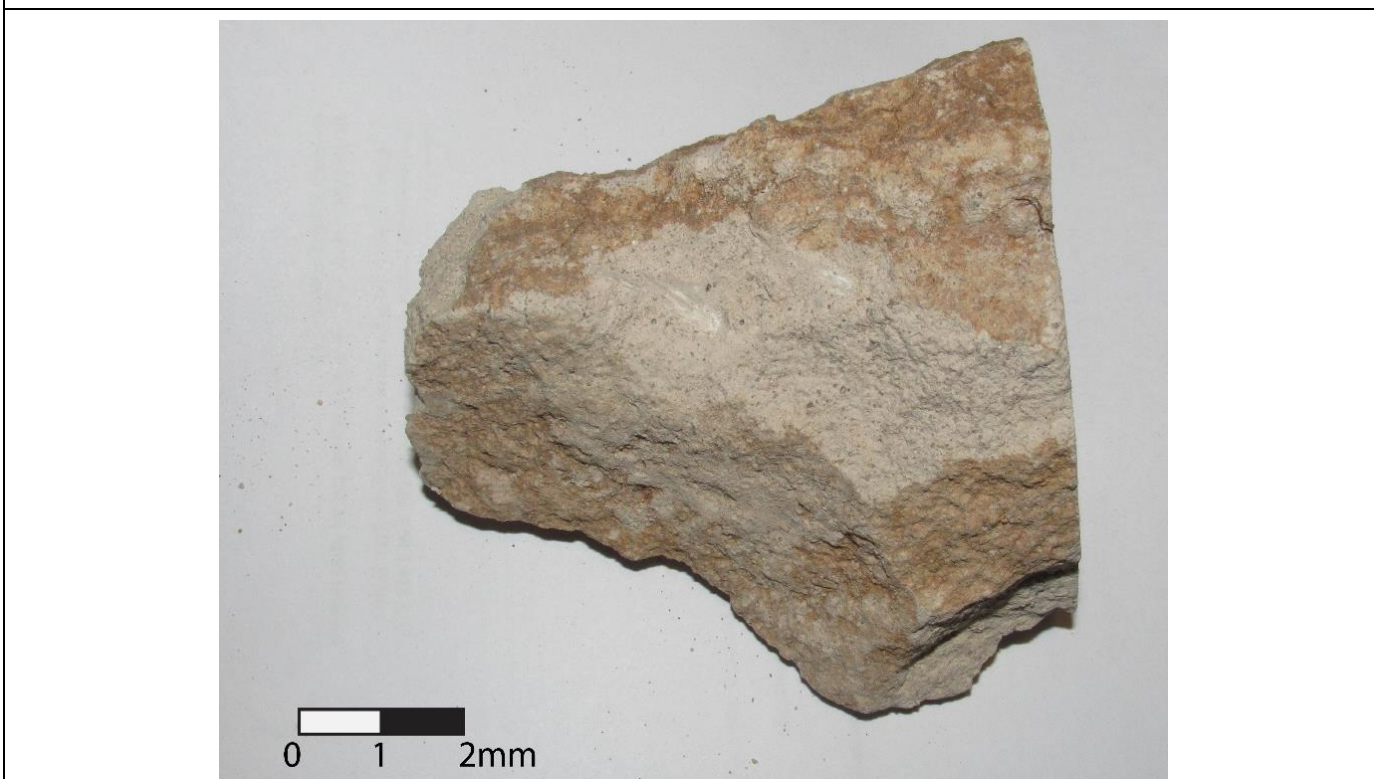


<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lítico andesítico café</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5</li> </ul>	<p>Componente de color café, redondeado y subesférico. Tamaño variable de 0.5 a 2mm. Presenta textura vitrofírica, con fenocristales (10%) de Plagioclasa (8%) subhedral de hasta 0.5mm y cristales opacos (2%). La masa fundamental (90%) está formada por vidrio desvitrificado de color café claro.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lítico andesita gris-rojizo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10</li> </ul>	<p>Componente gris-rojizo oscuro, subredondeado y de baja esfericidad. Tamaño variable de 0.5 a 3mm. Presenta textura porfídica. Con fenocristales (15%) de anfíbol subhedral que presenta fracturas rellenas con sericita. La masa fundamental (85%) presenta textura intergranular compuesta por plagioclasas orientadas aleatoriamente y clinopiroxenos intercrecidos.</p>
<b>Matriz (25% del total)</b>		
Está conformada por cristales de cuarzo, magnetita, pómez similares a fragmentos mayores y vidrio desvitrificado. Todos menores a 0.1 mm.		
<b>Texturas</b>		
Tipo	Descripción	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Piroclásticas</li> <li>• Eutaxítica</li> </ul>	<p>Mezcla de fragmentos líticos, juveniles y cristales. Fragmentos de vidrio aplastados.</p>	
<b>Estructuras (5% del total)</b>		
Vesículas subesféricas de bordes irregulares de hasta 2 mm de tamaño, que le entregan textura vesicular a la roca		
<b>Observaciones</b>		
Los porcentajes reportados son estimaciones observadas desde la preparación del corte transparente, por lo que no reflejan el total de la muestra.		

**Tabla E.3:** Descripción petrográfica muestra PAL4-2B

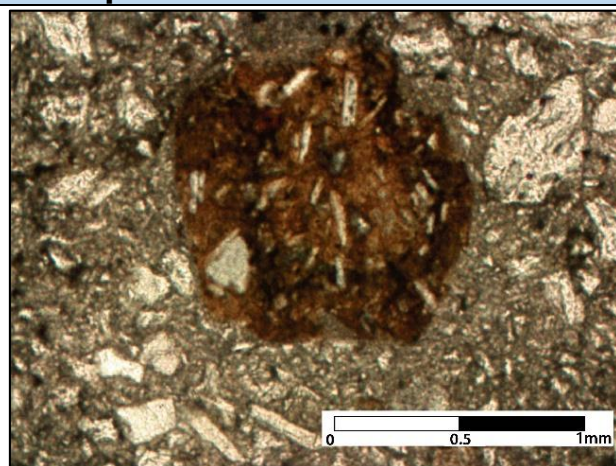
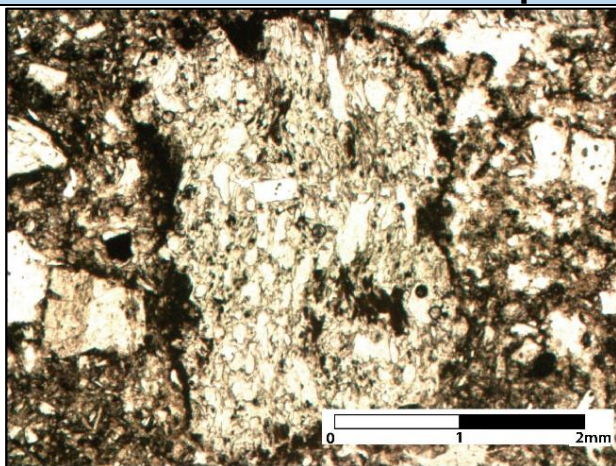
<b>Descripción Petrográfica</b>	
Código	PAL4-2B
Tipo	Flujo piroclástico
Procedencia	Maar Michacollo
Ubicación (Coordenadas UTM)	7983100/ 465226
Clasificación Petrográfica	Toba lítica

<b>Descripción macroscópica</b>
Roca con textura piroclástica en donde se observan fragmentos mayores tamaño ceniza gruesa de pómez y juveniles densos, inmersos en una matriz de ceniza fina.



**Figura E.5:** Toba lítica perteneciente al nivel 10 del centro eruptivo Michacollo

## Descripción microscópica



**Figura E.6. a)** imagen a nicoles paralelos de pómez. **b)** Imagen a nicoles paralelos de lítico andesítico rojizo

### Fragmentos mayores (35% del total)

Tipo	% Vol	Descripción
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pómez</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10</li> </ul>	Juvenil blanquesino, subredondeado y de baja esfericidad. Se distinguen vesículas (15%) alargadas, de bordes irregulares, y tamaño variable de 0.5 a 2 mm. Presenta textura porfídica, con fenocristales (10%) de Plagioclasa (8%) euhedrales de aproximadamente 0,5 mm, biotitas (1%) subhedrales de hasta 0.2 mm y opacos (1%) de hasta 0,2 mm. La masa fundamental (75%) está formada por de vidrio fibroso, cristales de cuarzo y biotita, todos menores a 0.2 mm.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuarzo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5</li> </ul>	Cristal blanquesino, subangular y de baja esfericidad. Tamaño varía de 0.5 a 1mm. Se distinguen fracturas.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plagioclasa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2</li> </ul>	Cristal blanquesino y subhedral. Tamaño varia de 0.5 a 2 mm. Presenta maclas de carlsbad.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Opacos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2</li> </ul>	Cristal subredondeado y de alta esfericidad.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lítico andesítico rojizo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 8</li> </ul>	De color rojizo, subredondeado y de alta esfericidad (ver figura 8,b). Presenta textura porfídica-vitrofírica, con fenocristales (20%) de anfíbol (2%) anhedral de hasta 0.2 mm y Plagioclasa (18%) subhedrales de hasta 0.2 mm, las cuales presentan maclas de carlsbad, se encuentran muy alteradas y se disponen de manera subparalela. La masa fundamental (80%) está formada por vidrio rojizo.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Líticos obliterados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5</li> </ul>	Componente subredondeado y de alta esfericidad. Tamaño variable de 1 a 2mm. Presenta textura porfídica, en donde solo se distinguen fenocristales de Plagioclasa (30%) muy alterados, inmersos en masa fundamental

<ul style="list-style-type: none"> <li>Lítico andesítico café</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3</li> </ul>	<p>(70%) de color café obliterateda.</p> <p>Componente subangular y de alta esfericidad. Tamaño variable de 1 a 0.5mm. Presenta textura porfídica-vitrofirica con fenocristales de Plagioclasa (20%) subhedrales, de tamaño aproximado 0.1mm y con textura de zonación, inmersos en masa fundamental (82%) vitrofirica café.</p>
<p><b>Matriz (63% del total)</b></p>		
<p>Está conformada por cristales de cuarzo, opacos, biotita, plagioclasa, fragmentos de pómez y vidrio desvitrificado, todos menores a 0.1 mm.</p>		
<p><b>Texturas</b></p>		
<p>Tipo</p>	<p>Descripción</p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Fragmentada (piroclástica)</li> </ul>	<p>Mezcla de fragmentos de rocas, cristales y vidrio.</p>	
<p><b>Estructuras (2% del total)</b></p>		
<p>Vesículas de bordes irregulares que dan textura vesicular a la roca.</p>		
<p><b>Observaciones</b></p>		
<p>Los porcentajes reportados son estimaciones observadas desde la preparación del corte transparente, por lo que no reflejan el total de la muestra.</p>		

**Tabla E.4:** Descripción petrográfica muestra PAL6-4

<b>Descripción Petrográfica</b>	
Código	PAL6-A
Tipo	Flujo piroclástico
Procedencia	Maar Michacollo
Ubicación (Coordenadas UTM)	7983181/ 465327
Clasificación Petrográfica	Toba lítica

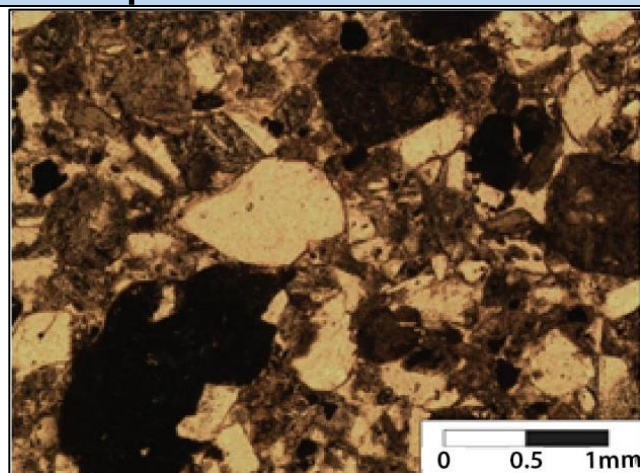
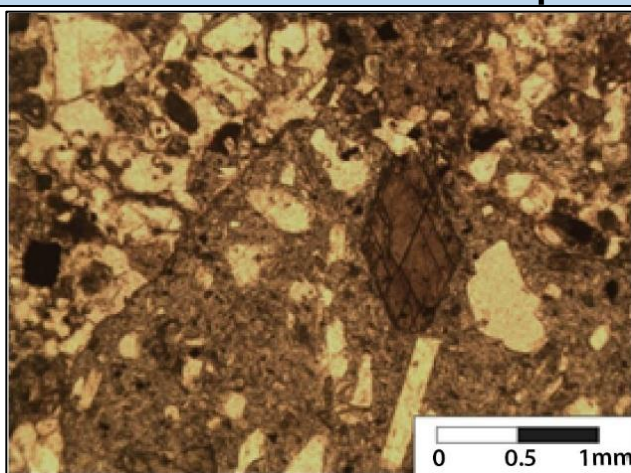
### **Descripción macroscópica**

Roca con textura piroclástica en donde se observan fragmentos mayores tamaño ceniza media de pómez, líticos afaníticos grises, cristales de cuarzo, biotita y anfíbol, inmersos en una matriz de ceniza fina.



**Figura E.7:** Toba lítica perteneciente al nivel 9 del centro eruptivo Michacollo.

## Descripción microscópica



**Figura E.8:** a) Imagen a nicoles paralelos de lítico andesítico, con fenocristales de anfíbol y cuarzo y plagioclasas. b) Imagen a nicoles paralelos de fragmentos mayores de cuarzo, feldspatos, líticos alterados y pacos, junto a matriz compuesta por los mismos componentes más vidrio.

### Fragmentos mayores (80% del total)

Tipo	% Vol	Descripción
<ul style="list-style-type: none"> <li>Pómez</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3</li> </ul>	Juvenil blanquesino, subredondeado y de baja esfericidad. Se distinguen vesículas (10%) alargadas, de bordes irregulares, y tamaño variable de 0.05 a 1mm. Presenta textura vitrofirica, con fenocristales (3%) de Plagioclasa (2%) euhedrales de aproximadamente 0.05 mm y opacos (1%) de hasta 0.02mm. La masa fundamental (87%) está formada por vidrio fibroso.
<ul style="list-style-type: none"> <li>Lítico andesítico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>20</li> </ul>	Componente de color café, subangular y de baja esfericidad. Tamaño variable de 0.5 a 3mm. Presenta textura porfídica, con fenocristales (15%) de anfíbol (5%) euhedral a subhedral de hasta 0.6 mm, plagioclasa (5%) subhedrales de hasta 0.4mm, las cuales presentan maclas de Carlsbad y se encuentran levemente alterados, cuarzo (3%) de hasta 0.3mm, subangular y baja esfericidad y opacos (2%) de hasta 0.2mm. La masa fundamental (85%) se encuentra muy alterada y, por lo que se distingue, está formada por vidrio y plagioclasa
<ul style="list-style-type: none"> <li>Lítico andesítico rojizo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>8</li> </ul>	Componente subredondeado y de alta esfericidad. Tamaño variable de 0.3 a 1mm. Presenta textura vitrofirica, en donde se distinguen fenocristales de Plagioclasa (20%) muy alterados, inmersos en masa fundamental vítrea (80%) de color rojiza.
<ul style="list-style-type: none"> <li>Lítico obliterado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>15</li> </ul>	Componente de color café oscuro, subredondeado y de baja esfericidad. Tamaño variable de 0.2 a 0.5mm. Se distingue textura porfídica, con fenocristales (15%) de anfíbol anhedral y plagioclasa subhedral. No se

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuarzo</li> <li>• Plagioclasa</li> <li>• Feldespatos</li> <li>• Biotita</li> <li>• Anfíbol</li> <li>• Opacos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10</li> <li>• 10</li> <li>• 5</li> <li>• 1</li> <li>• 1</li> <li>• 7</li> </ul>	<p>distinguen los componentes de la masa fundamental (85%).</p> <p>Cristal blanquesino, subangular y de baja esfericidad. Tamaño varía de 0.2 a 1mm. En algunos granos se distinguen fracturas, sin relleno.</p> <p>Cristal blanquesino y subhedral. Tamaño varía de 0.1 a 0.5 mm. Presenta maclas de carlsbad.</p> <p>Cristal blanco grisáceo y anhedral. Tamaño varía de 0.5 a 2 mm. Sin maclas.</p> <p>Cristal subhedral. Tamaño variable de 0.1 a 0.3 mm.</p> <p>Cristal subhedral. Tamaño rodea los 0.2 mm.</p> <p>Cristales subangulares de baja esfericidad. Tamaño varía de 0.1 a 0.6mm.</p>
<b>Matriz (18% del total)</b>		
Está conformada por cristales de cuarzo, plagioclasa, opacos, fragmentos de pómez, arcillas y vidrio, todos menores a 0.05 mm.		
<b>Texturas</b>		
Tipo	Descripción	
Piroclástica	Mezcla de fragmentos líticos, juveniles y cristales.	
<b>Estructuras (2% del total)</b>		
Vesículas de bordes irregulares, que dan textura vesicular a la roca		
<b>Observaciones</b>		
Los porcentajes reportados son estimaciones observadas desde la preparación del corte transparente, por lo que no reflejan el total de la muestra.		

**Tabla E.5:** Descripción petrográfica muestra PAL3-4B

<b>Descripción Petrográfica</b>	
Código	PAL3-4B
Tipo	Flujo piroclástico
Procedencia	Maar Michacollo
Ubicación (Coordenadas UTM)	7983181/ 465327
Clasificación Petrográfica	Toba lítica

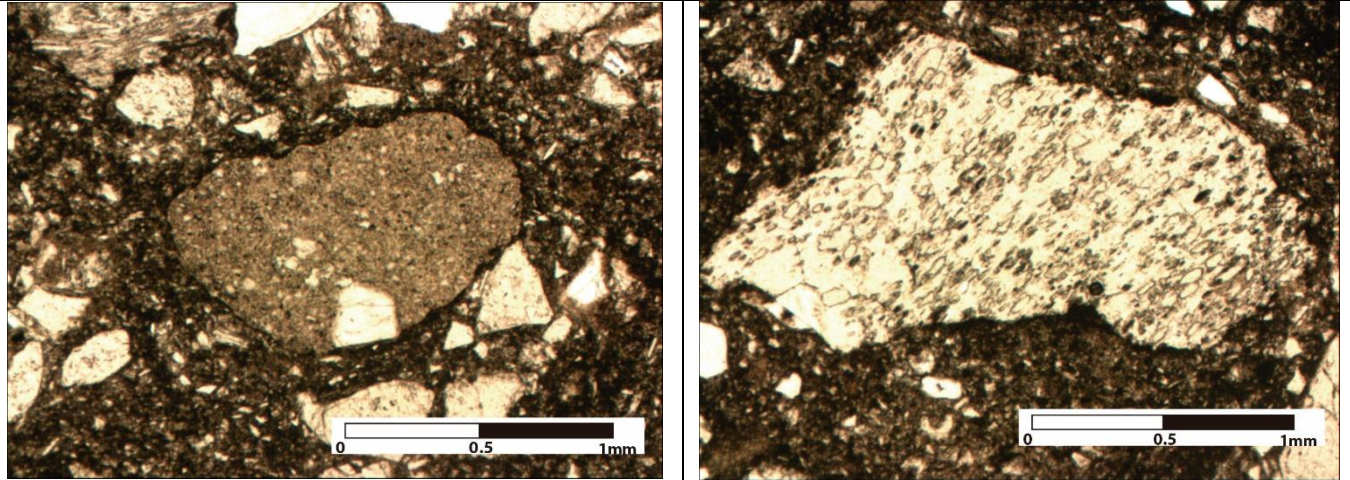
<b>Descripción macroscópica</b>
Roca con textura piroclástica en donde se observan fragmentos mayores tamaño ceniza gruesa a media de pómez inmersos en una matriz de ceniza media, la cual está conformada por pómez y cristales cuarzo, junto a una porción de ceniza fina.



**Figura E.9:** Toba lítica perteneciente al nivel 4 del centro eruptivo Michacollo.



## Descripción microscópica



**Figura E.10:** a) Imagen a nicoles paralelos de lítico andesítico café rojizo. b) Imagen a nicoles paralelo de pómez.

### Fragmentos mayores (45% del total)

Tipo	% Vol	Descripción
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pómez</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 15</li> </ul>	Juvenil blanquesino, subangular y de baja esfericidad. Se distinguen vesículas (25%) alargadas, de bordes irregulares, y tamaño variable de 0.05 a 1mm. Presenta textura porfídica, con fenocristales (10%) de Plagioclasa (9%) euhedrales de aproximadamente 0.5 mm y opacos (1%) de hasta 0.25mm. La masa fundamental (65%) está formada por vidrio fibroso, cristales de cuarzo y biotita, todos menores a 0.1 mm.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lítico andesítico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5</li> </ul>	Componente de color café, subangular y de alta esfericidad. Tamaño variable de 0.5 a 1.5mm. Presenta textura porfídica, con fenocristales (25%) de Plagioclasa (15%) subhedrales de hasta 1 mm, las cuales presentan maclas de carlsbad, se encuentran muy alteradas y se disponen de manera aleatoria, cuarzo (8%) (subangular y baja esfericidad) y opacos (2%). La masa fundamental (80%) está formada por vidrio, plagioclasa y biotita.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lítico andesítico rojizo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5</li> </ul>	Componente subredondeado y de alta esfericidad. Tamaño variable de 1 a 2mm. Presenta textura vitrofírica, en donde se distinguen fenocristales de Plagioclasa (40%) muy alterados, inmersos en masa fundamental vítrea (60%) de color rojiza café oxidada.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lítico granitoidal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2</li> </ul>	Componente redondeado y de alta esfericidad. Tamaño variable de 0.1 a 0.5mm. Presenta textura aplítica, compuesta por agregados leucocráticos de cuarzo anhedral.

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lítico andesítico café rojizo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 6</li> </ul>	Componente de color café rojizo, subredondeado y de baja esfericidad. Tamaño variable de 0.5 a 2mm. Presenta textura porfídica, con fenocristales (15%) de anfíbol subhedral que presenta fracturas rellenas con sericita. La masa fundamental (85%) presenta textura traquítica (pilotaxítica) compuesta por plagioclasas orientadas subparalelamente dispuestos dentro de una masa vítrea.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuarzo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10</li> </ul>	Cristal blanquesino, subangular y de baja esfericidad. Tamaño varía de 0.5 a 2mm. En algunos granos se distinguen fracturas, sin relleno.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plagioclasa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1</li> </ul>	Cristal blanquesino y subhedral. Tamaño varía de 0.5 a 2 mm. Presenta maclas de carlsbad.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Opacos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1</li> </ul>	Tamaño variable de 0.2 a 0.4 mm

**Matriz (50% del total)**

Está conformada por cristales de cuarzo, plagioclasa, opacos, fragmentos de pómez y vidrio desvitrificado, todos menores a 0.1 mm.

**Texturas**

Tipo	Descripción
Piroclástica	Mezcla de fragmentos líticos, juveniles y cristales.

**Estructuras (5% del total)**

Vesículas de bordes irregulares, que dan textura vesicular a la roca

**Observaciones**

Los porcentajes reportados son estimaciones observadas desde la preparación del corte transparente, por lo que no reflejan el total de la muestra.

**Tabla E.6:** Descripción petrográfica muestra PAL6-1

<b>Descripción Petrográfica</b>	
Código	PAL6-1
Tipo	Flujo piroclástico
Procedencia	Maar Lliza
Ubicación (Coordenadas UTM)	795688/ 478136
Clasificación Petrográfica	Toba vítrea

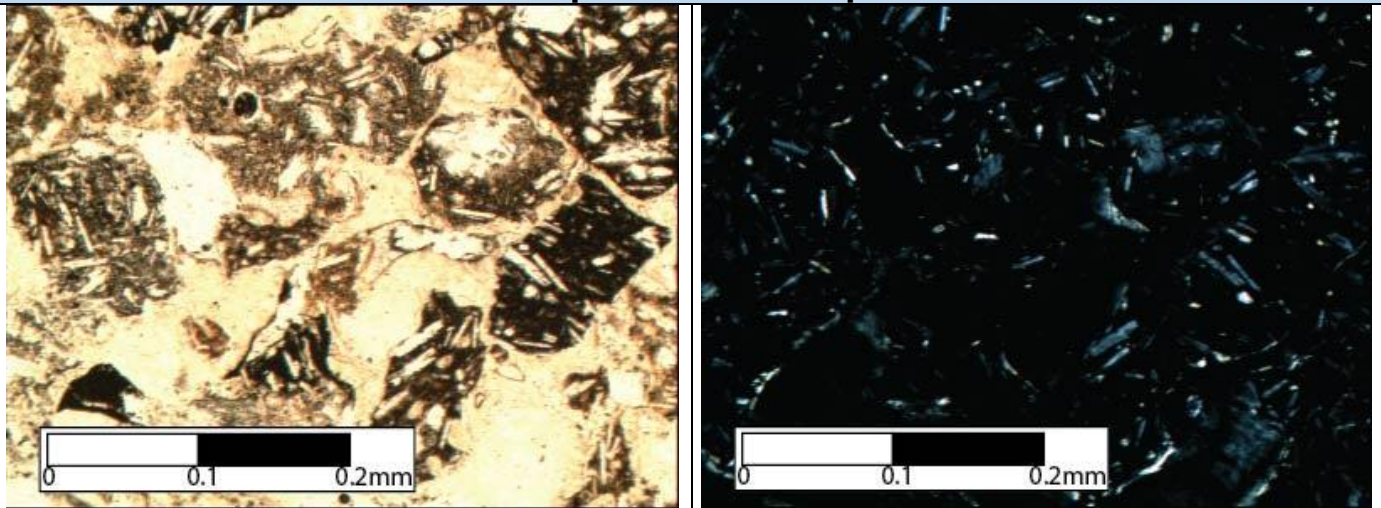
### **Descripción macroscópica**

Roca donde se distinguen franjas con distinta granulometría. Presenta textura piroclástica en donde se observan fragmentos mayores tamaño lapilli fino, siendo estos mayoritariamente escorias y en menor cantidad líticos cafés, rojizos y negros. La matriz es de ceniza fina de color café-gris.



**Figura E.11:** Toba vítrea perteneciente a los depósitos del centro eruptivo Lliza.

## Descripción microscópica



**Figura E.12:** a) Imagen a nicoles paralelos de fenocristales de escorias en matriz vítrea hidratada. b) Imagen a nicoles cruzados de la misma sección.

### Fragmentos mayores (60% del total)

Tipo	% Vol	Descripción
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escoria</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 50</li> </ul>	Juvenil negruzco, subangular y de baja esfericidad. Su medida alcanza los 5mm. Se distinguen vesículas (10%) circulares, de bordes regulares, y tamaño variable de 0.05 a 0.3mm. Presenta textura vitrofirica, con fenocristales (30%) de Plagioclasa (25%) euhedrales de aproximadamente 0.1 mm y piroxeno (5%) anhedral. La masa fundamental (60%) está formada por vidrio.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lítico andesito-basáltico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 8</li> </ul>	Componente de color café-rojizo, subangular y de baja esfericidad. Tamaño variable de 0.2 a 3mm. Presenta textura vitrofirica, con fenocristales (60%) de plagioclasa (50%) euhedral a subhedral de hasta 0.5 mm, las cuales presentan maclas de Carlsbad y se encuentran alterados, piroxeno (5%) subhedrales de hasta 0.2mm, y opacos (5%) de hasta 0.1mm. La masa fundamental (40%) se encuentra muy alterada y, por lo que se distingue, está formada por vidrio y plagioclasa.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esquirlas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2</li> </ul>	Juvenil de composición similar a juvenil descrito (escorias).

### Matriz (38% del total)

Está conformada por vidrio palagonitizado.

### Texturas

Tipo	Descripción
Piroclástica	Mezcla de fragmentos líticos y juveniles.

<b>Estructuras (2% del total)</b>
Vesículas de bordes irregulares, que dan textura vesicular a la roca
<b>Observaciones</b>
Los porcentajes reportados son estimaciones observadas desde la preparación del corte transparente, por lo que no reflejan el total de la muestra.

**Tabla E.7:** Descripción petrográfica muestra PAL5-1

<b>Descripción Petrográfica</b>	
Código	PAL5-1
Tipo	Flujo piroclástico
Procedencia	Maar Lliza
Ubicación (Coordenadas UTM)	7955910/ 478389
Clasificación Petrográfica	Toba vítrea

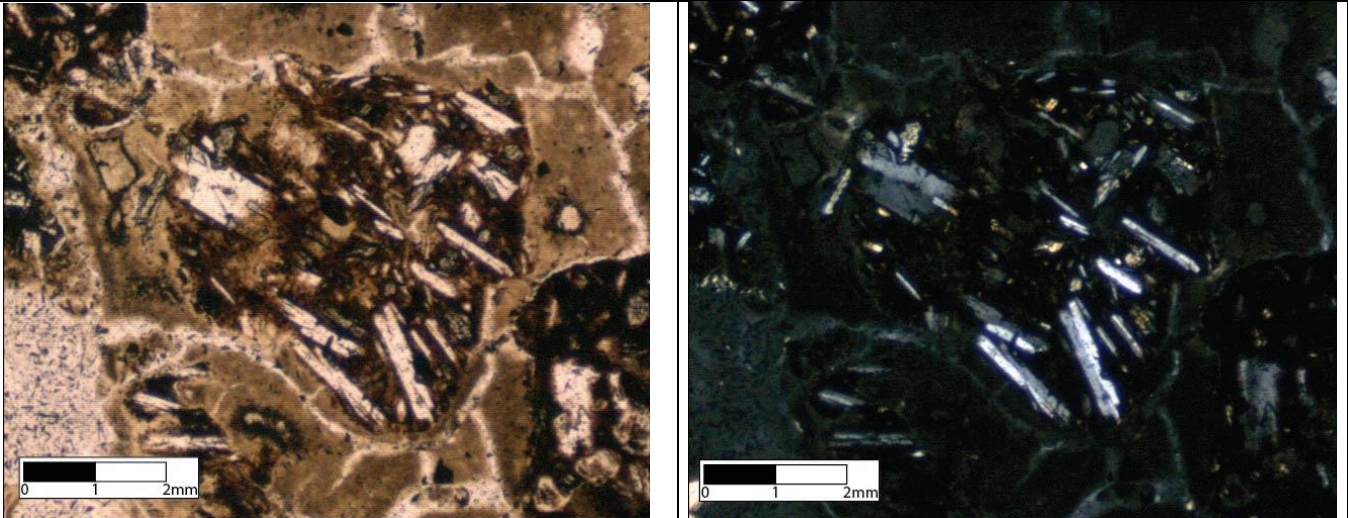
### **Descripción macroscópica**

Roca con textura piroclástica en donde se observan fragmentos mayores tamaño lapilli fino, siendo estos líticos afaníticos grises, rojizos y negruzcos, además de escorias y cristales de plagioclasa. La matriz es de ceniza fina.



**Figura E.13:** Toba vítrea perteneciente a los depósitos del centro eruptivo Lliza.

## Descripción microscópica



**Figura E.14:** **a)** Imagen a nicoles paralelos de lítico andesito basáltico, con fenocristales de piroxeno y plagioclasas inmerso en masa fundamental vítrea de color café-rojiza. **b)** Imagen a nicoles cruzados de lítico andesito basáltico.

### Fragmentos mayores (60% del total)

Tipo	% Vol	Descripción
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escoria</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 50</li> </ul>	Juvenil negruzco, café-rojizo, subredondeado a subangular, de baja esfericidad. Su medida alcanza los 5mm. Se distinguen vesículas (5%) circulares, de bordes regulares, y tamaño variable de 0.05 a 0.5mm. Presenta textura vitrofirica, con fenocristales (75%) de Plagioclasa (55%) euhedrales de aproximadamente 0.05 mm y piroxeno (20%) anhedral, menor a 0.2mm. La masa fundamental (25%) está formada por vidrio palagonitizado.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lítico andesito-basáltico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10</li> </ul>	Componente de color café, subangular a angular, de baja esfericidad. Tamaño variable de 0.5 a 3mm. Presenta textura traquítica y porfídica, con fenocristales (80%) de plagioclasa (65%) euhedral a subhedral de hasta 0.6 mm, las cuales presentan maclas de Carlsbad y se encuentran alterados, piroxeno (13%) subhedrales de hasta 0.4mm, y opacos (2%) de hasta 0.2mm. La masa fundamental (20%) se encuentra muy alterada y, por lo que se distingue, está formada por vidrio y plagioclasa.

### Matriz (38% del total)

Está conformada por vidrio palagonitizado (hidratado), opacos (2%) y cristales (1%) de piroxeno anhedral.

### Texturas

Tipo	Descripción
Piroclástica	Mezcla de fragmentos líticos y juveniles.

<b>Estructuras (2% del total)</b>
Vesículas de bordes irregulares, que dan textura vesicular a la roca
<b>Observaciones</b>
Los porcentajes reportados son estimaciones observadas desde la preparación del corte transparente, por lo que no reflejan el total de la muestra.



