



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**VARIACIONES PETROGRÁFICAS Y GEOQUÍMICAS DE LAVAS RECIENTES
DEL VOLCÁN ANTUCO, REGIÓN DEL BIO BÍO, CHILE: IMPLICANCIAS EN LA
EVOLUCIÓN DEL RESERVORIO MAGMÁTICO.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

JUAN PATRICIO NORAMBUENA SOTO

PROFESOR GUÍA

MIGUEL ANGEL PARADA REYES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

MARIO VERGARA MARTÍNEZ

ANGELO CASTRUCCIO ÁLVAREZ

SANTIAGO DE CHILE

2016

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Geólogo
POR: Juan Patricio Norambuena Soto
FECHA: 15/12/2016
PROFESOR GUÍA: Miguel Ángel Parada R.

**VARIACIONES PETROGRÁFICAS Y GEOQUÍMICAS DE LAVAS RECIENTES
DEL VOLCÁN ANTUCO, REGIÓN DEL BIO BIO, CHILE: IMPLICANCIAS EN LA
EVOLUCIÓN DEL RESERVORIO MAGMÁTICO.**

La Zona Volcánica Sur está compuesta por volcanes Pleistocenos-Holocenos, calderas y centros eruptivos menores, los cuales han sido estudiados por diversos autores. Entre estos volcanes se encuentra el Volcán Antuco (2987 m.s.n.m), el cual se edificó sobre los depósitos volcánicos del Volcán Sierra Velluda y la Formación Curamallín. Este volcán consta de dos unidades denominadas Unidad Antuco I y Antuco II separadas por un evento catastrófico, donde el cono formado por la Unidad Antuco I colapsó, dejando una caldera en forma de herradura.

Los análisis petrográficos geoquímicos y mineralógicos de este estudio muestran cambios en las proporciones de fenocristales y masa fundamental a lo largo de la actividad del volcán. Además de texturas de desequilibrio que evidencian procesos de diferenciación magmática dentro del reservorio.

Se clasificaron los fenocristales y como resultado se obtuvieron cuatro tipos de plagioclasas, dos tipos de olivinos, piroxenos en distintas condiciones y composiciones y óxidos de Fe-Ti. A partir de esta información se estimaron datos mediante geotermometría en asociaciones olivino-augita (Loucks, 1996) y olivino-líquido (Putirka, 2008), mostrando rangos de temperaturas de formación para los microlitos de 980 a 1130°C y en los cúmulos de fenocristales de 1155 a 1278°C. Utilizando un modelamiento de equilibrio entre plagioclasas y fundido, se obtuvo una aproximación a la información durante la formación de estos cúmulos evidenciando un calentamiento mínimo de 55°C y valores máximos de descompresión de 1,5 kbar y 1,2 %wt en exolución de agua.

Esto implicaría la presencia de un reservorio somero(0-5km), donde los magmas sufrirían procesos de fraccionamiento mineral, recalentamiento por nuevos *inputs* de magmas más densos, exolución de volátiles y zonas dentro del reservorio donde la proporción de cristales cambia por procesos convectivos internos.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco profundamente la oportunidad que me brinda el Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes, de poder realizar esta memoria de título, para optar al título de geólogo.

Agradecer a mi profesor guía Miguel Ángel Parada, por su paciencia y constancia en ayudarme a llevar este trabajo, a pesar de todas las dificultades que ha llevado.

También, agradecer a Blanca Baccola, por su apoyo y esfuerzo en resolver todas las dificultades administrativas que han sucedido, en ese sentido, este agradecimiento quedaría corto.

Esto tampoco habría sido posible, sin el apoyo incondicional de Karol Zúñiga, quién siempre estuvo tanto en los momentos de celebración de las metas alcanzadas como en esos momentos difíciles, donde nada parecía estar bien, para motivarme a seguir adelante.

Como olvidarme de todos esos personajes que estuvieron alrededor, tanto para discutir sobre temas serios de geología, como para distender el ambiente y poder ver las cosas desde otro punto de vista. Espero no hacerlos sentir por no nombrarlos, pero, o van todos, o ninguno. Gracias cabros.

Finalmente, agradecer a todos los que confiaron y creyeron en mí, especialmente a mis padres que siempre estaban preocupados de lo que pasaría en el futuro.

Gracias totales.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|-----|
| Agradecimientos | iii |
| TABLA DE CONTENIDO | iv |
| INDICE DE FIGURAS..... | vii |
| INDICE DE TABLAS | x |
| 1. Introducción..... | 11 |
| Formulación del estudio propuesto. | 11 |
| Objetivos. | 13 |
| Objetivo general. | 13 |
| Objetivos específicos..... | 13 |
| Hipótesis de Trabajo. | 13 |
| Metodología. | 14 |
| Ubicación y acceso a la zona de estudio. | 15 |
| Contexto geológico..... | 16 |
| Geología del Basamento del volcán Antuco. | 16 |
| Volcán Antuco. | 19 |
| 2. Petrografía..... | 28 |
| Unidad Antuco I..... | 29 |
| Subunidad I.1. | 29 |
| Subunidad I.2. | 30 |
| Subunidad I.3. | 30 |

| | |
|--|----|
| Unidad Antuco II..... | 31 |
| Centros volcánicos adventicios | 32 |
| Discusión petrográfica..... | 32 |
| 3. Geoquímica | 35 |
| Elementos mayores..... | 35 |
| Unidad Antuco I. | 38 |
| Unidad Antuco II. | 38 |
| La Herradura y Los Pangues..... | 38 |
| Diagramas Harker..... | 39 |
| Elementos traza. | 41 |
| Elementos compatibles e incompatibles..... | 43 |
| Razones de elementos incompatibles. | 45 |
| Tierras raras. | 47 |
| Diagramas spider multielementales..... | 48 |
| Discusiones Geoquímicas..... | 49 |
| 4. Análisis Mineral..... | 51 |
| Plagioclasas | 51 |
| Unidad Antuco I. | 53 |
| Unidad Antuco II. | 54 |
| Piroxenos | 54 |
| Unidad Antuco I. | 55 |
| Unidad Antuco II. | 55 |

| | |
|---|-----|
| Olivinos | 56 |
| Titanomagnetita y Cromitas. | 57 |
| 5. Geotermometría..... | 59 |
| Geotermómetro Olivino-líquido..... | 59 |
| Geotermómetro Olivino Augita | 60 |
| 6. Discusión..... | 62 |
| Texturas de desequilibrio y procesos magmáticos..... | 62 |
| Condiciones en el reservorio y modelamiento de cristalización. | 63 |
| Colapso lateral del edificio volcánico..... | 65 |
| Procesos en el reservorio magmático. | 66 |
| Evolución del volcán Antuco. | 67 |
| 7. Conclusiones | 70 |
| 8. Bibliografía..... | 72 |
| 9. Anexos..... | 77 |
| Anexo A: Descripción de muestras. | 77 |
| Anexo B: Gráficos de distribución modal de fenocristales..... | 107 |
| Anexo C: Datos Geoquímicos | 108 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Fotografía del cono central del edificio volcánico del Antuco. | 12 |
| Figura 2: Ubicación y ruta de acceso al volcán Antuco. | 15 |
| Figura 3: Coladas de lavas de la subunidad Antuco I.1 en el sector oriental del edificio volcánico. | 20 |
| Figura 4: Flujos de lavas y piroclastos de la Unidad Antuco II en el borde occidental del volcán Antuco. | 22 |
| Figura 5: Coladas de lava cordadas emitidas por el centro volcánico adventicio La Herradura. | 25 |
| | 27 |
| Figura 6: Mapa geológico de la zona de estudio. Escala 1 a 50.000. Modificado de Moreno et al., 1984. | 27 |
| Figura 7: Textura pseudo-traquítica observable en la subunidad Antuco I.1..... | 30 |
| Figura 8: Textura glomeroporfírica presente en la Unidad Antuco I. a) Glomérulos de plagioclasas, olivinos y clinopiroxenos. b) Glomérulos de plagioclasas (zonada) y olivino | 31 |
| Figura 9: Distribución modal de fenocristales y fenocristales-matriz de las distintas unidades del volcán Antuco. Se pueden encontrar las muestras ordenadas según SiO ₂ y #MgO en el Anexo B. | 33 |
| Figura 10: Imagen comparativa de las texturas en las distintas subunidades del volcán Antuco..... | 33 |
| (U.A. I.1: Unidad Antuco I.1; U.A. I.2: Unidad Antuco I.2; U.A. I.3: Unidad Antuco I.3; U.A. II: Unidad Antuco II; C.V.L.H: Centro Volcánico La Herradura; C.V.L.P: Centro Volcánico Los Pangués)..... | 33 |
| Figura 11: Diagrama TAS de todas las muestras del volcán Antuco separadas en sus unidades (muestras obtenidas de Vergara & López-Escobar, 1977, López-Escobar 1981, Lohmar, 2000; este trabajo) | 37 |
| Figura 12: Diagrama K ₂ O vs SiO ₂ (Peccerillo y Taylor, 1976) y AFM (Irvine & Baragar 1971) para todas las muestras del volcán Antuco..... | 37 |
| Figura 13: Diagramas Harker de elementos mayores para todas las unidades del volcán Antuco..... | 40 |
| Figura 14: Diagramas Harker para los elementos Sc, V, Co, Ni, Cr, Sr, Rb y Ba. Las unidades son %p/p. Además, se agrega el #Mg | 44 |
| Figura 15: Razones de elementos incompatibles con respecto a sílice normalizado (Datos del presente trabajo)..... | 47 |

| | |
|---|----|
| Figura 16: Diagrama de Tierras Raras para muestras representativas de las distintas Unidades del volcán Antuco. Las muestras están normalizadas a condrito (Sun & McDonough, 1995)..... | 47 |
| Figura 17: Diagrama SiO ₂ (%wt) v/s La/Yb normalizado a condrito de todas las muestras analizadas del volcán Antuco (Sun & McDonough, 1995). | 48 |
| Figura 18: Diagrama spider multielemento de las lavas representativas de cada unidad del volcán Antuco. Normalización de McDonough & Sun 1995..... | 49 |
| Figura 19: Diagrama ternario de clasificación de plagioclasas para las distintas unidades del volcán Antuco..... | 51 |
| Figura 20: a) Fenocristal de plagioclasas tipo 1a con zonación cíclica y ausencia de textura sieve. Unidad Antuco I b) Fenocristal de plagioclasas tipo 1b con zonación normal y textura sieve. Unidad Antuco II. | 52 |
| Figura 21: a) Comparación entre un fenocristal de plagioclasas con zonación normal respecto a los microlitos de plagioclasas en la matriz. se puede observar que la composición similar al borde del fenocristal. b) Microlito de plagioclasas de composición An ₅₆ y Microfenocristal de plagioclasas de composición An ₇₂ | 53 |
| Figura 22: Diagrama de clasificación de piroxenos Wo-En-Fs. Se pueden identificar los distintos grupos de piroxenos en las distintas unidades. | 54 |
| Figura 23: Imágenes SEM de las cuatro formas en que aparecen los piroxenos. a) Unidad Antuco I, fotomicrografía de fenocristal de clinopiroxeno (diópsido) con una inclusión de cristal de ortopiroxeno (clinoenstatita) y borde de reacción de clinopiroxeno (pigeonita). Unidad Antuco II, se observan fenocristales de titanomagnetita. b) Fotomicrografía de microlito zonado de clinopiroxeno..... | 55 |
| Figura 24: Distribución de olivinos en las muestras estudiadas. Los símbolos sin relleno corresponden a microlitos, mientras que los que poseen relleno corresponden a fenocristales o inclusiones en fenocristales..... | 56 |
| Figura 25: Imágenes SEM de los dos tipos de olivino a) Fotomicrografía de fenocristal de olivino reabsorbido de composición Fo ₇₇ , se observan inclusiones de opacos. Unidad Antuco II. b) Fotomicrografía de microlitos de olivino con borde de clinopiroxeno, se puede observar la diferencia de tamaño con los microlitos de augita. Unidad Antuco II. | 57 |
| Figura 26: Diagramas de clasificación de espinelas Fe-Cr-Al. | 58 |
| Figura 27: a) Fenocristales de Titanomagnetita asociados a piroxenos (U.A.I.1). b) Inclusiones de Cromitas de Aluminio en Olivino (Fo ₇₇) de la Unidad Antuco II. | 58 |
| Figura 28: Resultados de rangos de temperatura de los geotermómetros descritos (Loucks, 1996; Putirka ,2008)..... | 61 |

Figura 29: Resultados de la resolución simultanea de los higrómetros de Lange et al., 2009 (en azul) y Moore et al., 1997 (en rojo) Los datos obtenidos corresponden a P=732 bar y %wtH₂O=1,66% para la temperatura de 1155°C y P=339 bar y %wtH₂O=1,05% para la temperatura de 1210°C. 64

Figura 30: Esquema de la configuración probable del sistema magmático del volcán Antuco. Imagen modificada de Lohmar 2000 67

Figura 31: Modelo evolutivo del reservorio somero del volcán Antuco..... 69

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Resumen de los porcentajes modales y texturas de las distintas unidades del volcán Antuco. | 28 |
| Tabla 2: Elementos mayores para la Unidad Antuco I | 35 |
| Tabla 3: Elementos mayores para la Unidad Antuco II | 36 |
| Tabla 4: Elementos mayores para los Centros Volcánicos La Herradura y Los Pangues. | 36 |
| Tabla 5: Elementos traza de la Unidad Antuco I | 41 |
| Tabla 6: Elementos traza para las Unidad Antuco II | 42 |
| Tabla 7: Elementos traza para los Centros volcánicos La herradura y Los Pangues | 43 |
| Tabla 8: Resumen composicional de cristales de plagioclasas, piroxenos y olivinos. | 59 |
| Tabla 9: Temperaturas obtenidas de cluster mineral (olivino-augita) y microlitos de olivino. | 61 |
| Tabla 10: Resultados del modelamiento en MELTS. | 65 |

1. Introducción.

Formulación del estudio propuesto.

La Zona Volcánica Sur (ZVS, 33-46°S) de los Andes está compuesta por más de 70 estratovolcanes y complejos volcánicos, a lo menos nueve complejos de caldera y cientos de centros eruptivos menores, de los cuales 40 estratovolcanes han hecho erupción en el Holoceno y 20 han tenido erupciones históricas. Por ese motivo ha sido estudiada por diversos autores, tanto comparativamente en toda la franja volcánica (e.g. Drake,1976; López-Escobar *et al.*,1977; Vergara y López-Escobar, 1982; Moreno *et al.*, 1985; Hildreth & Moorbath,1988; Muñoz & Stern, 1988; López-Escobar *et al.*,1995; López-Escobar & Vergara, 1997; Stern, 2004; Lara & Cembrano, 2009, Völker *et al.*, 2011); como para cada centro eruptivo, principalmente los más activos como son los volcanes Villarrica y Llaima. En base al control estructural que condiciona la distribución de estos centros volcánicos, como también las consideraciones petrológicas y geoquímicas, la ZVS se divide en cuatro provincias o segmentos principales: La ZVS Norte (33,3–34,4°S); Transicional (34,4–37°S); Central (37–42°S) y Sur (42–46°S) (Stern *et al.*,2007).

En la última década, el conocimiento asociado a los centros eruptivos ha ido más allá de sólo la investigación pura, ya que, por un lado, la necesidad energética nacional ha sido una constante en la búsqueda de energías alternativas, siendo la geotermia una opción coherente a este tema. Por otro lado, las recurrentes erupciones volcánicas que se han producido en la última década, han dado pie para avanzar en los temas de planificación territorial en base a riesgos y peligros volcánicos, fomentando a la creación de programas relacionados con la prevención y seguridad en la población.

En este trabajo se estudiará el volcán Antuco (Figura 1); un estratovolcán compuesto ubicado en la ZVS Central (37°25'S), emplazado sobre el Sierra Velluda, alcanzando los 2987 m.s.n.m. Algunos autores han estudiado como ha sido su evolución desde su formación hace 130.000 años (Thiele *et al.*, 1998). Estos estudios se enfocan principalmente en su petrogénesis y estratigrafía (e.g. González y Vergara, 1962; López-Escobar *et al.*, 1981; Thiele *et al.*, 1998; Déruelle *et al.*, 1999, Lohmar, 2000).



Figura 1: Fotografía del cono central del edificio volcánico del Antuco.

En términos genéticos, el volcán Antuco se divide en dos unidades, la unidad Antuco I y Antuco II, más algunos centros volcánicos adventicios. La unidad Antuco I se subdivide en tres subunidades diferenciadas morfológica y cronológicamente, formadas entre los 130.000 años (Thiele *et al.*, 1998) y los 6.250 ± 60 años (Lohmar, 2000). Posteriormente, un colapso lateral del edificio volcánico, debido a una actividad eruptiva freatomagmática de tipo Bandai-San, habría originado la gran avalancha volcánica de Antuco dejando un anfiteatro en forma de herradura (Thiele *et al.*, 1998). Esto habría sido seguido de nuevas erupciones formando un pequeño cono dentro del anfiteatro y algunos centros eruptivos adventicios, los que corresponden a la Unidad Antuco II. Dentro de esta unidad se encuentran las lavas correspondientes a las erupciones históricas, siendo la más violenta y la última erupción descrita las ocurridas en 1853 y 1911 respectivamente. En la actualidad solo muestra una débil actividad fumarólica (Stern, 2011).

La petrogénesis de estas lavas ha sido evaluada por diversos autores (entre ellos López-Escobar *et al.*, 1981; Lohmar, 2000) explicando los procesos asociados al origen y formación de los magmas del volcán Antuco. Sin embargo, las nuevas tecnologías y metodologías permiten un acercamiento más acabado de la génesis de estos magmas.

En el presente estudio se caracterizarán petrográficamente las lavas del volcán Antuco; se interpretarán las variaciones geoquímicas, tanto de las rocas como de los minerales, para así definir nuevos acercamientos de los procesos magmáticos involucrados en su formación. Para esto se utilizarán métodos

petrográficos, mineralógicos y geoquímicos (SEM, ICP-MS), así como algunos modelamientos de procesos magmáticos.

El alcance principal del estudio es aportar nuevos datos confiables del volcán Antuco con los que se puedan generar mejores interpretaciones de los procesos magmáticos y petrogenéticos, siendo útiles en proyectos tanto de riesgo volcánico como para la prospección de campos geotérmicos, sin dejar de lado el aporte al conocimiento científico de la zona y la contribución en el planteamiento del modelo de evolución magmática de la ZVS.

Objetivos.

Objetivo general.

Determinar los principales procesos involucrados en la evolución del reservorio magmático que dieron origen a las lavas del volcán Antuco desde una fuente determinada.

Objetivos específicos.

- i. Caracterizar petrográficamente las distintas unidades del volcán Antuco.
- ii. Determinar relaciones existentes entre la petrografía y las variaciones geoquímica de elementos mayores, trazas y tierras raras.
- iii. Determinar las variaciones composicionales en los minerales presentes en las distintas unidades de lavas del Antuco.
- iv. Obtener estimaciones de las condiciones termodinámicas del reservorio magmático del volcán Antuco.

Hipótesis de Trabajo.

Los procesos involucrados en la evolución del reservorio magmático que dieron origen a las lavas del volcán Antuco, están asociados a un proceso de diferenciación magmática generado sólo por cristalización fraccionada y segregación magmática desde una fuente determinada.

Metodología.

Para este punto se explican las distintas formas de obtención de los datos y la instrumentalización usada para materializar los objetivos específicos.

Mediante una salida a terreno al volcán Antuco se recolectaron 30 muestras de las distintas unidades efusivas del volcán. Para cada muestra se generaron triplicados, donde uno de los grupos de 30 muestras quedó como respaldo. Con el segundo grupo se trabajó en el Taller de Cortes de la Universidad de Chile, generando “calugas” para cada muestra, las que posteriormente se enviaron a los laboratorios de VanPetro, ubicados en Langley, Canadá, para realizar los cortes transparentes-pulidos necesarios para las descripciones petrográficas y mineralógicas mediante microscopía de luz polarizada y SEM respectivamente.

Finalmente, el último grupo de 30 muestras pasó por un proceso de molienda, partiendo por chancado en mortero y terminando en el molino de ágata, en el Laboratorio de Preparación de Muestras de la Universidad de Chile, las que se enviaron para análisis geoquímicos de elementos mayores, trazas y tierras raras, a los laboratorios de ActLabs, en Vancouver, Canadá, donde se utilizaron los métodos ICP-OES e ICP-MS.

(i) Para el estudio de lámina delgada, se utilizaron microscopios de luz polarizada para determinar las fases minerales que componen las lavas, sus proporciones modales y las texturas presentes en cada muestra. También se eligen las potenciales muestras para ser trabajadas en SEM.

(ii) Con respecto a la geoquímica, se realizaron los diagramas típicos de elementos mayores, trazas y tierras raras. Determinando las composiciones de cada muestra y variaciones dentro del grupo de muestras que provienen del mismo reservorio magmático.

(iii) Por medio del microscopio electrónico de barrido (*SEM Scattering Electron Microscope*), se determinaron composiciones de cada uno de los minerales presentes en algunas muestras definidas para este proceso, permitiendo observar zonaciones, bordes de reacción y variaciones composicionales de cada fase mineral.

(iv) Posteriormente, con la información obtenida en SEM, se estimaron las condiciones dentro del reservorio magmático mediante el uso de geotermómetros e higrómetros, evaluando las condiciones de equilibrio de las distintas fases

presentes, y junto a la información mineralógica y geoquímica, proponer los procesos que pudieron haber ocurrido dentro del reservorio y que sean consistentes a los datos obtenidos.

Ubicación y acceso a la zona de estudio.

El volcán Antuco se encuentra en la Cordillera de los Andes, Región del Bío-Bío, Provincia del Bío-Bío, comuna de Antuco, dentro del Parque Nacional Laguna del Laja, a los $37^{\circ} 24,6'S$ - $71^{\circ} 21,1W$. El acceso se realiza desde la ciudad de Los Ángeles, a 89 km del volcán, por el camino internacional a Argentina (Q-45), que se encuentra pavimentado y en óptimas condiciones hasta la altura la localidad de Abanico, donde pasa a ser un camino de ripio hasta el paso fronterizo Pichachén (Figura 2).

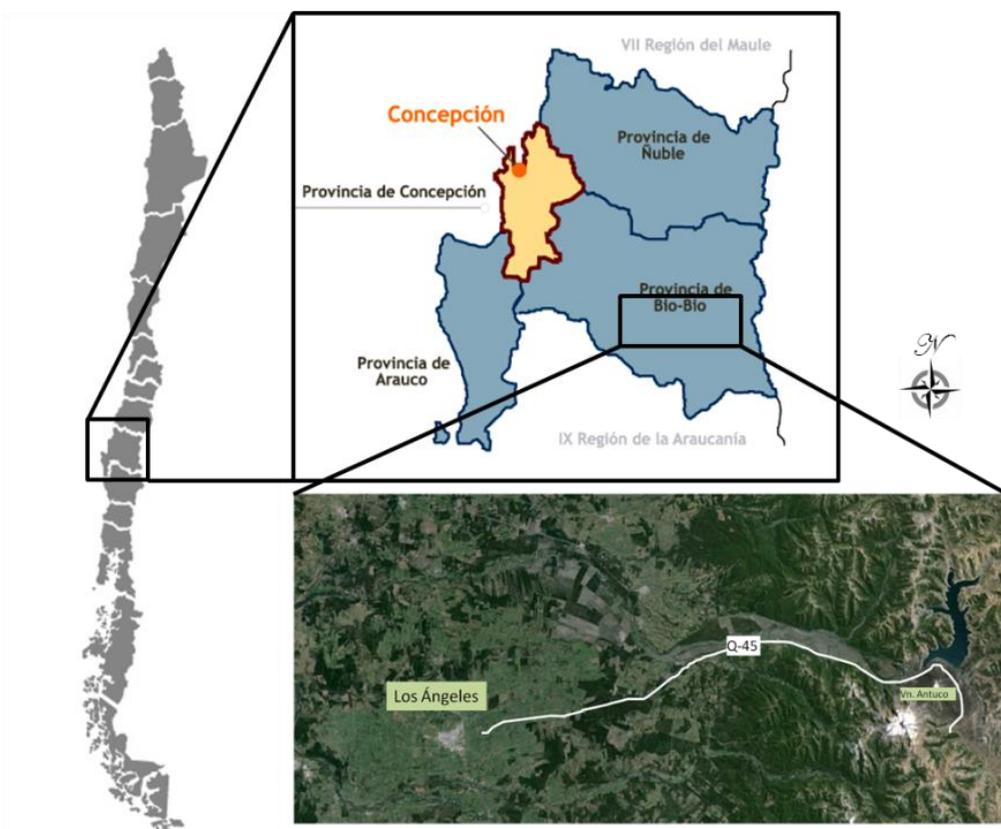


Figura 2: Ubicación y ruta de acceso al volcán Antuco.

Marco geológico.

Contexto geológico.

El volcanismo de los Andes es el resultado de la subducción de la placa de Nazca y Antártica, bajo la placa Sudamericana, a una velocidad de 7-9 cm/año y 2 cm/año respectivamente (Norabuena *et al.*, 1998; Angermann *et al.*, 1999). La cordillera de los Andes posee cuatro segmentos activos, definidos como la Zona Volcánica Norte (ZVN), la Zona Volcánica Central (ZVC), la Zona Volcánica Sur (ZVS) y la Zona Volcánica Austral (ZVA), los cuales están asociados a un ángulo de convergencia de la placa de nazca mayor a 25°, mientras que los segmentos ausencia de volcanismo, se relacionan a un ángulo menor a 10° (Stern, 2004)

La ZVS se divide en cuatro provincias o segmentos principales: La ZVS Norte (33,3–34,4°S); Transicional (34,4–37°S); Central (37–42°S) y Sur (42–46°S), las cuales están compuestas por más de 70 estratovolcanes y complejos volcánicos, a lo menos nueve complejos de caldera y cientos de centros eruptivos menores (Stern *et al.*, 2007).

El volcán Antuco se encuentra en la ZVSC a los 37,25°S, su cumbre está a los 2.987 m.s.n.m. Además, junto a al volcán Sierra Velluda, conforman el Grupo Volcánico Antuco-Sierra Velluda, ubicados sobre unidades terciarias y cuaternarias, aunque regionalmente se observa un desarrollo geológico que incluye parte del Paleozoico y Mesozoico (Moreno *et al.*, 1984).

Geología del Basamento del volcán Antuco.

Según Moreno *et al.* (1984), el basamento del Grupo Volcánico Antuco-Sierra Velluda, consta principalmente de rocas estratificadas plegadas de la formación Curamallín (González y Vergara, 1962), intruida por numerosos cuerpos filonianos andesíticos y dacíticos. Fuera del área de estudio, hacia el oeste, la formación Curamallín está intruida por granodioritas cuarcíferas (tonalitas) que generaron rocas con metamorfismo de contacto (Enrione y Villarroel, 1962). La edad que se le asignan tentativamente a éstas rocas intrusivas es del Mioceno Medio a Superior (Niemeyer y Muñoz, 1983).

Rocas estratificadas.

Formación Curamallín.

La formación Curamallín fue definida sobre la base de dos columnas estratigráficas estudiadas en los ríos Queuco y Polcura, donde se observó una secuencia de conglomerados, areniscas, brechas volcánicas, tobas y queratófiros de depositación terrestre (González y Vergara, 1962). Por otro lado, Enrione y Villarroel (1962), dentro del área de estudio denominaron formación Polcura a la misma secuencia estratificada, definiéndola como un conjunto de rocas sedimentarias clásticas continentales e intercalaciones de lavas andesíticas y riolíticas.

Posteriormente, Niemeyer y Muñoz (1983), consideraron a estas rocas estratificadas de esta área como pertenecientes a la formación Trapa-Trapa (nueva denominación), insertando los tres miembros superiores de los cinco en total definidos por Enrione y Villarroel (1962) en la Formación Polcura. Pero según Moreno *et al.* (1984), tanto sus características litológicas como su estilo estructural, se pueden asignar de mejor manera a la Formación Curamallín.

En el área, las rocas de la Formación Curamallín afloran en los sectores noroccidental, oriental y suroriental. Estos afloramientos muestran capas bien estratificadas y plegadas, cuya base no aparece expuesta. Se trata de una secuencia de brechas volcánicas y tobas de colores gris verde, con intercalaciones de lavas andesíticas, conglomerados y areniscas. Sobre estas rocas se encuentran los productos volcánicos y depósitos no consolidados cuaternarios. Otros afloramientos de esta formación, cerca del área de estudio, se ubican en los sectores de Los Barros en ribera meridional del Lago Laja y Mallín Florido, en ribera suroriental del mismo lago (Lohmar, 2000).

El espesor máximo de esta formación ha sido estimado entre unos 1.000 m y 2.000 m, al sur de la zona de estudio (Niemeyer y Muñoz, 1983; Thiele *et al.*, 1987 en Lohmar, 2000).

Por otro lado, en base a estudios paleontológicos realizados en el miembro Malla-Malla (Covacevich, 1975 y Osorio, 1982, ambos en Niemeyer y Muñoz, 1983) y dataciones radiométricas efectuadas en muestras del Miembro Río Queuco (Drake, 1976), se asume una edad Eoceno a Mioceno Medio para la Formación Curamallín.

Rocas Intrusivas.

Según Moreno *et al.* (1984), los cuerpos plutónicos granodioríticos y tonalíticos que intruyen la formación Curamallín y desarrollan rocas metamórficas de contacto, afloran inmediatamente al oeste del área estudiada y no tienen expresión en ella. Los estudios geológicos efectuados revelan sólo la presencia de cuerpos menores de tipo filonianos (diques y filones mantos), que intruyen a las rocas estratificadas de la Formación Curamallín. Éstas rocas filonianas son esencialmente andesíticas y dacíticas, con textura porfírica y fenocristales de plagioclasas, ferromagnesianos y ocasionalmente cuarzo. La alteración que los afecta es moderada y está dada por limonita y minerales arcillosos.

Las edades máximas de estas intrusiones se basan en la mínima edad encontrada para la Formación Curamallín, $14,5 \pm 1,4$ m.a. (Drake, 1976). Por otro lado, la edad de estos cuerpos filonianos se acota inferiormente por las efusiones del Grupo Volcánico Antuco-Sierra Velluda, de edad Pleistoceno Superior - Holoceno. Por lo tanto, estas rocas intruyeron en el lapso Mioceno Medio-Pleistoceno Superior temprano. Sin embargo, probablemente el desarrollo máximo de la fase filoniana haya coincidido con las etapas finales de las inyecciones magmáticas plutónicas, probablemente durante el Mioceno Superior (Moreno *et al.*, 1984).

Volcán Sierra Velluda.

La Sierra Velluda es la unidad volcánica más antigua del Grupo Volcánico Antuco-Sierra Velluda. Corresponde a un estratovolcán fuertemente erosionado, formado por flujos de lava y depósitos laháricos y piroclásticos que irradian desde la cumbre actual y cubren un área de más de 60 km² en el sector estudiado y se extienden por más de 150 km² fuera de ella (Moreno *et al.*, 1984).

En el Volcán Sierra Velluda se han diferenciado dos unidades litológicamente bien contrastadas y con discordancia de depositación entre ellas, denominadas Volcán Sierra Velluda I y II. La Unidad Sierra Velluda I es la más antigua y está formada principalmente por flujos de lahares y piroclastos, con escasas coladas lávicas andesíticas intercaladas. Por otro lado, la Unidad Sierra Velluda II está constituida fundamentalmente por flujos de lava (Moreno *et al.*, 1984).

Datos geocronológicos y cronoestratigráficos entregados por Moreno *et al.*, (1984) y Drake (1976), indican una edad Pleistoceno Superior baja para el Volcán

Sierra Velluda, sin descartar la posibilidad que se hubiese iniciado a fines del Pleistoceno Inferior (Lohmar, 2000).

Volcán Antuco.

El Volcán Antuco corresponde a un estratovolcán compuesto, esto quiere decir que el edificio volcánico se compone de intercalaciones de flujos de lavas y piroclastos, y consta de dos unidades principales: un primer edificio volcánico (Antuco I o Volcán Laja de Brügger, 1941) que culminó con la formación de una caldera, originando una avalancha volcánica, dejando un anfiteatro de 2 km de diámetro, donde posteriormente surgió un cono central (Antuco II o Volcán Antuco de Brügger, 1984), el cual se desarrolló en su interior (Moreno *et al.*, 1984). La actividad del volcán Antuco se inició a comienzos del Pleistoceno Superior, aproximadamente 130.000 A.P. (Thiele *et al.*, 1998).

Unidad Antuco I.

Esta unidad está definida por las lavas que forman el antiguo Volcán Laja (Brügger, 1941). Las lavas y piroclastos de esta unidad se apoyan en discordancia sobre los estratos plagados de la Formación Curamallín (Eoceno-Mioceno) y sobre los materiales volcánicos de la Sierra Velluda. Mediante criterios morfológicos, estratigráficos y, en parte composicionales, junto a antecedentes geocronológicos, se pueden distinguir tres subunidades ordenadas de mayor a menor antigüedad.

Subunidad I.1.

Según Moreno *et al.* (1984), corresponden a productos volcánicos emitidos durante el período inicial de actividad de este centro eruptivo. En sector del cerro Cóndor se puede reconocer una sucesión de lavas de colores grises, negros y rojizos, con alternancia de escasos piroclastos escoriáceos de lapilli, de al menos, 500 m de espesor, pues la base no es visible y su techo ha sido erosionado. Están intruidas por diques subverticales y se observan fallas normales que da lugar a un conjunto de bloques dislocados. Los diques son preferentemente basálticos y presentan texturas afírica y porfírica, con fenocristales de plagioclasas, olivino y ocasionalmente clinopiroxeno.

El cerro Cóndor parece ser un remanente dislocado de la base del volcán Antuco I, que habría sobrevivido al colapso del cono y posterior deslizamiento del flanco occidental que finalizó con la formación de la caldera en forma de anfiteatro.

También se observan afloramientos en los sectores oriental y sur del volcán (Figura 3), donde las abruptas paredes labradas por la erosión glaciaria muestran lavas bien estratificadas con intercalaciones de brechas y aglomerados, localmente poco consolidados. En el sector sur, los tipos litológicos corresponden a andesitas basálticas y andesitas de textura porfírica con fenocristales de plagioclasas, olivinos, clinopiroxenos y ocasionalmente ortopiroxenos.



Figura 3: Coladas de lavas de la subunidad Antuco I.1 en el sector oriental del edificio volcánico.

Las edades radiométricas realizadas por Moreno *et al.* (1984), mediante el método de K-Ar muestran edades de 84 ± 46 ka, menos de 124 ka y menos de 100 ka en 4 lavas de esta subunidad, sugiriendo una edad Pleistoceno Superior. Por otra parte, la presencia de lahares intercalados en la secuencia y las evidencias de erosión glaciaria permiten suponer que las erupciones de la subunidad I1 se produjeron desde el interglaciario Ris-Wurm y durante la última glaciación cuyo máximo habría sido a los 60 ka.

Subunidad I.2.

Según Moreno *et al.* (1984), esta unidad tiene su mejor desarrollo en el flanco norte del volcán Antuco y se encuentra bien expuesta en la pared interna de la caldera. Algunas de las coladas de esta unidad fluyeron hacia el sur y el este encauzándose en valles y quebradas labradas por la acción erosiva del hielo. Está compuesta por intercalaciones de lavas basálticas, basalto andesíticas y andesíticas con piroclastos escoriáceos. Las lavas poseen textura porfírica, con fenocristales de plagioclasas, olivinos y clinopiroxenos (algunas muestran ortopiroxenos).

El estado de conservación de las lavas de la Unidad I2 y la relación de contacto con las unidades infra y suprayacentes, permiten estimar que las erupciones tuvieron lugar en la etapa tardiglacial del Pleistoceno Superior e inmediatamente antes del postglacial, entre los 16 ka y los 11 ka A.P., además se tiene una edad C_{14} de 15.000 ± 500 años (Moreno *et al.*, 1984)

Subunidad I.3.

Moreno *et al.* (1984) explica que esta subunidad está representada por los flujos postglaciales de la Unidad Antuco I. éstas corresponden a basaltos con superficies escoráceas tipo "aa" y se reconocen en el flanco norte y noreste del volcán, aunque en los flancos este y sur, en el valle del estero El Aguado o del Volcán, algunos flujos fueron asignados tentativamente a esta unidad considerando criterios morfoestructurales. Además, estas lavas sólo se pueden diferenciar de la unidad Antuco II, considerando su relación con la caldera.

Los basaltos presentan textura porfírica con fenocristales de plagioclasas, olivino y clinopiroxeno. Las lavas habrían sido emitidas al inicio del postglacial y antes de la formación de la caldera. Un fechado en C_{14} reveló una edad de 9.700 ± 600 años, por lo que estas lavas se habrían depositado entre los 11.000 (?) a los 9.100 años A.P. (Moreno *et al.*, 1984).

Depósito de Avalancha Volcánica del Volcán Antuco.

Thiele *et al.* (1998) designan con este nombre a una potente unidad de relleno del valle del Río Laja. Su origen está relacionado con una violenta erupción freatomagmática, de tipo Bandai-San, que causó el colapso gravitacional del cono del Volcán Antuco I, generándose una voluminosa avalancha, que descendió por el valle ya mencionado. Según Moreno *et al.* (1984), este evento catastrófico ocurrió hace 9.700 ± 600 años A.P. Sin embargo, Lohmar (2000) determina una edad de 6.250 ± 60 años A.P. Thiele y Moreno (1995) señalan que la erupción estuvo acompañada por descargas de oleadas piroclásticas dirigidas lateralmente, las cuales originaron las arenas negras de Trupán- Laja, cuyos depósitos se extendieron hasta la Depresión Central, en forma de un gigantesco abanico.

Unidad Antuco II.

Moreno *et al.* (1984) denomina esta unidad a los materiales volcánicos que forman el estratovolcán moderno edificado en la caldera generada por el colapso

del cono volcánico de Antuco I. los flujos se encuentran derramados preferentemente al oeste en la dirección de la apertura de la caldera, aunque en los sectores orientales y sur, se observan algunas lavas que sobrepasaron los bordes de la caldera gracias a la erosión glacial de la zona, la cual generó portezuelos lo que permitió un paso más fácil para las coladas de Antuco II.

Los flujos de lavas y piroclastos de esta unidad cubren parcialmente a los materiales volcánicos del Antuco I y se disponen en discordancia sobre los estratos plegados de la Formación Curamallín (Eoceno-Mioceno) sobre los materiales volcánicos de la Sierra Velluda y sobre los depósitos de remoción en masa del valle del río Laja (Figura 4). Según criterios morfológicos y estratigráficos apoyados con antecedentes históricos, es probable distinguir cinco subunidades, definidas como Qvall1, Qvall2, Qvall3, Qvall4, Qvall5, ordenadas de mayor a menor antigüedad.



Figura 4: Flujos de lavas y piroclastos de la Unidad Antuco II en el borde occidental del volcán Antuco.

Subunidad II.1.

Corresponde a los flujos más antiguos ligados a la etapa inicial del volcán Antuco II. Estas lavas habrían bajado por el valle del río Laja rellenándolo parcialmente. Presentan textura porfírica, con fenocristales de plagioclasas, olivino y clinopiroxeno, en una masa fundamental intergranular. Las coladas tienen espesores estimados entre 10 y 15 metros y entre ellas se reconocen depósitos clásticos aparentemente de origen lahárico. Estos flujos habrían sido excavados por

la erosión fluvial provocada por el río Laja y habría eliminado las coladas ubicadas aguas arriba.

La edad C^{14} de 9.700 ± 600 A.P. años para el deslizamiento dada anteriormente, entrega una edad máxima para la depositación de estas coladas de la subunidad II.1 y considerando la fase erosiva fluvial que la afectó, se podría estimar una edad algo menor a los 9.000 años A.P.

Subunidad II.2.

Estas lavas se reconocen en el fondo del valle del río Laja en la localidad de Chacay y hasta 2 km aguas arriba. Las coladas se apoyan directamente sobre los depósitos deslizados y sedimentos fluviales. A su vez los flujos están recubiertos por sedimentos fluviales y coladas de la Unidad II.3. En esta localidad se reconocen basaltos y andesitas basálticas grises, porfíricas, con fenocristales de plagioclasas, olivino y clinopiroxeno.

Subunidad II.3.

Ésta subunidad está representada por coladas de lavas basálticas y andesíticas basálticas que constituyen gran parte de la estructura del cono principal del volcán Antuco II. Los derrames se apoyan directamente y recubren en forma parcial a las lavas de la Unidad II.2 y de la Unidad I. Además, se depositan sobre los estratos plagados de la formación Curamallín, sobre los estratos de la Sierra Velluda y sobre los materiales deslizados y sedimentos aluviales del valle del río Laja. A su vez, los flujos de lavas están recubiertos parcialmente por sedimentos aluviales, laháricos, glaciales recientes, depósitos piroclásticos y por coladas de lavas de la subunidad II.4. Los espesores de estos flujos varían de 2 a 20 m. Poseen textura porfírica con fenocristales de plagioclasas y olivino.

Es complejo determinar la edad, no obstante, la presencia de una cubierta parcial de sedimentos glaciales permite suponer que ellos están ligados a una neoglaciación, tal vez la más reciente, ocurrida hace 2500 - 1000 años A.P. Por otra parte, las coladas de la subunidad II.4 que las recubren, sugieren un periodo no muy corto de actividad volcánica posterior, por lo que los flujos tengan como mínimo 1000 años A.P.

Subunidad II.4.

Las lavas de esta unidad son las más recientes entre las prehistóricas, previo a 1752, año donde se tiene el primer registro escrito de una erupción del volcán Antuco. No muestran efectos de erosión glacial y sus superficies son escoriáceas de tipo "aa". Los flujos cubren gran parte de las coladas de la subunidad II.3 y fluyeron preferentemente hacia el lado occidental del cráter principal del volcán Antuco y de centros de emisión parásitos al norte y suroeste del cono.

Corresponden a basaltos y andesitas basálticas con fenocristales de plagioclasas, olivino y ocasionalmente clinopiroxeno.

Subunidad II.5.

Esta unidad corresponde a las erupciones históricas del volcán Antuco y está representada por la erupción de lavas que tuvo lugar en 1853 en el flanco norte del volcán Antuco II, desde una fisura de 500 m de largo ubicada entre los 2100 y 2300 m.s.n.m. A lo largo de esta fisura se edificaron pequeños conos de piroclastos rojizos de 20 a 40 m de altura con cráteres de 50 a 100 m de diámetro. La colada basáltica tiene 3 km de longitud y 1 km de ancho en promedio, con una superficie rugosa y escoriácea de tipo "aa".

Petrográficamente corresponden a basaltos porfíricos con fenocristales de plagioclasas, olivino y escaso clinopiroxeno en una masa fundamental intergranular.

Centros volcánicos adventicios

En los flancos oriental y occidental de los volcanes Antuco I y II, se reconocen tres centros volcánicos adventicios de pequeñas dimensiones, asociados a flujos de lavas de composición basáltica. Estos centros son definidos como La Herradura, Sin Nombre (NN) y Los Pangues.

Centro volcánico La Herradura.

Consiste en una extensión de lavas basálticas, cordadas con caracteres de pahoehoe (Figura 5), cuyo punto de emisión no constituyó un cráter. Estas lavas solo forman un conito de unos 50 m de altura. Sin embargo, en las proximidades del lago Laja y a orillas del camino que conduce a los barros, se observa un cráter de unos 250 m de diámetro, el cual se habría generado por una explosión freática,

debido a la ausencia de piroclastos juveniles asociados a esta actividad. Su edad se relaciona tentativamente a la subunidad Antuco II.3, es decir Holoceno tardío.



Figura 5: Coladas de lava cordadas emitidas por el centro volcánico adventicio La Herradura.

Centro volcánico NN.

Este centro volcánico consta de un pequeño cono de piroclastos de 50 m de elevación, ubicado a 5 km al NW de Los Barros y a 2.250 m.s.n.m, ligado a una extensa corriente de lavas basálticas que descendió por un valle glacial hasta alcanzar el lago Laja a 5,5 km de distancia. El cono presenta efectos de avanzada erosión glacial de altura y las lavas de tipo "aa" muestran una gruesa cubierta de piroclastos de la Unidad Antuco II. La edad de este centro volcánico se estima similar a la subunidad Antuco II.2.

Centro Volcánico Los Pangues.

Este centro está ubicado en el curso superior del valle de Los Pangues, inmediatamente al oeste del volcán Antuco, consiste en un cono de piroclastos escoráceos de color gris negro y rojizo de diámetro basal cercanos a los 250 m y 50 m de altura. Presenta un cráter circular de 20 m y 4 de profundidad. Al noreste de este centro se han desarrollados dos conos pequeños de 6 m de altura de tipo "hornitos"

De este centro fueron emitidos al menos dos flujos de basaltos de olivino. Ni el cono ni las coladas "aa" muestran erosión glacial y se disponen sobre los depósitos morrénicos y coladas de lavas de la subunidad Antuco II.3 afectada por erosión glacial de altura. A su vez las coladas de basaltos están parcialmente

cubiertas por pequeñas avalanchas laháricas ligadas a las erupciones más recientes del volcán Antuco II.

Depósitos Piroclásticos.

Según Moreno *et al.* (1984), estos depósitos cubren la mayor parte del área estudiada, con extensiones y espesores variables. Por este motivo, sólo se representan las principales áreas de acumulación en el mapa. Se trata de depósitos constituidos por un agregado monomítico de lapilli escoriáceo y cenizas, con bombas de distintos tamaños y de composición andesítico-basáltica, en los sectores más cercanos al Volcán Antuco. Estos materiales han sido emitidos durante diferentes períodos de actividad histórica y prehistórica de dicho volcán.

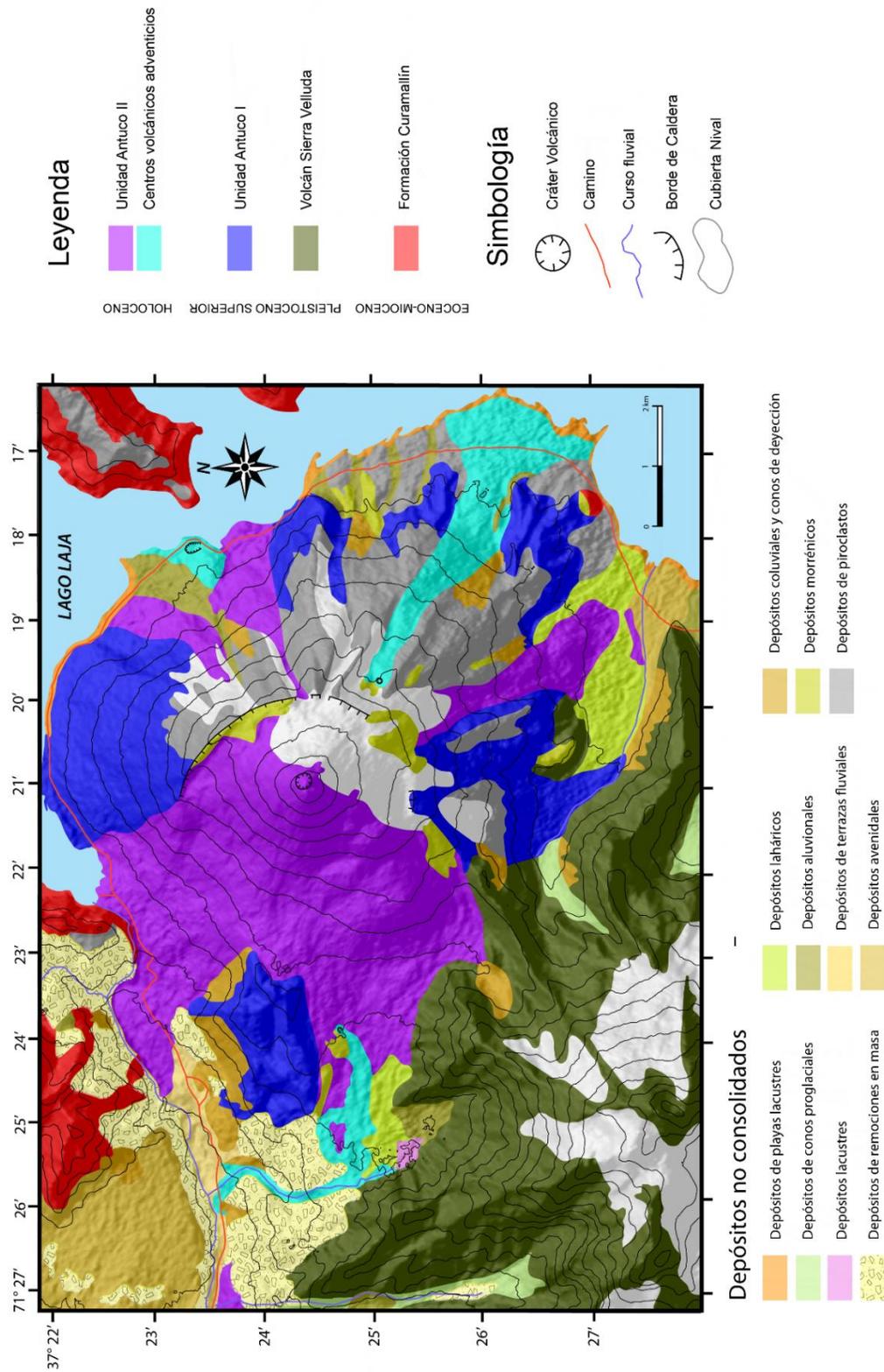


Figura 6: Mapa geológico de la zona de estudio. Escala 1 a 50.000. Modificado de Moreno et al., 1984.

2. Petrografía.

El estudio petrográfico de 30 láminas delgadas correspondientes a las distintas muestras de las unidades del volcán Antuco, muestran rocas vesiculares ricas en cristales, las cuales presentan una textura porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasas, olivinos y clinopiroxenos (en algunos casos ortopiroxenos), formando, en ocasiones, cúmulos de 1 a 4 mm en promedio.

Las proporciones modales fueron obtenidas mediante el programa JMicroVision v.1.2.7, con una malla aleatoria de 500 puntos, para cada muestra del volcán Antuco. Como se observa en la Tabla 1 las proporciones modales no varían en gran medida, salvo en algunas muestras de la Subunidad Antuco I.2 donde los fenocristales se encuentran en menor abundancia. La matriz, en todas las muestras, está compuesta principalmente por plagioclasas, clinopiroxenos, magnetita y olivinos en menor proporción, generando una textura intergranular.

Tabla 1: Resumen de los porcentajes modales y texturas de las distintas unidades del volcán Antuco.

| | U. Antuco I.1 | U. Antuco I.2 | U. Antuco I.3 | U. Antuco II | La Herradura | Los Pangues |
|----------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|-------------|
| Fenocristales | | | | | | |
| Plagioclasas % | 14,8 - 21 | 4,8 - 9 | 17,6 - 32 | 9,4 - 30,6 | 23,6 - 38 | 16,4 - 24,2 |
| Olivino % | 0,8 - 1,2 | 0,4 - 0,6 | 0,6 - 4 | 2,4 - 12,8 | 1,6 - 6,6 | 4,4 - 7 |
| Clinopiroxenos% | 0,1-0,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ortopiroxenos % | 0,5 - 1,7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Opacos % | 0 - 0,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Vesículas % | 1,2 - 8,2 | 1 - 11,6 | 0 - 15,2 | 0,4 - 9 | 2 - 11,2 | 6,8 - 15,8 |
| Masa Fundamental | 74 - 80,2 | 83 - 92,2 | 59,6 - 69,2 | 58,4 - 79,2 | 56,2 - 63,2 | 59,8 - 70,2 |
| Texturas | | | | | | |
| Sieve | x | x | x | x | x | x |
| Glomeroporfírica | x | | x | x | x | x |
| Traquítica | x | | | | | |
| Vesicular | x | x | x | x | x | x |
| Intergranular | x | x | x | x | x | x |

Unidad Antuco I

Esta unidad corresponde a la primera fase de la formación del edificio volcánico del volcán Antuco. Dada sus características petrográficas es necesario separarlas en las tres subunidades definidas previamente (Moreno *et al.* 1984).

Subunidad I.1.

Las muestras de esta subunidad se caracterizan por ser rocas porfíricas, con una leve textura traquítica, están compuestas por cristales de olivino de tamaños entre 0,1 y 1,2 mm; plagioclasas con tamaños entre 0,1 y 2,5 mm, clinopiroxenos con tamaños entre 0,3 y 0,4 mm; ortopiroxenos con tamaños entre 0,7 y 1 mm y algunos cristales de magnetita, asociados a clinopiroxenos principalmente, que se presentan con tamaños entre 0,1 y 0,4 mm.

Los fenocristales de plagioclasas se encuentran con formas subhedrales y anhedrales, donde todas muestran zonación y en las de mayor tamaño los bordes se encuentran reabsorbidos mostrando frecuentemente “embahiamientos” y textura *sieve*. En cambio, las plagioclasas de menor tamaño (0,1-0,5 mm) no siempre presentan zonación, son euhedrales y en sus bordes no se observa reabsorción ni presentan textura *sieve*. Además, algunas plagioclasas se encuentran fracturadas.

Los fenocristales de olivino se presentan con distintos grados de reabsorción, algunos poseen inclusiones de opacos. Los fenocristales de clinopiroxenos y ortopiroxenos son subhedrales, además de ser escasos, no poseen muchas inclusiones y están relacionados a los fenocristales de magnetita. Los olivinos y algunos fenocristales de clinopiroxenos presentan bordes de reacción compuestas de clinopiroxeno, e inclusiones de plagioclasas y opacos. En algunas muestras se observan fenocristales de magnetita y algunos glomérulos de plagioclasas, olivinos y clinopiroxenos.

La matriz se compone por plagioclasas, clinopiroxenos y en menor cantidad olivinos y magnetita, mostrando una textura pseudo-traquítica intergranular (Figura 7).



Figura 7: Textura pseudo-traquítica observable en la subunidad Antuco I.1.

Subunidad I.2.

Esta subunidad está representada por lavas con textura porfírica mostrando una menor proporción de fenocristales, observándose solo plagioclasas y olivinos, levemente fracturados y reabsorbidos.

Las plagioclasas son subhedrales, de tamaño entre 0,1 a 2,4 mm, y presentan zonación y textura *sieve*. Los olivinos (0,1-1 mm) son subhedrales y están reabsorbidos al igual que las plagioclasas. La matriz está constituida por microlitos de plagioclasas y clinopiroxenos mostrando una textura intergranular.

Subunidad I.3.

Las muestras de esta subunidad poseen fenocristales de plagioclasas y olivinos, con características muy similares a la subunidad I.1, mostrando una textura porfírica. Las plagioclasas son subhedrales, con tamaños entre 0,1-3,6 mm, presentan zonación y poseen textura *sieve*, exceptuando las plagioclasas de tamaños entre 0,1 y 0,5 mm, que se presentan euhedrales y zonadas. Los olivinos se encuentran reabsorbidos, son subhedrales y poseen inclusiones de opacos. Sus tamaños oscilan entre 0,1 y 1,5 mm. También se distingue una textura

glomeroporfírica de plagioclasas y olivinos (Figura 8). Sólo aparecen algunos clinopiroxenos y opacos de tamaños entre 0,1-0,5 mm.

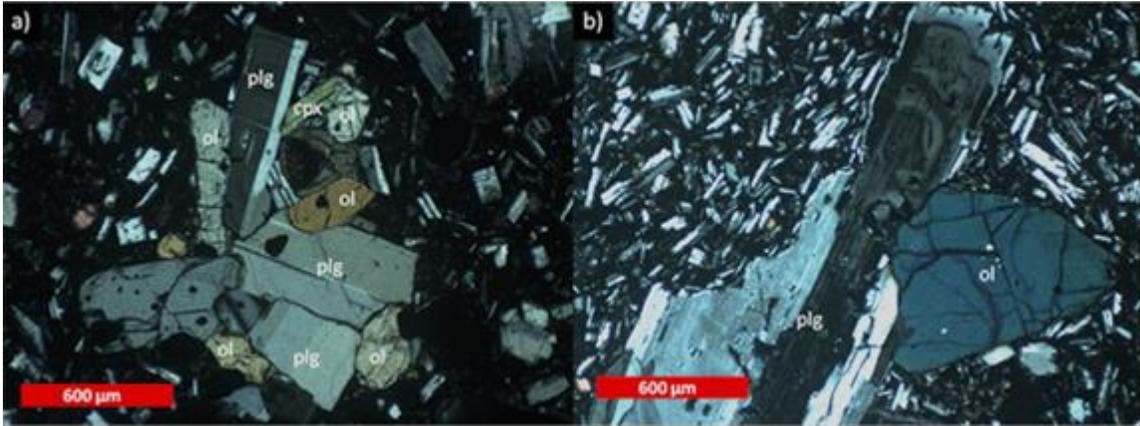


Figura 8: Textura glomeroporfírica presente en la Unidad Antuco I. a) Glomérulos de plagioclasas, olivinos y clinopiroxenos. b) Glomérulos de plagioclasas (zonada) y olivino

. La matriz está constituida principalmente por plagioclasas y clinopiroxenos formando una textura intergranular.

Unidad Antuco II

Esta unidad correspondiente a la segunda fase de la formación del edificio volcánico, posterior al colapso lateral que generó la avalancha volcánica. Presenta lavas porfíricas con fenocristales de plagioclasas y olivinos. Las plagioclasas presentan zonación y fracturas y muestran una marcada textura *sieve*, de la misma forma que las Subunidades I.1 y I.2. A veces, se observan algunos crecimientos de olivinos, clinopiroxenos y opacos en el interior de estas plagioclasas. Los olivinos se muestran subhedrales y anhedrales, reabsorbidos en distintos grados y con inclusiones de opacos. En ocasiones estos cristales forman glomérulos junto a las plagioclasas. Los tamaños para los fenocristales de plagioclasas y olivinos son 0,1-3,93 mm y 0,1-2,2 respectivamente. También se ven algunos cristales de opacos de tamaños hasta 0,6 mm.

La matriz se compone principalmente por plagioclasas y clinopiroxenos, los olivinos y opacos se encuentran en menor medida, formando textura intergranular.

Centros volcánicos adventicios

Los centros volcánicos adventicios La Herradura y Los Pangues están formados por fenocristales de plagioclasas y olivinos insertos en una matriz de plagioclasas y clinopiroxenos generando una textura porfírica intergranular.

Sus proporciones son notoriamente diferentes, ya que La Herradura presenta 35% de fenocristales, mostrando plagioclasas subhedrales con tamaños variables entre 0,1 y 6 mm, las de mayor tamaño están generalmente zonadas y con textura *sieve*, además posee fenocristales de olivino con tamaños entre 0,1 y 3,5 mm, presentando bordes reabsorbidos. A veces se observan glomérulos de olivino y plagioclasas. La matriz se compone de plagioclasas y clinopiroxenos, con escasos olivinos y magnetita.

Por otro lado, Los Pangues posee menor cantidad de fenocristales, donde las plagioclasas se encuentran zonadas y con textura *sieve* con tamaños entre 0,1 y 3,7 mm, los olivinos muestran indicios de reabsorción y la matriz está compuesta principalmente de plagioclasas y clinopiroxenos.

Discusión petrográfica.

Dentro de las características petrográficas generales, se puede observar que la composición mineral de las lavas corresponde a rocas máficas porfíricas de olivino, con fenocristales de plagioclasas zonados y olivinos reabsorbidos, con una matriz intergranular de plagioclasas, clinopiroxenos, olivinos y opacos. Sólo en la Unidad Antuco I.1, se pueden observar fenocristales de clinopiroxenos y ortopiroxenos los que desaparecen en las unidades siguientes. Al contrario, la proporción de las vesículas aumenta en las unidades más jóvenes, al igual que la proporción de olivinos (Figura 9).

Además, la proporción de la masa fundamental se mantiene constante, mostrando únicamente en las rocas de la Unidad Antuco I.2 un aumento en esta proporción a casi un 90% de la roca total.

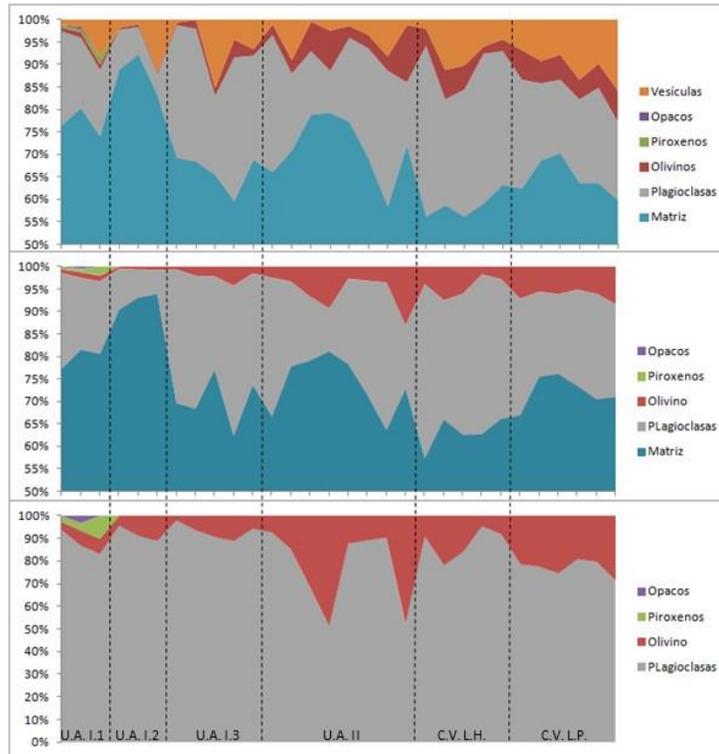


Figura 9: Distribución modal de fenocristales y fenocristales-matriz de las distintas unidades del volcán Antuco. Se pueden encontrar las muestras ordenadas según SiO_2 y $\#\text{MgO}$ en el Anexo B.

Al realizar una comparación textural de las unidades efusivas descritas del volcán Antuco (Figura 10), se puede observar que la proporción de fenocristales, en especial de olivino aumenta hacia la Unidad II.



ANT-06 ANT-03 ANT-26 ANT-28 ANT-12 ANT-01
 U.A. I.1 U.A. I.2 U.A. I.3 U.A. II C.V.L.H. C.V.L.P

Figura 10: Imagen comparativa de las texturas en las distintas subunidades del volcán Antuco. (U.A. I.1: Unidad Antuco I.1; U.A. I.2: Unidad Antuco I.2; U.A. I.3: Unidad Antuco I.3; U.A. II: Unidad Antuco II; C.V.L.H: Centro Volcánico La Herradura; C.V.L.P: Centro Volcánico Los Pangues)

En ese sentido, la presencia de fenocristales de olivinos podría indicar que estos minerales no fueron removidos del fundido dentro del reservorio, por lo que el tiempo de residencia de estos magmas en el reservorio debe haber sido corto, al contrario de la Unidad Antuco I, donde se pueden encontrar una mayor cantidad de texturas de desequilibrio, menores cantidades de olivino, y en especial, una mayor proporción de matriz, la que podría indicar un proceso de segregación mineral y un ascenso de fundidos pobres en cristales y más diferenciados que los de la Unidad Antuco II, denotando tiempos de residencia mayores en el reservorio.

También se puede observar que la mayoría de los fenocristales de plagioclasas que presentan zonación y textura *sieve* son subhedrales y anhedrales. Recalcando como aparece la textura *sieve* en las plagioclasas, se pueden observar dos casos generales, uno afectando solamente a una parte de la zonación de las plagioclasas (tanto en los bordes como en las zonas internas) y otra afectando a todo el cristal de las plagioclasas. Mientras que los fenocristales sin textura *sieve* son de menor tamaño y euhedrales, pero igualmente muestran zonación.

Los opacos se encuentran en muy bajas cantidades en la mayoría de las muestras y asociados a minerales ferromagnesianos. Sólo en la Unidad I.1 se pueden encontrar fenocristales de este tipo. Esto corroboraría que, en esta unidad, la diferenciación debe haber sido mayor que en el resto.

3. Geoquímica

A partir de las 30 muestras recolectadas en terreno se realizaron análisis geoquímicos en roca total de las distintas unidades efusivas del volcán Antuco, a las cuales se adicionaron 30 datos geoquímicos de trabajos anteriores (López-Escobar *et al.*, 1981; Moreno *et al.*, 1984; Lohmar, 2000).

Los análisis de las muestras de este trabajo se realizaron en los laboratorios de ActLabs, Canadá. Estas muestras son preparadas en una mezcla de metaborato de litio y tetraborato de litio en un horno de inducción. El fundido es vertido inmediatamente en una solución al 5% de ácido nítrico y mezclado hasta que se disuelve totalmente (30 minutos aproximadamente). Las muestras son llevadas para la lectura de óxidos mayores y algunos elementos trazas seleccionados en combinación simultánea/secuencial en un ICP Thermo Jarrell-Ash ENVIRO II o un ICP Varian Vista 735. Para elementos trazas en general se utiliza un ICP/MS Perkin Elmer SCIEX ELAN 6000, 6100 o 9000 con la metodología respectiva.

Elementos mayores.

Las Tablas 2, 3, y 4 muestran los valores de los elementos mayores de cada unidad del volcán Antuco obtenidas en este trabajo. Los datos correspondientes a trabajos anteriores se pueden encontrar en el Anexo I.

Tabla 2: Elementos mayores para la Unidad Antuco I

| Unidad Muestra | Unidad I.1 | | | Unidad I.2 | | | Unidad I.3 | | | | |
|--------------------------------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|--------|--------|
| | ANT-06 | ANT-07 | ANT-08 | ANT-03 | ANT-04 | ANT-15 | ANT-05 | ANT-13 | ANT-14 | ANT-16 | ANT-26 |
| SiO ₂ | 59,76 | 58,73 | 56,24 | 54,4 | 53,85 | 54,03 | 52,88 | 52,6 | 53,37 | 53,09 | 52,45 |
| TiO ₂ | 1,015 | 1,01 | 1,079 | 1,403 | 1,37 | 1,393 | 1,142 | 1,084 | 1,102 | 1,041 | 0,991 |
| Al ₂ O ₃ | 18,11 | 17,38 | 17,53 | 17,04 | 17,12 | 17,11 | 19,07 | 19,27 | 19,36 | 19,3 | 19,03 |
| FeO | 5 | 4,9 | 6,6 | 6,7 | 5,6 | 8,7 | 7 | 5,1 | 5,2 | 5 | 6,9 |
| Fe ₂ O ₃ | 1,79 | 1,84 | 1,49 | 2,92 | 4,01 | 0,6 | 0,95 | 2,79 | 2,78 | 3,13 | 0,82 |
| MnO | 0,152 | 0,153 | 0,158 | 0,172 | 0,169 | 0,171 | 0,145 | 0,141 | 0,142 | 0,143 | 0,141 |
| MgO | 2,01 | 1,99 | 3,31 | 3,64 | 3,61 | 3,65 | 3,99 | 3,42 | 3,49 | 4,45 | 4,81 |
| CaO | 5,9 | 5,8 | 7,01 | 7,92 | 7,97 | 7,74 | 9,48 | 9,23 | 9,33 | 9,45 | 9,52 |
| Na ₂ O | 4,74 | 4,67 | 4 | 4,03 | 4,08 | 4,15 | 3,64 | 3,68 | 3,66 | 3,54 | 3,47 |
| K ₂ O | 1,52 | 1,5 | 1,31 | 0,88 | 0,87 | 0,91 | 0,81 | 0,7 | 0,72 | 0,74 | 0,67 |
| P ₂ O ₅ | 0,34 | 0,34 | 0,21 | 0,27 | 0,25 | 0,27 | 0,24 | 0,2 | 0,19 | 0,22 | 0,22 |
| LOI | 0,04 | 0,21 | 0,28 | 0 | -0,12 | -0,17 | -0,05 | 0,12 | 0,25 | 0,08 | 0 |
| Total | 100,9 | 99,07 | 99,96 | 100,1 | 99,4 | 99,52 | 100,1 | 98,91 | 100,2 | 100,7 | 99,82 |

Tabla 3: Elementos mayores para la Unidad Antuco II

| Unidad | Unidad II | | | | | | | |
|--------------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Muestra | ANT-02 | ANT-17 | ANT-18 | ANT-19 | ANT-20 | ANT-21 | ANT-27 | ANT-28 |
| SiO ₂ | 52,12 | 52,21 | 50,96 | 50,98 | 51,64 | 51,56 | 52,68 | 50,53 |
| TiO ₂ | 1,042 | 1,061 | 0,995 | 0,973 | 0,994 | 0,975 | 1,08 | 0,964 |
| Al ₂ O ₃ | 19,06 | 19 | 16,96 | 16,97 | 19,03 | 18,88 | 19,07 | 16,85 |
| FeO | 6,6 | 7,1 | 7,9 | 7,5 | 6,2 | 5,7 | 5,9 | 7,7 |
| Fe ₂ O ₃ | 1,47 | 0,92 | 1,57 | 1,45 | 1,6 | 1,91 | 2,27 | 1,62 |
| MnO | 0,14 | 0,142 | 0,157 | 0,153 | 0,137 | 0,134 | 0,14 | 0,158 |
| MgO | 4,93 | 5,09 | 9,03 | 8,27 | 4,79 | 4,67 | 4,96 | 8,94 |
| CaO | 9,4 | 9,55 | 8,35 | 8,45 | 9,81 | 9,7 | 9,53 | 8,2 |
| Na ₂ O | 3,47 | 3,52 | 3,13 | 3,15 | 3,35 | 3,32 | 3,52 | 3,09 |
| K ₂ O | 0,69 | 0,69 | 0,63 | 0,66 | 0,68 | 0,68 | 0,68 | 0,64 |
| P ₂ O ₅ | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,23 | 0,21 | 0,22 | 0,21 | 0,22 |
| LOI | -0,13 | -0,11 | -0,18 | -0,2 | -0,13 | -0,09 | -0,04 | -0,17 |
| Total | 99,75 | 100,2 | 100,6 | 99,43 | 99,02 | 98,3 | 100,7 | 99,61 |

Tabla 4: Elementos mayores para los Centros Volcánicos La Herradura y Los Pangues.

| Unidad | Centro Adventicio La Herradura | | | | | Centro adventicio Los Pangues | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Muestra | ANT-09 | ANT-10 | ANT-11 | ANT-12 | ANT-25 | ANT-01 | ANT-22 | ANT-23 | ANT-24 | ANT-29 |
| SiO ₂ | 52,8 | 51,84 | 52,06 | 52,19 | 51,82 | 51,48 | 51,67 | 52,42 | 52,15 | 51,82 | 52,19 |
| TiO ₂ | 1,198 | 1,169 | 1,16 | 1,171 | 1,181 | 0,991 | 1,008 | 1,024 | 1,01 | 1,001 | 1,003 |
| Al ₂ O ₃ | 17,84 | 17,66 | 17,39 | 17,74 | 18,26 | 18,37 | 18,42 | 18,96 | 18,73 | 18,3 | 18,65 |
| FeO | 7,1 | 6,9 | 7,2 | 7,7 | 7,1 | 7,7 | 7 | 7,3 | 7,9 | 7,5 | 7,2 |
| Fe ₂ O ₃ | 1,83 | 1,74 | 1,61 | 0,77 | 1,39 | 0,29 | 1,36 | 1,03 | 0,48 | 0,81 | 1,16 |
| MnO | 0,157 | 0,154 | 0,155 | 0,153 | 0,152 | 0,141 | 0,143 | 0,144 | 0,148 | 0,145 | 0,146 |
| MgO | 5,35 | 5,21 | 5,41 | 5,21 | 5,14 | 5,69 | 6,06 | 5,84 | 6,27 | 6,41 | 6,09 |
| CaO | 9,07 | 8,92 | 9,04 | 8,88 | 8,94 | 9,34 | 9,4 | 9,42 | 9,32 | 9,33 | 9,39 |
| Na ₂ O | 3,55 | 3,47 | 3,46 | 3,54 | 3,46 | 3,31 | 3,31 | 3,35 | 3,34 | 3,31 | 3,31 |
| K ₂ O | 0,83 | 0,79 | 0,8 | 0,82 | 0,8 | 0,67 | 0,65 | 0,68 | 0,67 | 0,66 | 0,67 |
| P ₂ O ₅ | 0,25 | 0,25 | 0,24 | 0,26 | 0,24 | 0,2 | 0,2 | 0,22 | 0,21 | 0,2 | 0,21 |
| LOI | -0,12 | 0,02 | -0,03 | -0,1 | -0,06 | -0,19 | -0,17 | -0,21 | -0,23 | -0,26 | -0,2 |
| Total | 100,7 | 98,91 | 99,3 | 99,19 | 99,23 | 98,85 | 99,83 | 101 | 100,9 | 100,1 | 100,6 |

Los datos geoquímicos de elementos mayores de las lavas del volcán Antuco, exponen rangos de sílice normalizado amplios, entre 51,06% y 65,28% con un aumento paulatino de los compuestos alcalinos que va desde 3,67% a 7,80% (Figura 11). Estos rangos muestran un cambio composicional que va desde basaltos a dacitas. Además, de manera general, las lavas del volcán Antuco se encuentran dentro de la serie calcoalcalina de medio K (Figura 12).

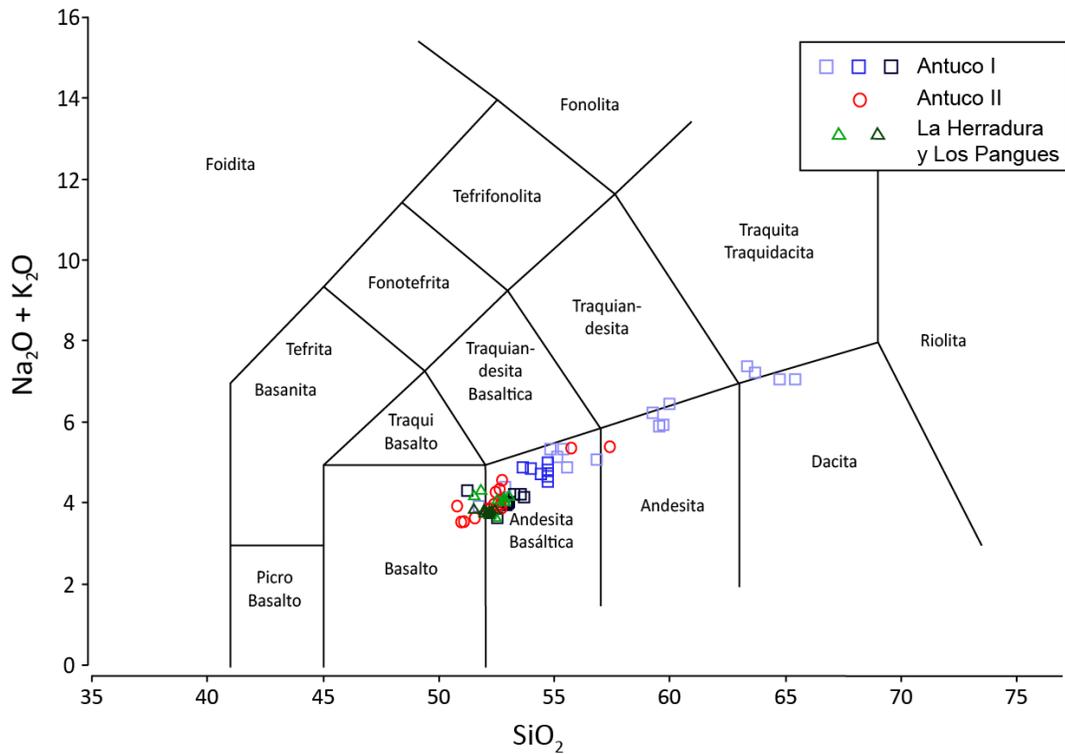


Figura 11: Diagrama TAS de todas las muestras del volcán Antuco separadas en sus unidades (muestras obtenidas de Vergara & López-Escobar, 1977, López-Escobar 1981, Lohmar, 2000; este trabajo)

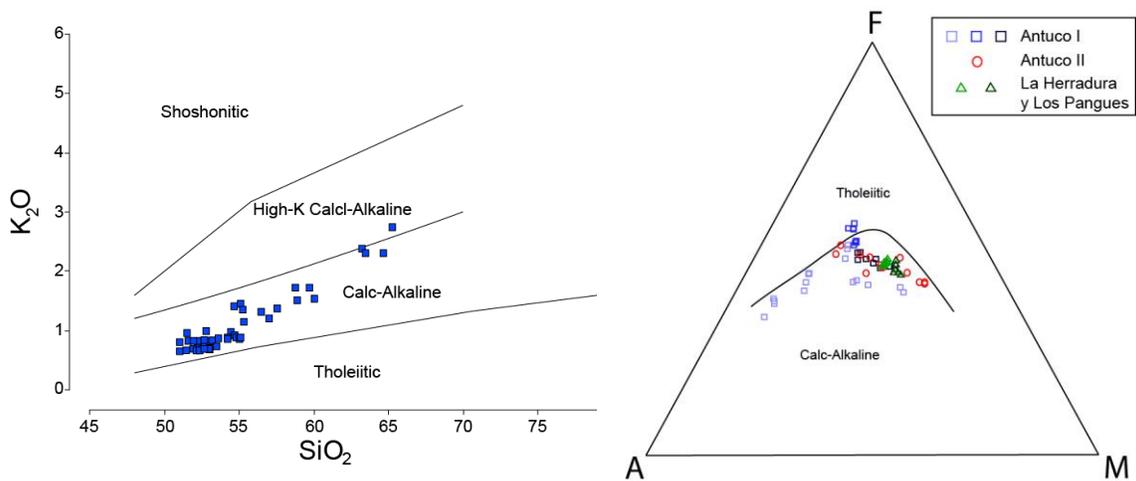


Figura 12: Diagrama K_2O vs SiO_2 (Peccerillo y Taylor, 1976) y AFM (Irvine & Baragar 1971) para todas las muestras del volcán Antuco.

Unidad Antuco I.

Esta unidad se caracteriza principalmente por poseer el mayor rango composicional, el cual está representado por la Subunidad I.1 que muestra variaciones desde los 51,56% hasta los 65,28% de SiO₂, además, de encontrarse los contenidos más altos de elementos alcalinos (7,8%), mostrando variaciones composicionales desde basaltos a dacitas. Sin embargo, las Subunidades I.2 y I.3 se encuentran más acotados mostrando sólo composiciones correspondientes a andesitas basálticas para la Subunidad I.2 y basaltos a andesitas basálticas para la subunidad I.3.

Las muestras que caen en el campo de las dacitas corresponden a 2 coladas de lava de la Unidad Antuco I, un filón manto y un dique indicado por Lohmar (2000).

Otra observación importante es que las muestras de la Unidad Antuco I corresponden a la serie calcoalcalina según el diagrama AFM de Irvine & Baragar (1971) en el cual solo algunas muestra de la Subunidad I.2 se encuentran en el campo toleíítico, aunque esto no implica que las muestras pertenezcan a la serie toleíítica, pues podrían haber errores en los análisis químicos asociados a altos contenidos de pérdida por calcinación, que podrían inducir a errores en los contenidos de los óxidos (Lohmar, 2000).

Unidad Antuco II.

A diferencia de la Unidad Antuco I, ésta unidad se encuentra más acotada (51,06% a 57,09%), mostrando variaciones composicionales desde basaltos a andesitas. Los valores de álcalis están entre los 3,77% y 5,66%. Por otra parte, según el diagrama AFM, la Unidad Antuco II sigue mostrando signatura calcoalcalina. Dentro de esta unidad se pueden encontrar los valores de #Mg más altos de las lavas del volcán Antuco, mostrando un máximo de 0,54 para la muestra ANT-28 (este trabajo).

La Herradura y Los Pangues.

Los centros volcánicos adventicios La Herradura y Los Pangues se encuentran acotados cerca del límite basalto-andesitas basálticas y dentro de la serie calcoalcalina. Estos centros volcánicos son similares a la Unidad Antuco II salvo que muestran una menor diferenciación.

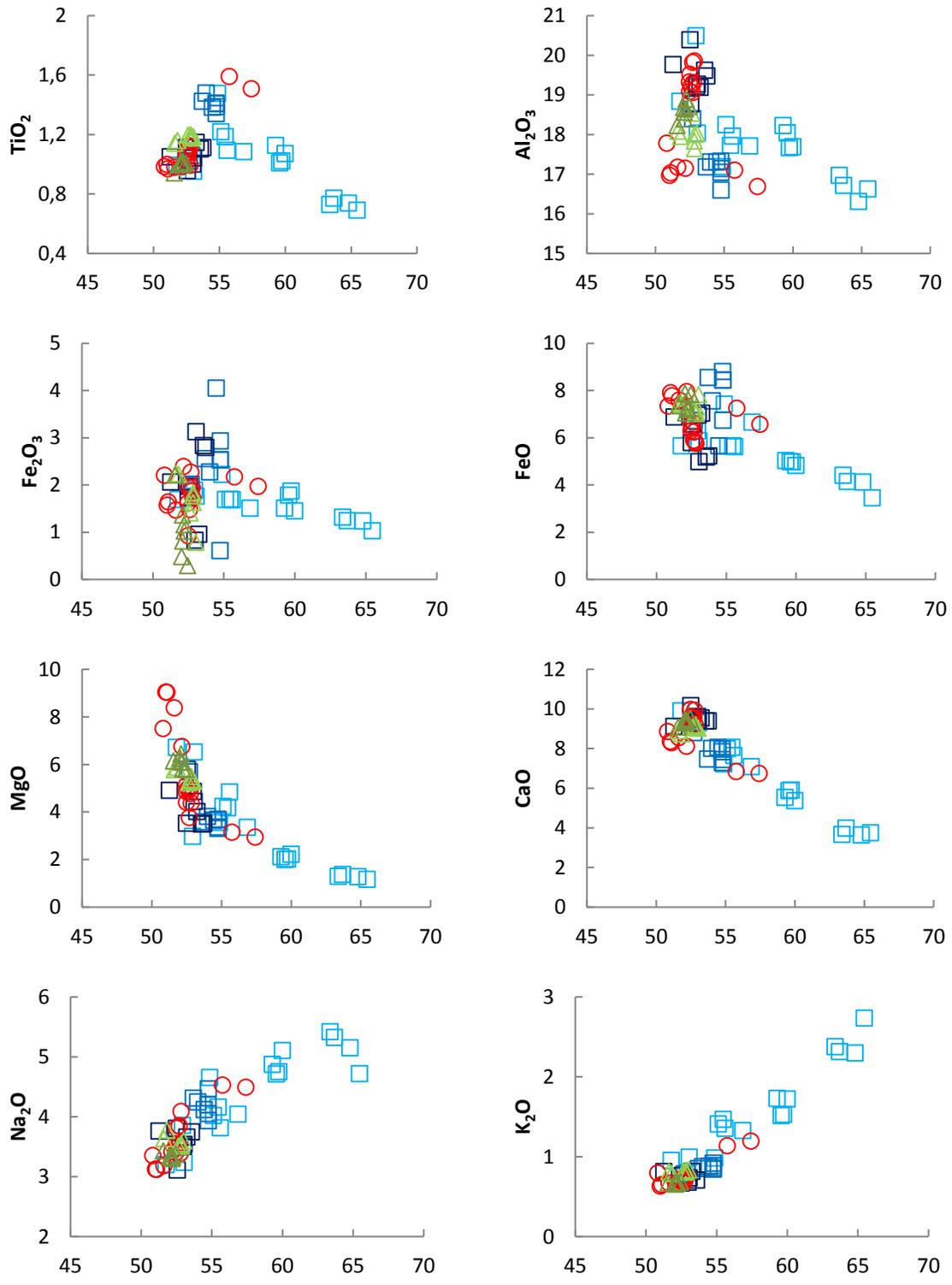
Diagramas Harker

Para la Unidad Antuco I, las variaciones en los diagramas Harker para elementos mayores (Figura 13) muestra un comportamiento asociado a la diferenciación de forma más completa gracias a la amplia variación en la composición de la Subunidad I.1, por ese motivo se pueden observar los cambios de pendiente en distintos óxidos como TiO_2 a los 54% y MgO a los 55%. Las correlaciones son negativas para el TiO_2 , FeO , MgO , CaO y Al_2O_3 ; y positivas para el Na_2O y el K_2O . Sin embargo, la Subunidad I.2 es la que se encuentra más enriquecida en titanio y hierro. Finalmente, la Subunidad I.3 es muy parecida a la Unidad Antuco II.

En la Unidad Antuco II se puede observar una tendencia decreciente en los óxidos MgO , CaO , FeO , Fe_2O_3 , y Al_2O_3 y es levemente más enriquecida que la Unidad Antuco I, mientras que la tendencia creciente observada en Na_2O y el K_2O , se acopla de forma muy similar a la unidad anterior. El TiO_2 muestra una acumulación en los valores de composiciones más máficas entre 0,9 y 1,1% en peso, dando un salto a valores entre 1,5 y 1,6% en peso para rocas más andesíticas.

Finalmente, para los C.V. La Herradura y Los Pangues se puede observar una fuerte similitud en composición entre éstas y la Unidad Antuco II, con valores bastante acotados y enmarcados cerca del promedio de la Unidad mencionada. Cabe destacar que La Herradura está levemente enriquecida en los elementos sodio, potasio, calcio y aluminio mientras que Los Pangues en magnesio, titanio e hierro.

En términos generales, Los valores de MgO no alcanzan el 10% y al Al_2O_3 se mantiene en un rango entre 16 y 20 %.



□ Antuco I.1 □ Antuco I.2 □ Antuco I.3 ○ Antuco II △ C.V.L.H. △ C.V.L.P.

Figura 13: Diagramas Harker de elementos mayores para todas las unidades del volcán Antuco

Elementos traza.

Los elementos trazas, al ser sensibles a los cambios termodinámicos que ocurren en los procesos magmáticos, ayudan mediante sus variaciones, generar hipótesis sobre algunos procesos ocurridos en la génesis y evolución de los magmas. Para esto se estudiarán cómo se comportan los distintos elementos traza con respecto a las fases minerales presentes y su preferencia por las fases sólidas o líquidas durante la generación y evolución de los magmas. Esta afinidad está representada por los coeficientes de partición de cada elemento con alguna fase, siendo la carga, el radio iónico, su electronegatividad y el sitio de incorporación del elemento, los factores preponderantes para la definir su compatibilidad (afinidad a la fase sólida) o incompatibilidad (afinidad a la fase líquida). Las siguientes tablas muestran los valores de los elementos traza de cada unidad del volcán Antuco.

Las Tablas 5, 6 y 7 muestran las concentraciones de elementos traza tanto de este trabajo como de autores previos.

Tabla 5: Elementos traza de la Unidad Antuco I

| Unidad Muestra | Unidad I.1 | | | Unidad I.2 | | | Unidad I.3 | | | | |
|-------------------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|--------|--------|
| | ANT-06 | ANT-07 | ANT-08 | ANT-03 | ANT-04 | ANT-15 | ANT-05 | ANT-13 | ANT-14 | ANT-16 | ANT-26 |
| Sc | 19 | 19 | 24 | 31 | 31 | 31 | 27 | 25 | 26 | 27 | 27 |
| V | 110 | 107 | 207 | 292 | 297 | 304 | 240 | 233 | 245 | 219 | 219 |
| Cr | < 20 | < 20 | < 20 | 30 | 30 | 30 | 70 | 40 | 50 | 90 | 110 |
| Co | 11 | 12 | 22 | 23 | 22 | 23 | 22 | 21 | 20 | 24 | 26 |
| Ni | < 20 | < 20 | < 20 | < 20 | < 20 | < 20 | 30 | 20 | 20 | 40 | 50 |
| Cu | 130 | 20 | 30 | 90 | 80 | 90 | 80 | 70 | 70 | 70 | 70 |
| Zn | 370 | 90 | 110 | 90 | 90 | 100 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| Rb | 39 | 40 | 34 | 20 | 18 | 19 | 18 | 16 | 15 | 16 | 15 |
| Sr | 456 | 446 | 408 | 480 | 484 | 470 | 559 | 546 | 534 | 531 | 527 |
| Y | 28 | 29 | 23 | 22 | 23 | 23 | 19 | 19 | 18 | 18 | 17 |
| Zr | 130 | 132 | 112 | 103 | 101 | 105 | 89 | 81 | 83 | 82 | 76 |
| Nb | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Cs | 0,8 | 2,1 | 2 | 1,1 | 0,9 | 1,1 | 1 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 0,8 |
| Ba | 391 | 391 | 322 | 260 | 257 | 266 | 249 | 212 | 214 | 220 | 205 |
| La | 16,2 | 16,7 | 12,4 | 12 | 11,8 | 11,9 | 11,4 | 9,5 | 9,4 | 9,8 | 9,1 |
| Ce | 38 | 38,3 | 27,9 | 29,2 | 29,1 | 29,1 | 27,9 | 23,4 | 23,3 | 24,1 | 22,1 |
| Pr | 4,68 | 4,85 | 3,87 | 3,87 | 3,8 | 3,8 | 3,57 | 3,05 | 3,01 | 3,11 | 2,8 |
| Nd | 20,8 | 21,7 | 16,7 | 17,9 | 18 | 17,7 | 16 | 14,3 | 13,6 | 14 | 12,7 |
| Sm | 5,2 | 5,3 | 4 | 4,6 | 4,5 | 4,5 | 4,1 | 3,7 | 3,6 | 3,6 | 3,2 |
| Eu | 1,56 | 1,54 | 1,33 | 1,41 | 1,43 | 1,4 | 1,27 | 1,2 | 1,18 | 1,13 | 0,98 |
| Gd | 5,5 | 5,4 | 4,2 | 4,6 | 4,6 | 4,7 | 4 | 3,8 | 3,6 | 3,6 | 3,2 |
| Tb | 0,9 | 0,9 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,5 |
| Dy | 5,1 | 5,2 | 4,3 | 4,6 | 4,6 | 4,4 | 3,8 | 3,6 | 3,6 | 3,4 | 3,1 |
| Ho | 1,1 | 1 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,6 |
| Er | 3,1 | 3,1 | 2,5 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,2 | 2,1 | 2,1 | 2 | 1,8 |
| Tm | 0,46 | 0,46 | 0,38 | 0,39 | 0,38 | 0,38 | 0,33 | 0,31 | 0,31 | 0,29 | 0,27 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Yb | 3 | 3 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,2 | 2,1 | 2 | 1,9 | 1,7 |
| Lu | 0,49 | 0,49 | 0,42 | 0,42 | 0,41 | 0,42 | 0,36 | 0,35 | 0,33 | 0,31 | 0,27 |
| Hf | 3,6 | 3,7 | 3,4 | 3 | 2,8 | 2,8 | 2,6 | 2,3 | 2,2 | 2,2 | 1,9 |
| Ta | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 1,5 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | < 0,1 |
| Pb | 16 | 9 | 9 | 7 | 6 | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 | < 5 |
| Th | 4 | 4,1 | 3,4 | 1,8 | 1,8 | 1,7 | 2,1 | 1,4 | 1,4 | 1,5 | 1,4 |
| U | 1,2 | 1,1 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |

Tabla 6: Elementos traza para las Unidad Antuco II

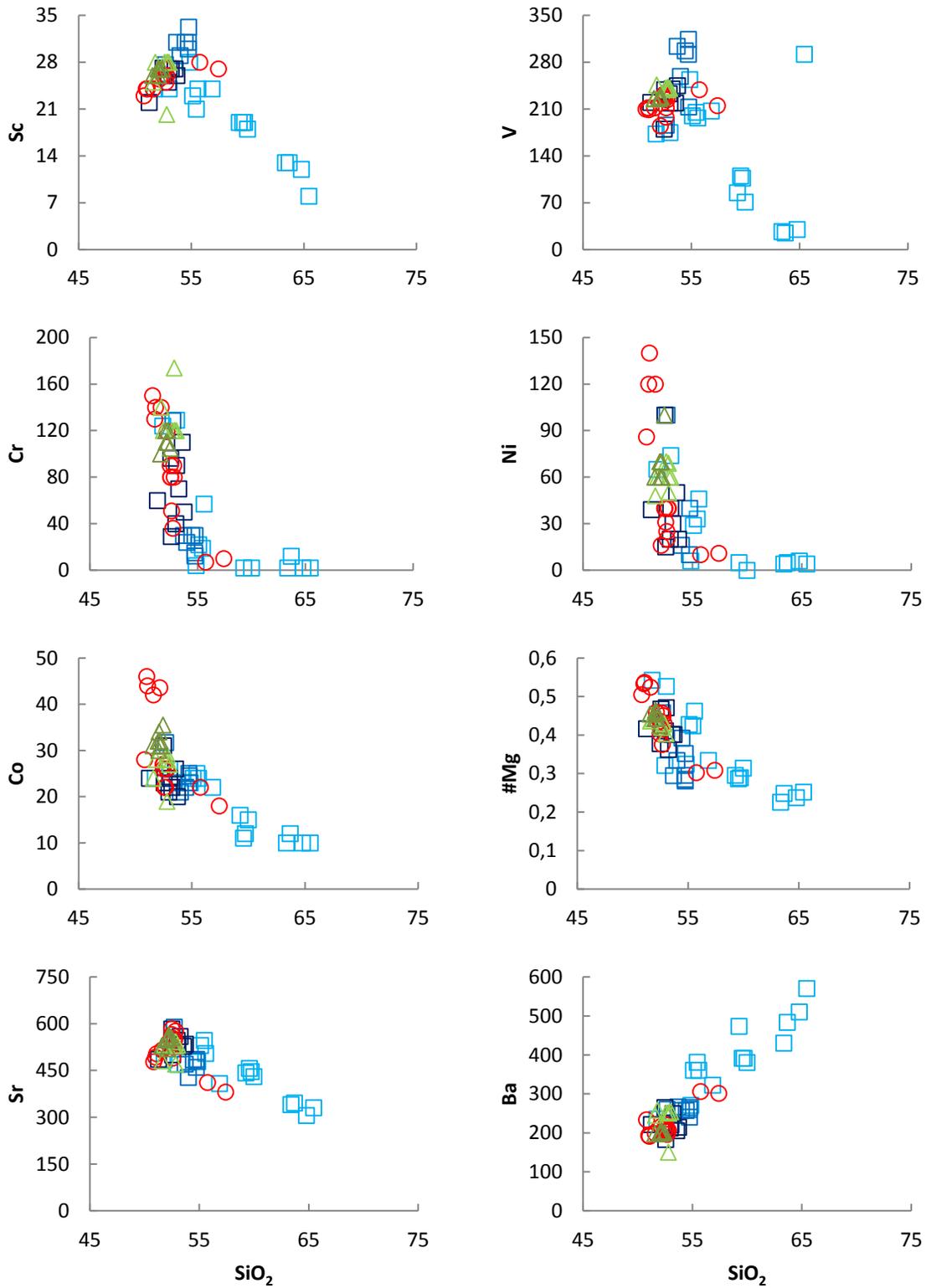
| Unidad Muestra | Unidad II | | | | | | | | |
|-------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| | ANT-02 | ANT-17 | ANT-18 | ANT-19 | ANT-20 | ANT-21 | ANT-27 | ANT-28 | |
| Sc | 26 | 26 | 24 | 24 | 26 | 25 | 26 | 24 | |
| V | 229 | 232 | 212 | 212 | 229 | 224 | 228 | 209 | |
| Cr | 80 | 80 | 130 | 140 | 90 | 90 | 80 | 140 | |
| Co | 26 | 26 | 46 | 42 | 27 | 26 | 27 | 44 | |
| Ni | 40 | 40 | 120 | 120 | 40 | 40 | 40 | 140 | |
| Cu | 80 | 70 | 70 | 70 | 80 | 70 | 70 | 70 | |
| Zn | 80 | 80 | 100 | 90 | 80 | 80 | 90 | 90 | |
| Rb | 17 | 17 | 14 | 15 | 17 | 16 | 15 | 15 | |
| Sr | 576 | 584 | 492 | 515 | 555 | 549 | 565 | 503 | |
| Y | 15 | 16 | 15 | 15 | 16 | 16 | 16 | 15 | |
| Zr | 73 | 74 | 73 | 72 | 74 | 73 | 75 | 70 | |
| Nb | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | |
| Cs | 0,9 | 0,9 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | |
| Ba | 206 | 208 | 193 | 198 | 205 | 202 | 209 | 191 | |
| La | 9,5 | 10 | 8,6 | 9,6 | 9,5 | 9,8 | 9,1 | 9,7 | |
| Ce | 22,5 | 23,7 | 20,1 | 23,2 | 23,1 | 23,3 | 22 | 23,7 | |
| Pr | 2,95 | 3,01 | 2,85 | 2,93 | 2,95 | 2,95 | 3,11 | 2,98 | |
| Nd | 13,5 | 13,7 | 12,5 | 13,7 | 13,5 | 13,3 | 13,5 | 13,7 | |
| Sm | 3,5 | 3,4 | 3,3 | 3,3 | 3,4 | 3,3 | 3,6 | 3,5 | |
| Eu | 1,09 | 1,11 | 0,96 | 1,02 | 1,04 | 1,11 | 1,08 | 1,05 | |
| Gd | 3,5 | 3,4 | 2,9 | 3,2 | 3,3 | 3,4 | 3,1 | 3,2 | |
| Tb | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | |
| Dy | 3,2 | 3,2 | 2,8 | 3,1 | 3 | 3,1 | 3 | 3,1 | |
| Ho | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | |
| Er | 1,8 | 1,9 | 1,6 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | |
| Tm | 0,27 | 0,27 | 0,24 | 0,25 | 0,26 | 0,27 | 0,26 | 0,26 | |
| Yb | 1,7 | 1,8 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 | 1,7 | 1,7 | |
| Lu | 0,27 | 0,28 | 0,25 | 0,26 | 0,27 | 0,28 | 0,26 | 0,26 | |
| Hf | 2,1 | 2 | 2 | 1,9 | 1,9 | 2,1 | 2,1 | 1,9 | |
| Ta | 0,2 | 0,1 | 1,3 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | |
| Pb | 6 | 6 | 6 | 5 | 5 | 5 | 6 | 5 | |
| Th | 1,6 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,6 | 1,4 | |
| U | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | |

Tabla 7: Elementos traza para los Centros volcánicos La herradura y Los Pangues

| Unidad Muestra | Centro Adventicio La Herradura | | | | | Centro adventicio Los Pangues | | | | | |
|-------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | ANT-09 | ANT-10 | ANT-11 | ANT-12 | ANT-25 | ANT-01 | ANT-22 | ANT-23 | ANT-24 | ANT-29 | ANT-30 |
| Sc | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 27 | 26 | 27 | 27 | 26 | 27 |
| V | 246 | 241 | 243 | 241 | 239 | 226 | 226 | 228 | 229 | 227 | 227 |
| Cr | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 110 | 100 | 120 | 110 | 110 | 120 |
| Co | 28 | 28 | 29 | 27 | 28 | 30 | 31 | 31 | 32 | 34 | 32 |
| Ni | 60 | 70 | 60 | 60 | 50 | 60 | 60 | 60 | 70 | 70 | 70 |
| Cu | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 230 | 70 | 80 | 70 | 70 | 80 |
| Zn | 80 | 90 | 80 | 80 | 90 | 90 | 90 | 80 | 80 | 100 | 100 |
| Rb | 19 | 18 | 18 | 19 | 18 | 16 | 14 | 17 | 16 | 15 | 16 |
| Sr | 533 | 530 | 528 | 531 | 542 | 551 | 527 | 563 | 554 | 520 | 548 |
| Y | 21 | 20 | 19 | 20 | 20 | 15 | 16 | 16 | 16 | 16 | 15 |
| Zr | 93 | 91 | 90 | 91 | 90 | 71 | 72 | 72 | 72 | 72 | 72 |
| Nb | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 |
| Cs | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,9 |
| Ba | 258 | 251 | 250 | 254 | 252 | 199 | 198 | 203 | 203 | 198 | 201 |
| La | 12,5 | 12,4 | 11,7 | 12 | 11,9 | 9,4 | 8,5 | 9,6 | 9,6 | 9 | 9,5 |
| Ce | 30,2 | 29,3 | 27,8 | 28,8 | 28,4 | 22,2 | 19,3 | 23,1 | 23 | 20,6 | 23,2 |
| Pr | 3,73 | 3,6 | 3,61 | 3,68 | 3,58 | 2,83 | 2,79 | 2,96 | 2,96 | 2,94 | 2,89 |
| Nd | 17,4 | 16,7 | 15,8 | 16,8 | 16 | 12,7 | 12 | 13,1 | 13,4 | 12,8 | 13,3 |
| Sm | 4,4 | 4,2 | 4 | 4,2 | 3,9 | 3,2 | 3,1 | 3,2 | 3,2 | 3,2 | 3,2 |
| Eu | 1,34 | 1,22 | 1,26 | 1,24 | 1,24 | 1,05 | 0,95 | 1,11 | 1,04 | 1,05 | 1,03 |
| Gd | 4,2 | 4,2 | 4,1 | 4,2 | 4,1 | 3,2 | 3 | 3,4 | 3,2 | 2,8 | 3,3 |
| Tb | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Dy | 4,1 | 3,8 | 3,8 | 3,9 | 3,9 | 2,9 | 2,8 | 3 | 3 | 2,9 | 3 |
| Ho | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| Er | 2,4 | 2,2 | 2,1 | 2,2 | 2,1 | 1,7 | 1,6 | 1,7 | 1,7 | 1,6 | 1,7 |
| Tm | 0,35 | 0,33 | 0,32 | 0,33 | 0,32 | 0,25 | 0,23 | 0,25 | 0,26 | 0,24 | 0,25 |
| Yb | 2,3 | 2,2 | 2,1 | 2,1 | 2,1 | 1,7 | 1,5 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 |
| Lu | 0,38 | 0,35 | 0,34 | 0,34 | 0,32 | 0,27 | 0,24 | 0,27 | 0,28 | 0,25 | 0,27 |
| Hf | 2,8 | 2,6 | 2,4 | 2,6 | 2,5 | 1,9 | 2,1 | 2 | 2 | 1,9 | 2 |
| Ta | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,1 | < 0,1 | 0,2 |
| Pb | 27 | 7 | 6 | 7 | 6 | 7 | 5 | 5 | 5 | 7 | < 5 |
| Th | 2,2 | 2,2 | 2,1 | 2,2 | 2 | 1,6 | 1,5 | 1,4 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| U | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |

Elementos compatibles e incompatibles.

Los elementos compatibles se caracterizan por tener una afinidad a la fase sólida y entrar a la estructura cristalina de los minerales que se fraccionan, generando curvas negativas en su evolución. Por otro lado, los elementos incompatibles tienen la particularidad de no poseer afinidad con los minerales que se fraccionan durante la evolución de la serie, por lo que aumentan su concentración al diferenciarse el magma. En la Figura 14 se muestra como varían algunos elementos traza de importancia.



□ Antuco I.1 ■ Antuco I.2 □ Antuco I.3 ○ Antuco II △ C.V.L.H. △ C.V.L.P.

Figura 14: Diagramas Harker para los elementos Sc, V, Co, Ni, Cr, Sr, Rb y Ba. Las unidades son %p/p. Además, se agrega el #Mg

Unidad Antuco I.

En esta unidad se observa una tendencia decreciente casi completa en la Subunidad I.1 para los elementos Sc, V, Ni, Cr, Co y Sr. Incluso para el Vanadio se puede comparar con el comportamiento de TiO_2 donde tiene un quiebre a los 54%. También se ve una correlación entre el Co y Cr con el de Magnesio (55%). Además, se observa que la Subunidad I.2 está más enriquecida en Sc y V. Los elementos incompatibles Rb y Ba no tienen mayores diferencias entre las subunidades.

Unidad Antuco II.

Esta unidad no muestra cambios aparentes en los elementos compatibles Sc y V, mientras que para Ni y Cr se observan quiebres de pendiente en los 53% de sílice y los valores más altos de todas las unidades. El Rb y Ba están un poco acotados, pero aun así se observa una tendencia creciente.

La Herradura y Los Pangués.

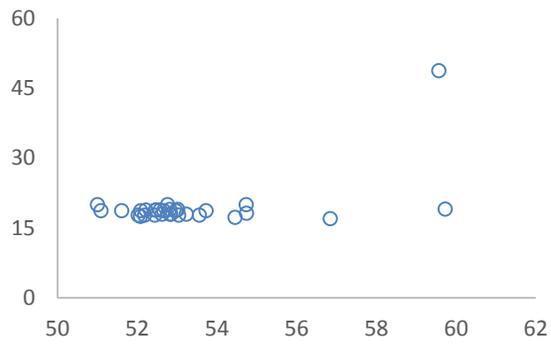
Similar al caso de los elementos mayores, éstos centros volcánicos adventicios no muestran mayores tendencias al estar muy acotados, además poseen un traslape con las demás unidades.

Los valores de Ni y Cr no superan los 140 y 170 ppm respectivamente, mientras que el Sr posee un rango de 300 a 600 ppm.

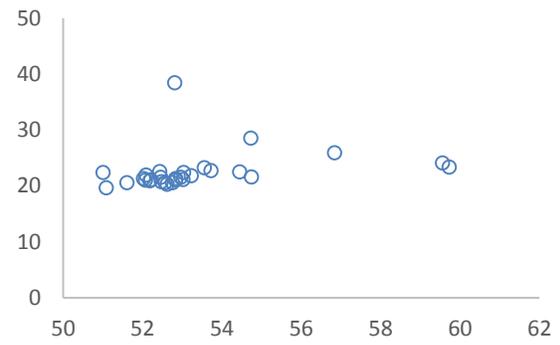
Razones de elementos incompatibles.

Se sabe que algunas razones de elementos incompatibles (Cs, Rb, Ba, K, La, Yb) pueden mostrar indicios de contaminación en la fuente de los magmas por fluidos o mediante contaminación cortical en el reservorio magmático (Hickey *et al.*, 1986; McMillan *et al.*, 1989 en Lohmar 2000). La Figura 15 muestra estas razones, evidenciando un comportamiento estable en casi todas las muestras, exceptuando las más diferenciadas de la Unidad Antuco I.1 y sólo una muestra del C.V. La Herradura que sale del comportamiento general de esa subunidad (52,8 % SiO_2).

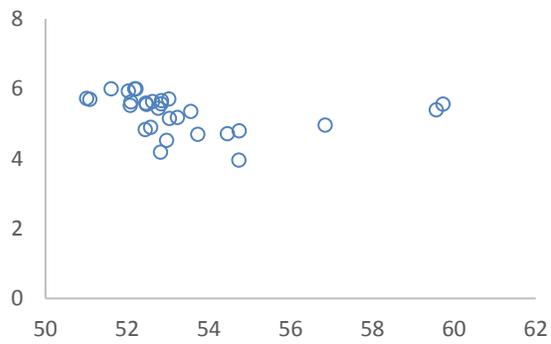
Rb/Cs



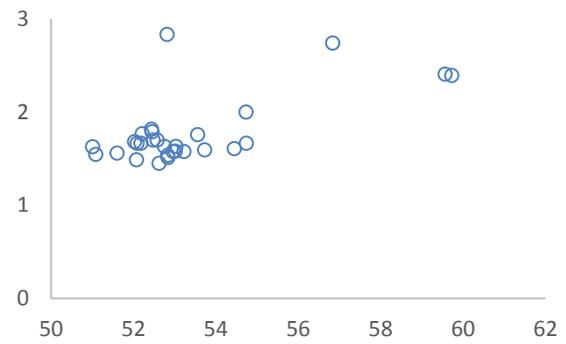
Ba/La



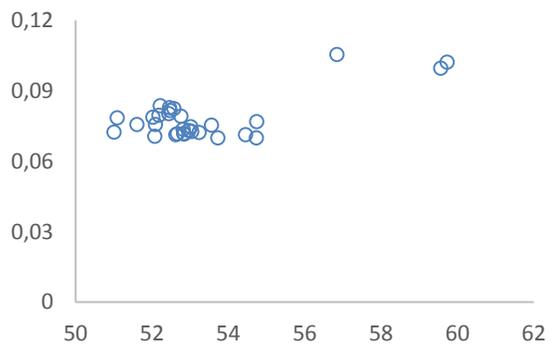
La/Yb



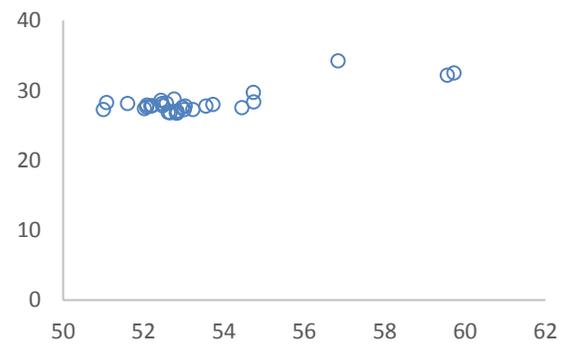
Rb/La



Rb/Ba



K/Ba



SiO₂

SiO₂

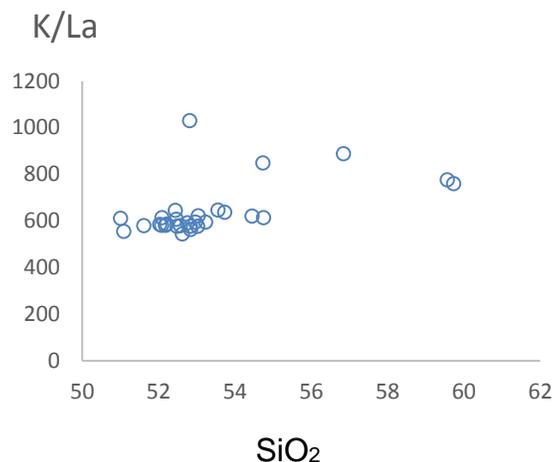


Figura 15: Razones de elementos incompatibles con respecto a sílice normalizado (Datos del presente trabajo)

Tierras raras.

En la Figura 16 se puede observar que la pendiente de tierras raras es suave. Además, a pesar de que las lavas del volcán Antuco poseen gran cantidad de plagioclasas, no se observa la anomalía de Eu. Esto puede deberse a dos razones: Las plagioclasas se formaron en un ambiente oxidante donde el Eu tiene una valencia de +3 y no reemplaza al Ca^{+2} en su estructura cristalina, o el fraccionamiento de plagioclasas fue tardío y el Eu^{+2} quedó en estas plagioclasas en la roca final.

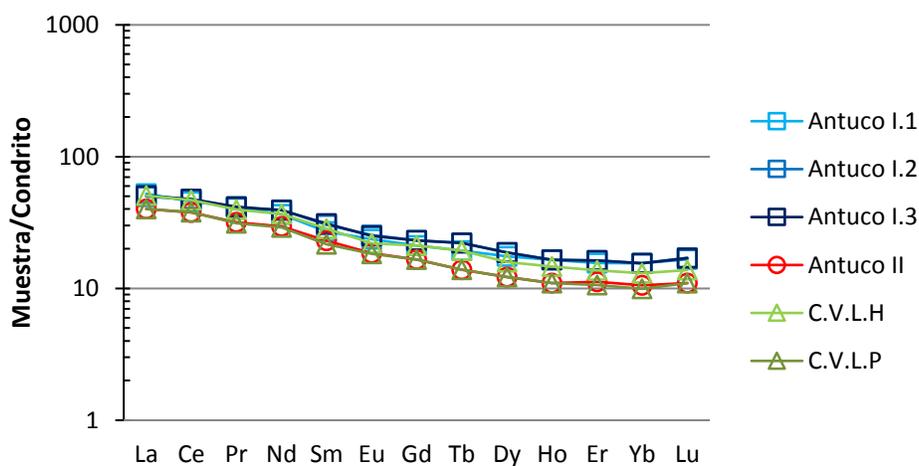


Figura 16: Diagrama de Tierras Raras para muestras representativas de las distintas Unidades del volcán Antuco. Las muestras están normalizadas a condrito (Sun & McDonough, 1995).

Salvo por el leve enriquecimiento en REE por aumento de sílice, no hay mayores diferencias entre las distintas unidades del volcán Antuco.

También se puede observar que al normalizar la razón La/Yb por La/Yb en condrito (Figura 17), la mayoría de las muestras tienen valores entre 2,5 y 4. Esto indica que la fuente de los magmas que generaron las lavas del volcán Antuco, corresponden a una peridotita sin granate, con lo que se mantiene la relación entre tierras raras livianas y pesadas.

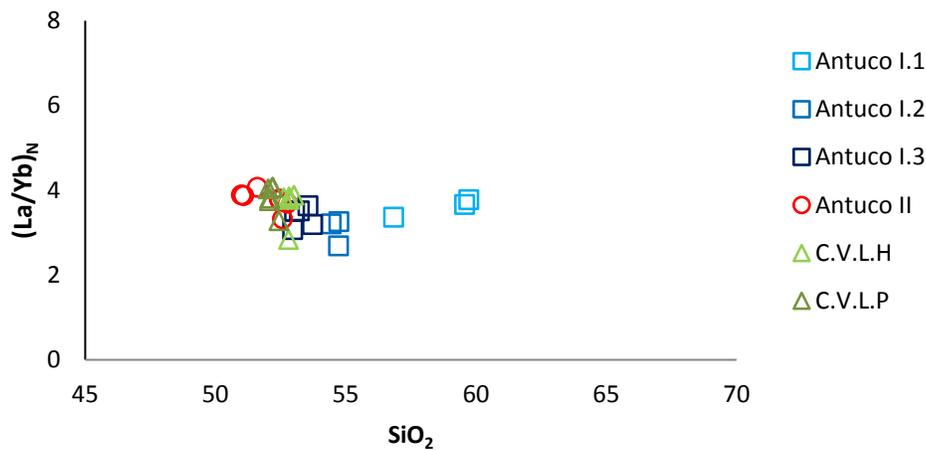


Figura 17: Diagrama SiO₂ (%wt) v/s La/Yb normalizado a condrito de todas las muestras analizadas del volcán Antuco (Sun & McDonough, 1995).

Diagramas spider multielementales.

En los diagramas multielementales se observa que el comportamiento de las distintas unidades del volcán Antuco son similares, salvo el leve enriquecimiento de todos los elementos, a la vez que aumenta la concentración en sílice de las muestras. Además, se puede observar una anomalía negativa de Nb y Ta y anomalías positivas en K, Pb, Sr y Ti (Figura 18).

Estas anomalías se pueden explicar mediante el proceso de liberación de fluidos empobrecidos en Nb y Ta por el fraccionamiento de las fases rutilo-esfeno en la zona de deshidratación de la placa que es subductada, y que finalmente, estos fluidos empobrecidos llegan a la zona de fusión en el manto astenosférico.

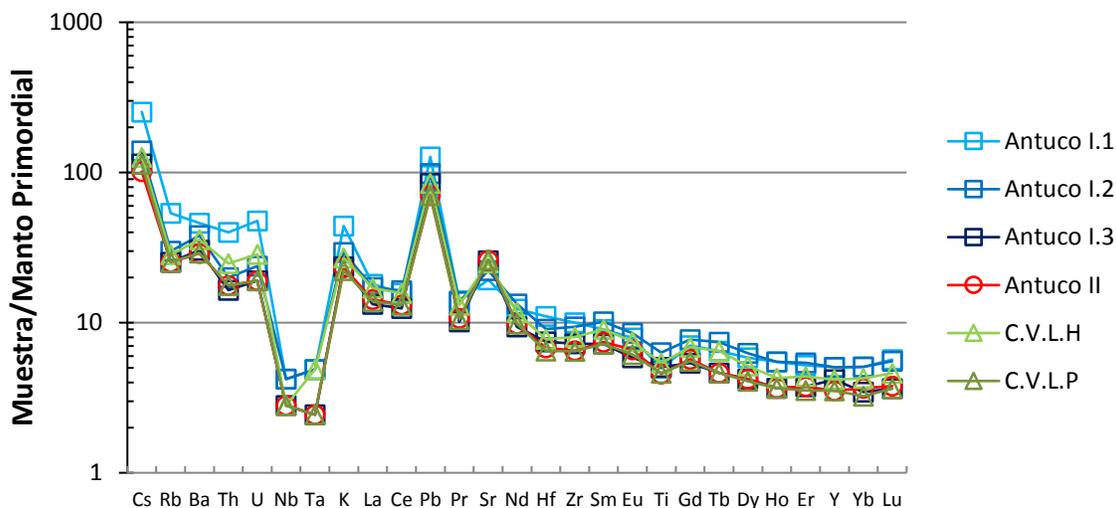


Figura 18: Diagrama spider multielemento de las lavas representativas de cada unidad del volcán Antuco. Normalización de McDonough & Sun 1995.

Discusiones Geoquímicas

Antes que todo, es importante recalcar que las variaciones geoquímicas, tanto de elementos mayores, trazas y tierras raras, muestran similitudes entre las diferentes unidades del volcán Antuco. Sin embargo, en los periodos iniciales del volcán, posterior a la Unidad Antuco I.1, de manera general ocurre una disminución en la proporción de SiO_2 , que contrasta notoriamente de la Unidad Antuco I.2, y marcando una diferencia evidente en las composiciones de las lavas en los períodos siguientes de actividad, las cuales se mantienen entre basaltos y andesitas basálticas hasta la actualidad.

Estos rangos composicionales acotados podrían estar intrínsecamente relacionados a los tiempos de actividad de cada unidad, que varía entre los 2 mil y los 6 mil años. para cada Unidad, exceptuando la U. Antuco I.1 que podría haber alcanzado un tiempo de actividad máximo de 60 mil años aproximadamente.

Sin embargo, tanto esta última Unidad como la Unidad Antuco II poseen las rocas más primitivas de grupo estudiado ($\#Mg=0,54$), por lo que los magmas que formaron estas lavas no deben haber tenido tiempo suficiente para diferenciarse.

Por otro lado, los diagramas Harker (Figura 10 y 11) muestran las tendencias de fraccionamiento de plagioclasas (CaO , Al_2O_3 , Sr), olivinos (MgO , Ni , Cr) y piroxenos (MgO , Sc), y en especial en la Subunidad Antuco I.1, el fraccionamiento

de magnetita (Fe_2O_3 , FeO , TiO_2 , V) que son corroboradas por el análisis petrográfico realizado.

Ahora, con respecto al Ni y Cr, sus concentraciones se encuentran en proporciones menores a los mostrados por magmas primitivos derivados del manto (250-300 ppm y 500-600 ppm respectivamente). Adicionalmente, los rangos de MgO también son bajos, por lo que se sugiere que para alcanzar estos valores es necesario un fraccionamiento de olivino, clinopiroxeno y espinela en el magma parental. (Hildreth & Moorbath, 1988; López-Escobar *et al.*, 1995).

Las razones de elementos incompatibles confirman lo postulado por Lohmar (2000), donde la ausencia de grandes variaciones en estas razones, implicaría una diferenciación en ausencia de contaminación cortical, e influido en gran parte a la interacción con fluidos de la placa que subducta (Rb/Cs bajos y Ba/La altos) y altos grados de fusión parcial ($\text{La/Yb} < 6$).

Además, en el mismo trabajo, datos isotópicos confirman que la interacción de la corteza en los cambios composicionales de las lavas del volcán Antuco es despreciable, dejando en evidencia que los procesos de diferenciación están relacionados a procesos de cristalización fraccionada y a la influencia de los fluidos provenientes de la deshidratación de la corteza que subducta.

En términos de la fuente, los valores de La/Yb normalizados a condrito, muestran que ésta no sería una fuente profunda, y se asociaría a una peridotita libre de granate (López escobar 1981, Lohmar 2000), esto se estaría relacionado a que el espesor estimado de la corteza en entre los 36°S y los 41°S es alrededor de los 30-35 km (Hildreth & Moorbath, 1988).

4. Análisis Mineral.

Para relacionar los datos geoquímicos y petrográficos, se realizó un análisis mineralógico de algunas muestras. Para esto, se utilizó el microscopio electrónico de barrido SEM (*Scanning Electron Microscope*), FEI Quanta 250, en el Laboratorio de Microscopía Electrónica y Microanálisis, del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Se prepararon los cortes transparentes y se procedió a hacerles un metalizado de grafito.

Se observaron las distintas unidades del volcán Antuco. Para cada una se realizaron muestreos de fenocristales y microlitos para ver evoluciones o distinciones composicionales. Las muestras corresponden a ANT-06, ANT-08 y ANT-26 (Unidad Antuco I), ANT-27 y ANT-28 (Unidad Antuco II), ANT-25 (C.V. La Herradura).

Plagioclasas

Dado que las plagioclasas son los minerales más abundantes en las rocas volcánicas máficas e intermedias, se definieron distintas morfologías distinguibles en relación a las formas cristalinas, texturas presentes y zonaciones. En términos de composición, en la Figura 19 se pueden reconocer tres variaciones marcadas por las composiciones de las plagioclasas

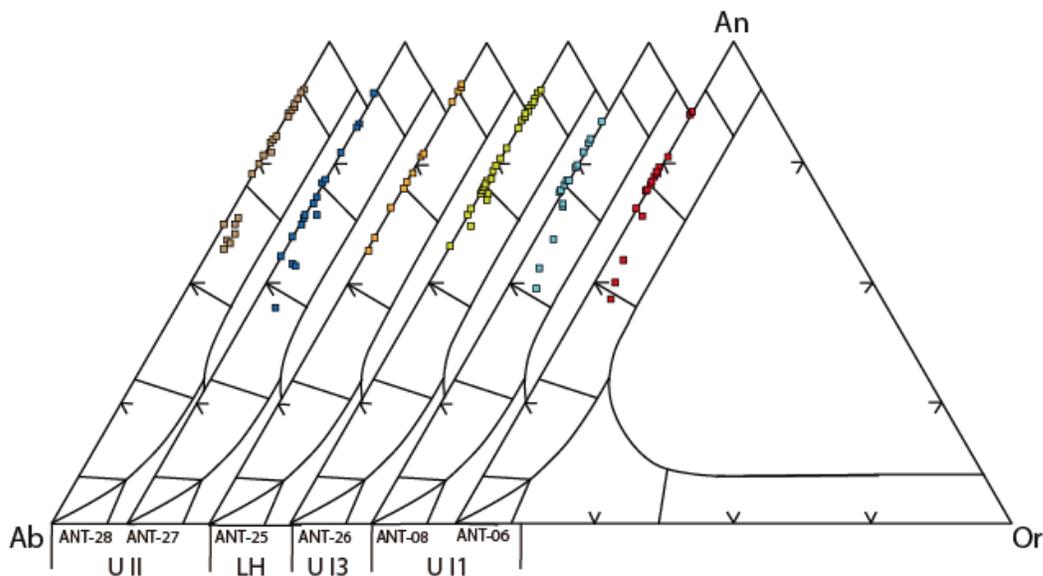


Figura 19: Diagrama ternario de clasificación de plagioclasas para las distintas unidades del volcán Antuco.

Fenocristales: Corresponden a cristales de plagioclasas que poseen un tamaño mayor a 0,5 mm, y se encuentran en tres formas diferentes.

Tipo 1a: Fenocristales de plagioclasas subhedrales de composiciones entre An_{90-60} , presentan una zonación normal, donde en la mayoría de los casos la composición de los bordes es similar a la de los microfenocristales y microlitos. Sólo en la subunidad Antuco I.1 se presentan zonaciones inversas (An_{63-71}) y oscilatorias (núcleo An_{71-69} , Intermedio An_{79-76} , borde zonación normal An_{68-54}) (Figura 20a).

Tipo 1b: Fenocristales de plagioclasas subhedrales de composiciones entre An_{90-60} , y presentan zonación normal. Suelen tener texturas de desequilibrio de tipo parche o *sieve* en algún halo interno de la zonación o completamente en el interior (Figura 20b). Sus bordes no muestran texturas de desequilibrio, y en la mayoría de los casos, poseen una composición similar los micro fenocristales y microlitos.

Tipo 2: Fenocristales de plagioclasas de composición An_{90-85} , poseen bordes reabsorbidos y texturas de desequilibrio de tipo parche o *sieve* en todo el mineral. No presentan zonación.

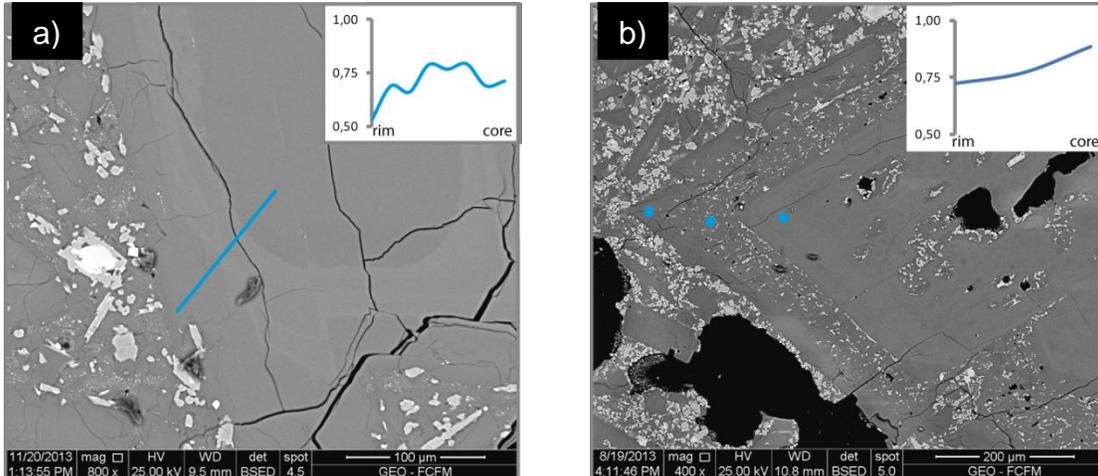


Figura 20: a) Fenocristal de plagioclasas tipo 1a con zonación cíclica y ausencia de textura *sieve*. Unidad Antuco I b) Fenocristal de plagioclasas tipo 1b con zonación normal y textura *sieve*. Unidad Antuco II.

Microfenocristales: Estos cristales de plagioclasas poseen un tamaño entre 0,1 y 0,5 mm, se caracterizan por no poseer texturas de desequilibrio, aunque rara vez se pueden encontrar bordes reabsorbidos. Presentan una zonación normal An₇₈₋₆₄.

Microlitos: Plagioclasas que componen la matriz con tamaños menores a 0,1 mm, intercrecidas con piroxenos y olivinos. No poseen zonación ni texturas de desequilibrio y su composición puede variar entre An₇₀₋₄₅ traslapándose con la composición de los microfenocristales y fenocristales tipo 1a y 1b (Figura 21).

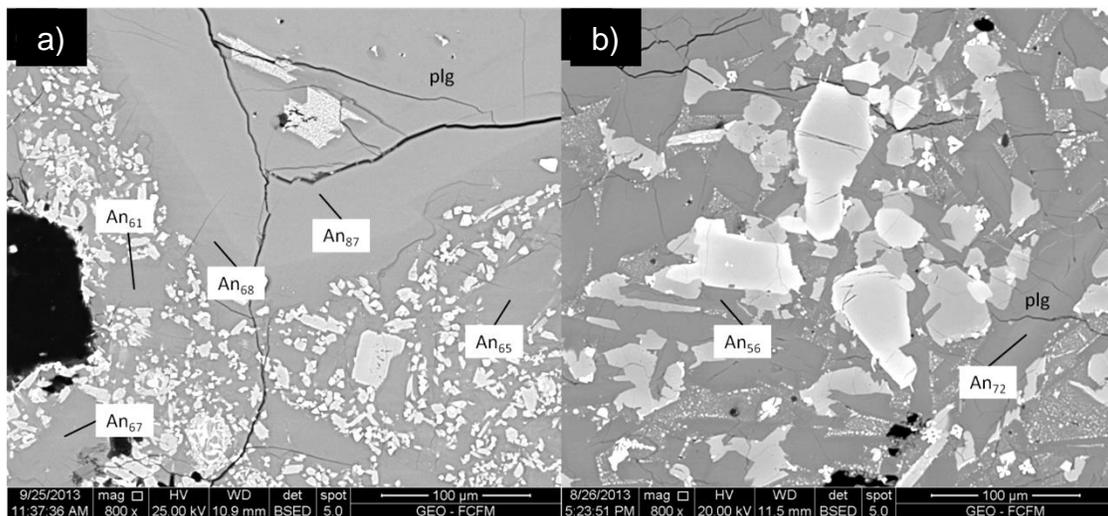


Figura 21: a) Comparación entre un fenocristal de plagioclasas con zonación normal respecto a los microlitos de plagioclasas en la matriz. se puede observar que la composición similar al borde del fenocristal. b) Microlito de plagioclasas de composición An₅₆ y Microfenocristal de plagioclasas de composición An₇₂

Unidad Antuco I.

En esta unidad se observan todos los tipos de plagioclasas definidas, aunque, se pueden distinguir algunas diferencias entre las subunidades. Por ejemplo, en la Subunidad I.1 se presentan tanto los fenocristales tipo 1a como 1b, encontrándose algunas con zonación cíclica e inversa. No es común observar fenocristales de plagioclasas tipo 2. Sin embargo, a pesar de que la Subunidad I.3 es muy similar a la primera, no posee fenocristales tipo 1a y sus composiciones son más anortíticas.

Unidad Antuco II.

En esta unidad es donde los fenocristales de plagioclasas se encuentran mejor definidos encontrándose, en especial los fenocristales tipo 2. Además, todas las plagioclasas poseen una composición más anortítica, similar a la subunidad Antuco I.3. El C.V La Herradura posee características similares a esta unidad.

Piroxenos

Los piroxenos se encuentran en cuatro fases principales en las lavas del Antuco. En algunas muestras se presentan como fenocristales euhedrales y subhedrales individuales o asociados a *cluster* minerales junto a titanomagnetitas y plagioclasas. Además, se pueden observar como bordes de reacción en olivinos y otros piroxenos, y también como inclusiones en minerales de mayor tamaño. Finalmente, y mucho más común, se presentan como parte de la matriz de cada roca formando una textura intergranular junto a plagioclasas y unos pocos olivinos (Figura 22).

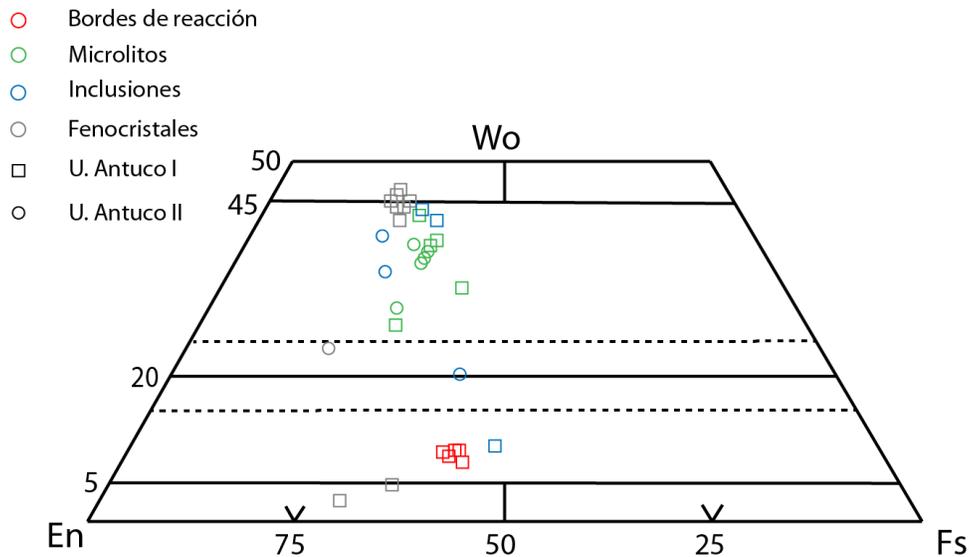


Figura 22: Diagrama de clasificación de piroxenos Wo-En-Fs. Se pueden identificar los distintos grupos de piroxenos en las distintas unidades.

Unidad Antuco I.

En esta unidad se pueden observar la mayoría de los tipos de piroxenos, principalmente en la Subunidad I.1. La composición de los fenocristales presentes en esta unidad son de tipo diópsido-augita y clinoenstatita, generalmente rodeados por minerales de titanomagnetita o como glomérulos junto a las plagioclasas y olivinos. Además, alrededor de estos fenocristales se pueden encontrar bordes de reacción de piroxenos de composición pigeonita (Figura 22 y 23a). La matriz, por otro lado, está compuesta principalmente por microlitos de augita.

Unidad Antuco II.

En esta unidad raramente aparecen fenocristales de augita, los cuales se ven como inclusiones o en texturas glomeroporfíricas junto a olivinos y plagioclasas, lo común es encontrarlos como microlitos en la matriz, donde se ven aparentemente zonados, pero su composición de tipo augita sigue siendo similar a la unidad Antuco I (Figura 23b).

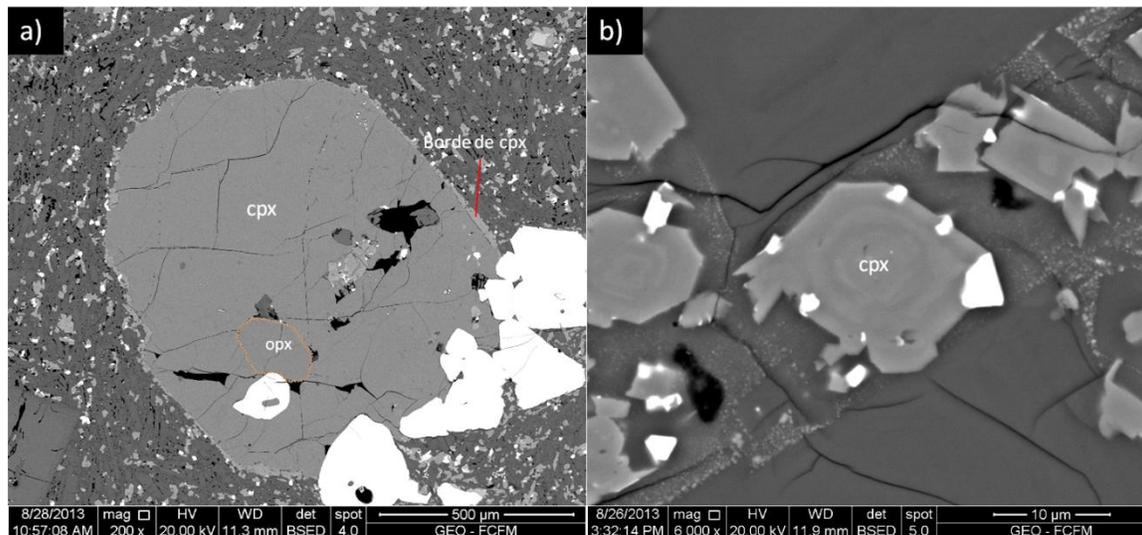


Figura 23: Imágenes SEM de las cuatro formas en que aparecen los piroxenos. a) Unidad Antuco I, fotomicrografía de fenocristal de clinopiroxeno (diópsido) con una inclusión de cristal de ortopiroxeno (clinoenstatita) y borde de reacción de clinopiroxeno (pigeonita). Unidad Antuco II, se observan fenocristales de titanomagnetita. b) Fotomicrografía de microlito zonado de clinopiroxeno.

Olivinos

Los olivinos que se observan en las lavas del Antuco, varían composicionalmente entre los rangos F_{079-54} . Éstos se han separado en fenocristales y microlitos en términos de su tamaño principalmente (Figura 24). Los microlitos tienen un tamaño menor a 0,1 mm, mientras que los fenocristales poseen tamaños mayores a 0,1 mm. Además, existen algunos cristales de olivino como inclusiones en fenocristales de plagioclasas tipo 1a y 1b, en especial en composiciones anortíticas.

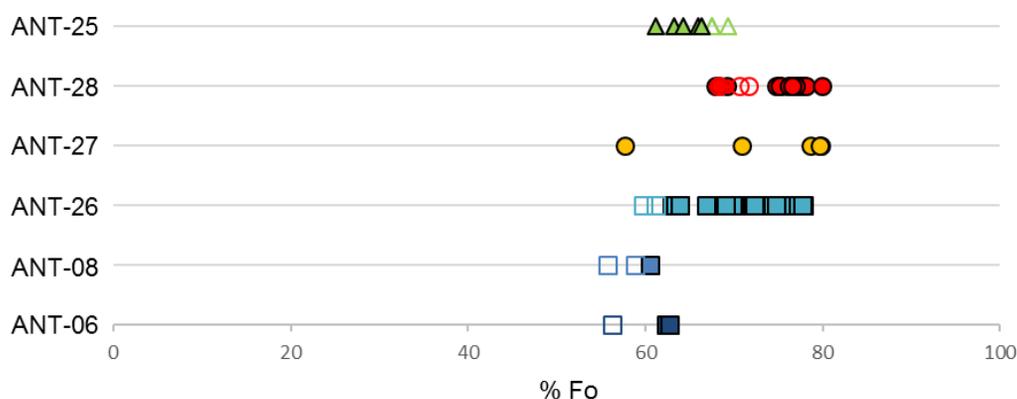


Figura 24: Distribución de olivinos en las muestras estudiadas. Los símbolos sin relleno corresponden a microlitos, mientras que los que poseen relleno corresponden a fenocristales o inclusiones en fenocristales.

El grupo más amplio son los fenocristales de olivino con composiciones F_{079-60} , dependiendo a la unidad en que pertenecen, no poseen zonación y generalmente presentan bordes reabsorbidos (Figura 25a). El grupo menor y observable solo en algunas muestras son los microlitos de olivino de composición F_{070-54} , sin zonación, y en comparación a los microlitos de clinopiroxenos proporcionalmente son mucho más grandes. Éstos microlitos pueden tener bordes reabsorbidos y bordes de reacción de pigeonita y/o titanomagnetita (Figura 25b).

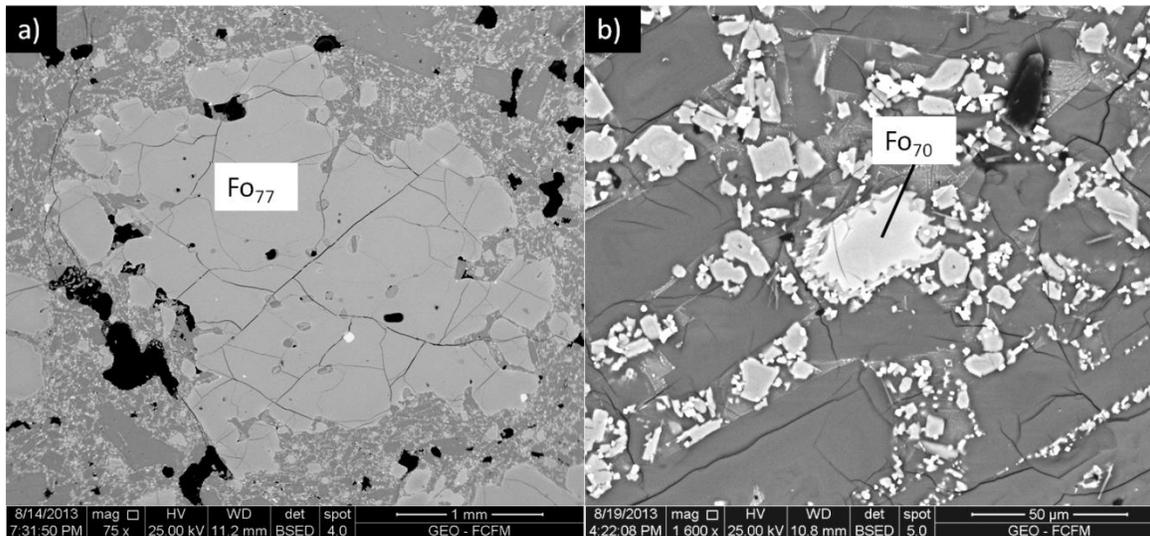


Figura 25: Imágenes SEM de los dos tipos de olivino a) Fotomicrografía de fenocristal de olivino reabsorbido de composición Fo_{77} , se observan inclusiones de opacos. Unidad Antuco II. b) Fotomicrografía de microlitos de olivino con borde de clinopiroxeno, se puede observar la diferencia de tamaño con los microlitos de augita. Unidad Antuco II.

Titanomagnetita y Cromitas.

En la Figura 26 se muestran las clasificaciones de espinelas que se observan en las lavas del volcán Antuco. El primer grupo, en azul, son inclusiones de cromitas de aluminio que se encuentran principalmente en los fenocristales de olivinos, aunque también se presentan en las plagioclasas más cálcicas y algunos fenocristales de las muestras más primitivas, mientras que el segundo grupo, en color rojo, corresponden a titanomagnetitas que se encuentran en la matriz de todas las muestras y como fenocristales asociados a minerales ferromagnesianos como olivinos, clinopiroxenos y ortopiroxenos a las muestras más diferenciadas (ANT-06 y ANT-08).

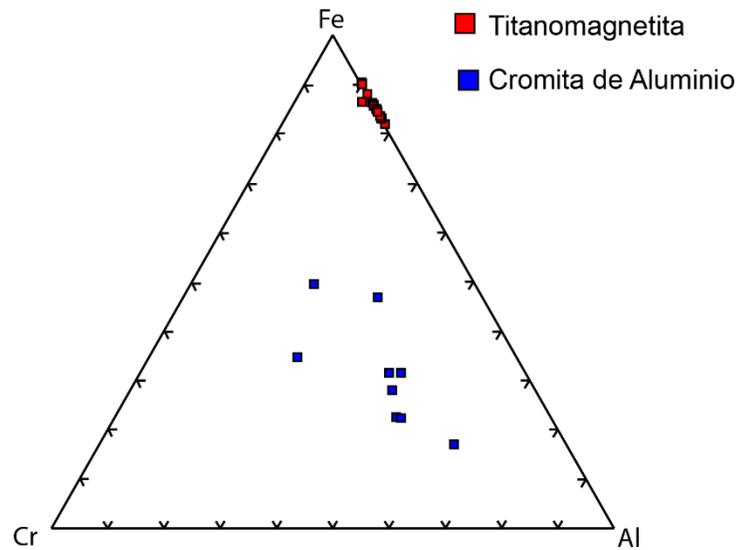


Figura 26: Diagramas de clasificación de espinelas Fe-Cr-Al.

En la Unidad Antuco I es posible encontrar una mayor cantidad de fenocristales de titanomagnetita, en especial en la Subunidad I.1. Mientras que los olivinos y plagioclasas de la Unidad Antuco II poseen una mayor cantidad de inclusiones de cromitas de aluminio (Figura 27).

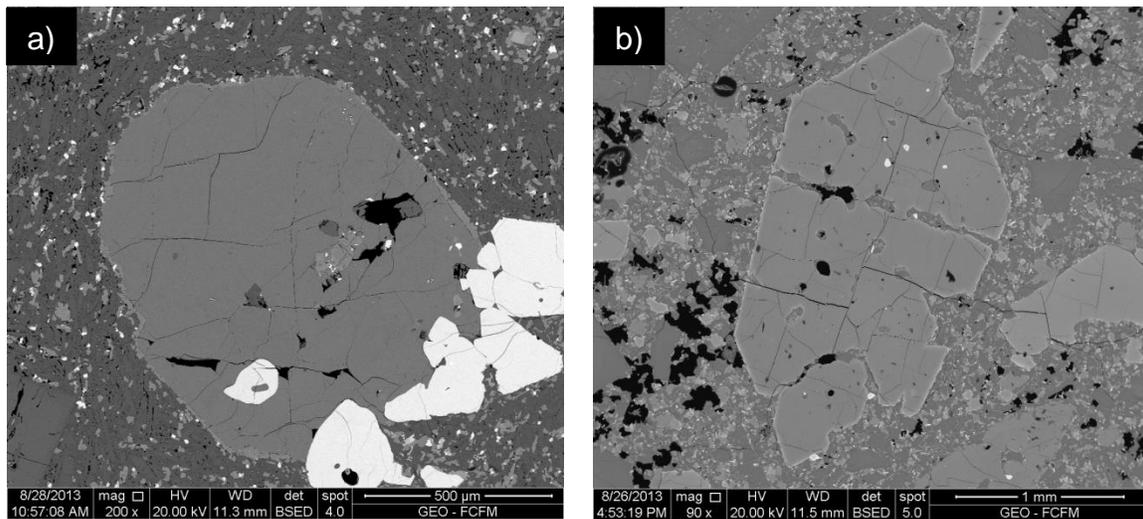


Figura 27: a) Fenocristales de Titanomagnetita asociados a piroxenos (U.A.I.1). b) Inclusiones de Cromitas de Aluminio en Olivino (Fo_{77}) de la Unidad Antuco II.

Tabla 8: Resumen composicional de cristales de plagioclasas, piroxenos y olivinos.

| Plagioclasas | | Piroxenos | | Olivinos | |
|-----------------------|---------------------|--------------------|---|---------------|---------------------|
| Fenocristales tipo 1a | An ₉₀₋₆₀ | Fenocristales | Wo ₄₅₋₃₉ En ₄₂₋₃₅ Fs ₂₀₋₁₄ | Fenocristales | Fo ₇₉₋₆₀ |
| Fenocristales tipo 1b | An ₉₀₋₆₀ | Microlitos | Wo ₄₂₋₃₀ En ₄₈₋₃₃ Fs ₃₀₋₁₈ | Microlitos | Fo ₇₀₋₅₄ |
| Fenocristales tipo 2 | An ₉₀₋₈₅ | Bordes de reacción | Wo ₁₀₋₀₅ En ₆₁₋₅₀ Fs ₄₀₋₃₃ | | |
| Microfenocristles | An ₇₈₋₆₄ | Inclusiones | Wo ₁₁₋₀₃ En ₆₈₋₄₆ Fs ₄₄₋₂₉ | | |
| Microlitos | An ₇₀₋₄₅ | | | | |

5. Geotermometría.

Los geotermómetros son utilizados para determinar las condiciones de temperatura de distintas fases que interactúan en equilibrio a partir de una reacción mineral. En el presente estudio se utilizaron distintos geotermómetros que se encuentran en la literatura, pero dada las condiciones de equilibrio, solo fueron satisfactorios dos de ellos: Geotermómetro de olivino-líquido (Putirka, 2008) y olivino-augita (Loucks, 1996).

El método de trabajo se basa principalmente en utilizar minerales en equilibrio tanto con la composición de la matriz de las lavas como con la composición de roca total. Los minerales utilizados son principalmente microlitos y fenocristales que no presenten texturas de desequilibrio, lo que permitirá estimar las condiciones pre-eruptivas y sin-eruptivas de las lavas del volcán Antuco.

Un punto importante es que estas lavas, al ser muy cristalinas, no se encuentran composiciones de líquido en la matriz (vidrio), por lo que se realiza un cálculo aproximado de ésta, definiendo distintas áreas de la matriz para el cálculo de la composición del líquido.

Geotermómetro Olivino-líquido.

El geotermómetro de olivino-líquido (Putirka, 2008) se basa en el equilibrio entre la proporción Fe-Mg en el olivino y en el líquido. Para esto se define el coeficiente de partición

$$K_D(Fe - Mg)^{ol-liq} = \frac{X_{Fe}^{ol} X_{Mg}^{liq}}{X_{Mg}^{ol} X_{Fe}^{liq}}$$

Donde la condición de equilibrio está dada para $K_D=0,30\pm 0,03$. Según Putirka (2008) la ecuación 22 es la que mejor representa la temperatura en un fundido donde está presente H_2O hasta un 18% peso aproximadamente. El error aproximado de esta ecuación es de $\pm 23^\circ C$ en sistemas hidratados.

Dado que solamente los olivinos que se encuentran en la matriz cumplen con los criterios de equilibrio, este geotermómetro se utilizará en la estimación de las de temperaturas de formación de los microlitos (condiciones sin-eruptivas).

Geotermómetro Olivino Augita

Este geotermómetro definido por Loucks (1996) depende del coeficiente de distribución entre Mg- Fe^{2+} entre olivino y augita, dado por:

$$K_{D_{Fe/Mg}}^{ol/Aug} = \frac{(Fe/Mg)_{ol}}{(Fe^{2+}/Mg)_{aug}}$$

A partir de esto, se define el geotermómetro de olivino-augita, con un error de $\pm 6,1^\circ C$ como sigue:

$$\ln(K_{D_{Fe/Mg}}^{ol/Aug}) - 78,025 = \frac{-5945,96}{T} - 10,1327 \ln(T)$$

El cual se resuelve mediante un método iterativo simple. Las temperaturas encontradas corresponden a la relación de olivinos y clinopiroxenos en textura glomeroporfírica, por lo que no necesariamente estarán en equilibrio con la matriz.

Los resultados se visualizan en la Figura 28 y en la Tabla 9 En ella se puede observar que las distintas unidades estudiadas presentan rangos de temperaturas característicos para los microlitos y clústeres minerales.

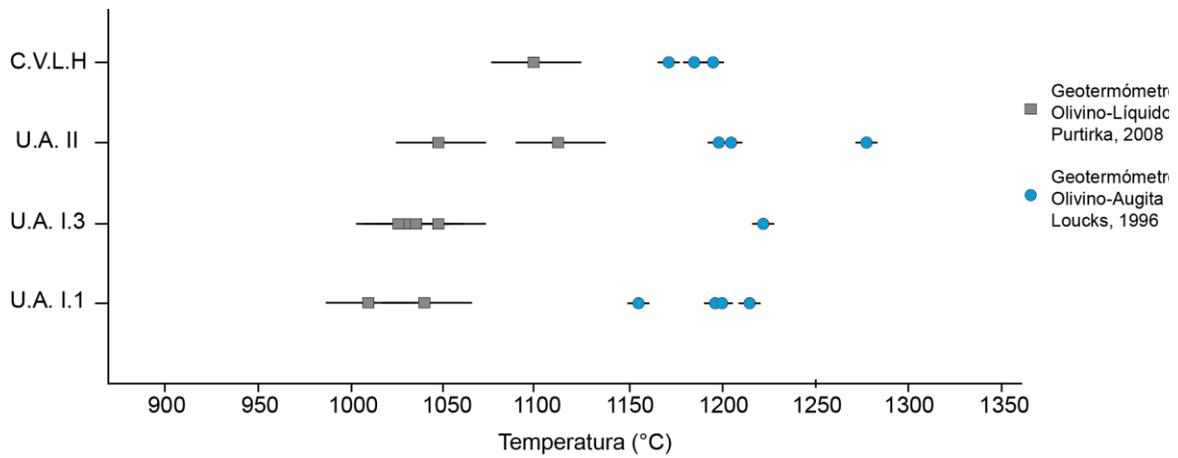


Figura 28: Resultados de rangos de temperatura de los geotermómetros descritos (Loucks, 1996; Putirka, 2008).

Tabla 9: Temperaturas obtenidas de cluster mineral (olivino-augita) y microlitos de olivino.

| Unidad | Microlitos (Putirka, 2008) | Cluster (Ol-Aug; Loucks, 1996) |
|-------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Antuco I.1 | 1010-1030 | 1155-1215 |
| Antuco I.3 | 1026-1045 | 1222 |
| Antuco II | 1046-1112 | 1198-1205 1278 |
| C.V. La Herradura | 1099 | 1171-1195 |

6. Discusión.

Texturas de disequilibrio y procesos magmáticos

Muchas de las características mineralógicas y texturales de las lavas del volcán Antuco muestran indicios de cambios abruptos en la composición del fundido. La presencia de bordes de reacción, zonaciones inversas, zonaciones oscilatorias y texturas de disolución indican que hubo cambios en las condiciones de presión, temperatura o directamente en la composición del sistema.

En primer lugar, la presencia de fenocristales de plagioclasas tipo 2 es lo que más resalta en las lavas primitivas del Antuco. Las texturas de disequilibrio que posee (bordes con embahiamientos y textura *sieve*) y su composición anortítica, indicaría un proceso de formación previo.

Según Seaman (2000) la textura *sieve* puede ocurrir por tres procesos: a) por un *input* de magma más caliente y más anortítico, b) un ascenso del magma a menores presiones o c) una inyección de H₂O que estabiliza plagioclasas más cálcicas. Además, según Nelson & Montana (1992), para observar texturas de disequilibrio (*sieve*), la despresurización (punto b) debe ser con diferencias entre 2 a 3 kbar. Este proceso es casi adiabático, por lo que no sería raro encontrar zonaciones normales en las plagioclasas y textura *sieve* en una composición en específico.

Dado los 3 tipos de fenocristales de plagioclasas, es posible que los tipos 1a y 1b estén asociados a un calentamiento, generado por *inputs* de magmas más máficos, lo que podría generar las distintas zonaciones, en especial, la zonación inversa, además de la textura *sieve*, en algún halo del mineral. Mientras que las plagioclasas de tipo 2 estarían asociadas a una despresurización por ascenso magmático desde un reservorio más profundo.

También se deben tomar en cuenta, los fenocristales de olivinos y clinopiroxenos, los cuales poseen bordes embahados, pues podrían estar asociados al mismo proceso. Por otro lado, los fenocristales, microfenocristales y microlitos, que no poseen texturas de disequilibrio, pudieron haberse formado en reservorios más someros.

Condiciones en el reservorio y modelo de cristalización.

Dado los pares minerales olivino-augita con los que se obtuvieron las temperaturas de formación de los fenocristales (Tabla 8), se utilizó la relación textural entre estos y las plagioclasas que formaban cúmulos minerales. Éstas plagioclasas poseen composiciones entre An₇₁₋₆₃, algunas veces mostrando zonación inversa. Utilizando un test de equilibrio de Fe/Mg entre los piroxenos y un fundido que se encuentra en equilibrio con los olivinos, se identifica aquel fundido que a la vez se encuentra en equilibrio con las plagioclasas (Grove *et al.*, 1997).

En la Unidad Antuco I.1 se observa dos temperaturas asociadas a estos cúmulos cristalinos, una de 1155°C y un rango que varía entre los 1196 y 1210°C aproximadamente. Esto se interpreta como un calentamiento del sistema en las condiciones de formación los cúmulos. Utilizando la zonación inversa en plagioclasas, se propone que el cambio composicional entre el núcleo de éstas y su borde está asociada al calentamiento descrito y usando la metodología presentada por Lohmar *et al.*, 2012 y Morgado *et al.*, 2015, se desarrollan los higrómetros de Lange *et al.*, 2009 y Moore *et al.*, 1997; para estimar las condiciones de presión y proporción de agua en el sistema, que ocurrieron durante este calentamiento.

El higrómetro presentado por Moore *et al.*, 1997 define la relación entre fracción molar de agua a partir de la composición del fundido, para el cálculo de la solubilidad del agua en el fundido, mediante la siguiente fórmula:

$$2 \ln X_{H_2O}^{melt} = \frac{a}{T} + \sum_i b_i X_i \left(\frac{P}{T} \right) + c \ln f_{H_2O}^{melt} + d$$

donde $X_{H_2O}^{melt}$ = fracción molar de H₂O disuelto en el fundido, $f_{H_2O}^{melt}$ = fugacidad de H₂O en el fluido, calculado para este trabajo a partir de la ecuación de estado de Redlich-Kwong Modificada (Holland & Powell, 1991), T = temperatura (Kelvin), P = presión (bar), X_i = fracción molar de los componentes del fundido, y a, b, c y d son coeficientes de la regresión.

Por otro lado, Lange *et al.*, 2009, presenta un higrómetro basado en el equilibrio plagioclasas-fundido:

$$X_{H_2O}^{melt} = m'x + a' + \frac{b'}{T} + \sum_i X_i d'_i$$

donde x es una variable de estado que depende de la entropía, entalpía, volumen molar, presión y temperatura; X_i es la fracción molar de cada componente del fundido y m' , a' , b' , c' y d' son coeficientes de la regresión.

Como se puede apreciar en la Figura 29. los resultados del modelamiento muestran que a partir de un calentamiento de 55°C se obtiene una descompresión de aproximadamente 400 bar y una exolución de 0,6 wt% H_2O . Pero, tomando los errores asociados a cada higrómetro, la presión podría llegar a un máximo de 1,5 kbar y un mínimo de 200 bar aproximadamente y una exolución máxima de 1,2 wt% H_2O . Esto indicaría que éste proceso debe haber ocurrido en un reservorio somero de profundidades entre los 0 y 5 km.

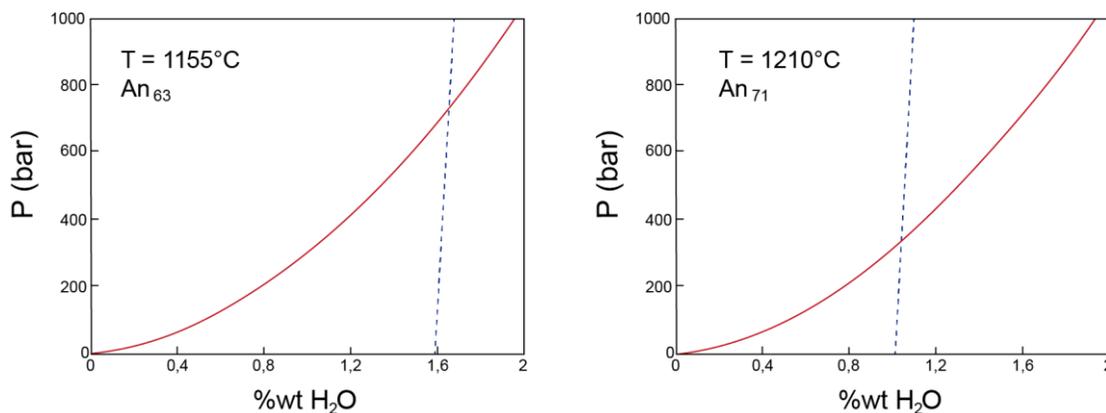


Figura 29: Resultados de la resolución simultánea de los higrómetros de Lange et al., 2009 (en azul) y Moore et al., 1997 (en rojo) Los datos obtenidos corresponden a $P=732$ bar y $\%wt\text{H}_2\text{O}=1,66\%$ para la temperatura de 1155°C y $P=339$ bar y $\%wt\text{H}_2\text{O}=1,05\%$ para la temperatura de 1210°C .

Dada la información obtenida y utilizando como roca característica la muestra ANT-26, se realizó un modelo que muestra el calentamiento y posterior cristalización en el programa *rhyolite-MELTS* (Gualda et al., 2012; Ghiorso & Gualda, 2015) a partir de la química de roca total de esta muestra. Dentro del modelamiento, no se pudo replicar las composiciones plagioclasas entre An_{72-90} y los cristales de olivino de composición Fo_{60-77} , corroborando indirectamente, que estos minerales se formaron en un proceso previo a este reservorio somero y que es posible que la composición también sea diferente. Aun así, el modelo genera características muy similares a la muestra elegida.

Los datos utilizados en la etapa de calentamiento corresponden a una temperatura inicial de 1150°C y final de 1220°C, a una presión de 1,5 kbar (presión máxima obtenida con los higrómetros), obteniendo solamente la cristalización de plagioclasas (10% vol) de composición An₆₀₋₇₁, bastante similar a la composición obtenida mediante química mineral en la zonación inversa de plagioclasas tipo 1a (An₆₃₋₇₁). Durante la cristalización se utilizaron las temperaturas de 1220°C a 1040°C y una descompresión entre 1500 bar hasta 200 bar, la cual mostro la aparición de nuevos cristales de plagioclasas (55,58% vol), clinopiroxenos (22,21% vol), olivinos (0,26% vol) y titanomagnetita (1,83% vol), quedando sólo un 9,9% en volumen de líquido residual. Las composiciones de los minerales son similares a los encontrados en la matriz, como lo muestra la Tabla 10.

Tabla 10: Resultados del modelamiento en MELTS.

| | Plagioclasas | Piroxenos | Olivinos |
|----------------|---------------------|---|---------------------|
| Calentamiento | An ₇₁₋₆₀ | | |
| Cristalización | An ₇₀₋₄₆ | Wo ₁₁₋₀₉ En ₇₀₋₅₀ Fs ₃₄₋₂₁ | Fo ₅₄₋₅₂ |
| | | Wo ₄₁₋₃₈ En ₄₅₋₄₁ Fs ₁₉₋₁₆ | |

Colapso lateral del edificio volcánico

El colapso lateral del edificio volcánico, generó un cono truncado con un anfiteatro de 4 km de diámetro hacia el oeste, en forma de una gran herradura. Este colapso fue el resultado de una violenta erupción freatomagmática causada probablemente por la interacción del magma con aguas de niveles relativamente superficiales. Posterior a esto se generó un cono casi perfecto de 1000m de altura aproximados y algunos centros volcánicos menores (Thiele *et al.*, 1998). La edad estimada para el colapso que fue obtenida por Lohmar 2000, es de 6250±60 años.

Según Völker *et al.*, 2011, el volumen del actual edificio volcánico del Antuco se encuentra entre 66 y los 103 km³. Estimaciones simples permiten un cálculo volumétrico similar, dado los 12 km de diámetro del volcán (Thiele *et al.*, 1998, Lohmar 2000) y una altura de 2980 m.s.n.m, con base a los 1017 m.s.n.m (Völker *et al.*, 2011), se obtiene un volumen de 74 km³, mientras que el pequeño cono

generado sobre el anfiteatro que posee 1000 m de altura, y un radio aproximado de 2 km se obtiene un volumen de 4,2 km³.

Por otro lado, se estima que el antiguo cono del volcán Antuco alcanzaba los 3200 m.s.n.m aproximadamente por lo que su volumen se estimaría en 82 km³. La diferencia entre el volumen del edificio actual y el pequeño cono nos daría el volumen del edificio truncado, esto es 8,1 km³. Esto indicaría que la fracción del edificio que colapsó fue de 10% del volumen total aproximadamente, y que actualmente el pequeño cono generado por la Unidad Antuco II sólo corresponde al 5% del volumen total como mínimo.

Este colapso, habría generado una diferencia de presión suficiente, que permitiría el ascenso de magmas más primitivos, calientes y densos, los que habrían generado las lavas de la Unidad Antuco II.

Procesos en el reservorio magmático.

Es posible separar la evolución del reservorio en, por lo menos, 3 momentos importantes. Según Lohmar (2000) existen 2 zonas donde ocurre el fraccionamiento de minerales. La primera y más profunda se encuentra cerca de los 8 kbar (21-27 km), fraccionándose olivinos y piroxenos, mientras que la segunda entre los 2 y 5 kbar (7 a 18 km), donde ocurre el fraccionamiento de plagioclasas.

Con los nuevos datos, es posible encontrar un nuevo reservorio magmático, mucho más somero, donde ocurren los procesos de diferenciación finales, ubicándose a una profundidad no mayor a 5 km (1,5 kbar).

El primer fraccionamiento (21-27 km), de olivinos y piroxenos, condiciona el empobrecimiento de MgO, Cr y Ni observados en estas lavas, generando los magmas basálticos primarios de este volcán, alcanzando #Mg de 0,54, posiblemente asociado a la zona de MASH (Hildreth & Moor bath, 1988).

En la segunda zona, ocurre el fraccionamiento de plagioclasas, principalmente las de composición más anortítica y en especial los fenocristales tipo 2, que por un ascenso rápido hacia el reservorio somero generado por una descompresión de 2 a 3 kbar, habría generado la textura *sieve* característica de estos fenocristales.

Finalmente, en el reservorio más somero (0 a 5 km), comenzaría un proceso de acumulación de magmas basálticos, fraccionando nuevos cristales de olivinos,

plagioclasas y piroxenos, con la posterior erupción del material acumulado (Figura 30)

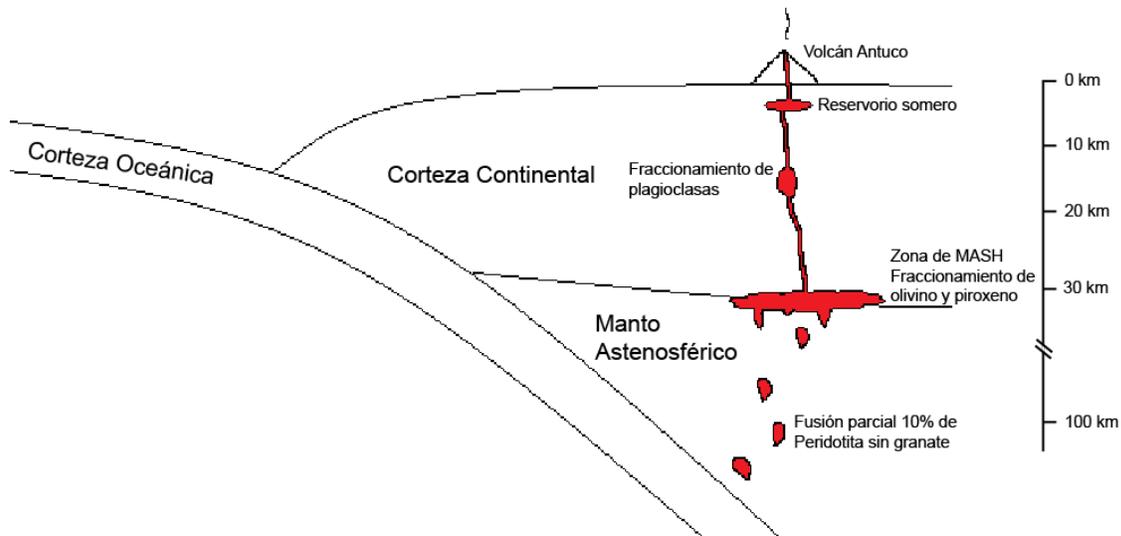


Figura 30: Esquema de la configuración probable del sistema magmático del volcán Antuco. Imagen modificada de Lohmar 2000.

Este reservorio somero se comportaría como un compartimento donde los magmas se almacenan, mezclan y fraccionan antes de ser expulsados del reservorio, similar a lo mostrado por Gutiérrez y Parada (2010), donde las diferencias de temperaturas en las paredes y nuevos *inputs* magmáticos, promueven la diferenciación magmática y texturas de disequilibrios observadas, dependiendo de la forma del reservorio (*stock* o *sill*) y el tiempo de residencia de los magmas en el reservorio.

Evolución del volcán Antuco.

Según estudios previos, el volcán Antuco comenzó a formarse hace 130.000 años, en la cual la unidad Antuco I.1 tuvo un período de actividad que varía en un rango entre los 130.000 a los 60 mil años (Thiele *et al.*, 1998). Durante ese tiempo ésta unidad muestra una variación composicional extensa, desde composiciones primitivas hasta diques dacíticos (Lohmar 2000).

Dado algunos modelos de ascenso y acumulación magmáticas (Pinel & Jaupart 2000, 2003, 2004, 2005, Gutiérrez y Parada, 2010; Gudmundsson 2012, Pinel & Albino 2013), se propone que el proceso de ascenso inicial del magma se

habría generado por el avance de diques verticales desde un reservorio más profundo. Dependiendo las características reológicas y mecánicas del fundido y la roca circundante, el magma puede llegar a la superficie y provocar una erupción.

En una fase inicial esta acumulación promueve la formación de reservorios en los niveles más someros de formas cilíndricas verticales, tipo *stock*, que pueden evolucionar a reservorios similares a *sills*. En ese sentido, para que estos *sills* formen un reservorio deben cumplir dos condiciones: la primera es que sean comparativamente gruesos, por lo menos decenas de metros (dependiendo de la velocidad de acumulación) y segundo recibir magma frecuentemente a través de los diques, para que se mantenga líquido la mayor parte del tiempo y se dé la opción de desarrollarse como un reservorio. Mecánicamente, no hay motivos particulares para que los diques se detengan y formen *sills*, o se propaguen lateralmente a niveles de flotabilidad neutra. (Gudmundsson 2012, referencias incluidas).

A partir de las simulaciones entregadas por Gutiérrez y Parada (2010), es posible inferir que los reservorios tipo *stock* podrían generarían magmas más eruptables y exhibirían un mayor espectro composicional que los reservorios de tipo *sill*.

Dado los tiempos de actividad de cada unidad, es coherente inferir que, en los estados iniciales de formación del reservorio somero, tendría una forma tipo *stock*, lo que permitiría un mayor volumen eruptado y mayor rango composicional, como lo observado en la unidad Antuco I.1.

Se estima que los fundidos iniciales serían más ricos en sílice, y que la diferenciación disminuiría con el paso del tiempo. Aunque para confirmar esto, se debe tener una estratigrafía completa, en especial de la unidad Antuco I.1, y así poder ver las variaciones composicionales con más detalle. Ahora, es posible que los diques dacíticos descritos por Lohmar (2000) podrían ser el resultado de un ascenso de líquidos residuales del reservorio que en ese momento tendría composiciones más andesíticas.

Entre los 60 mil y los 15 mil no se registran evidencias de actividad volcánica. Sin embargo, es posible que la Unidad Antuco I.2 ,se generara por un ascenso rápido de fundidos menos diferenciados y pobre en cristales, que podría estar asociado al retroceso de los hielos en la última gran glaciación (~15 ka).

Cerca de los 6250±60 años (Lohmar 2000), se genera un colapso del edificio volcánico generado por una erupción freatomagmática violenta. La pérdida del 10%

del edificio volcánico habría generado una disminución de presión que permitió el ascenso de magmas más primitivos que restauren el equilibrio del edificio, formando el cono central de la Unidad Antuco II. Debido a que los magmas básicos son mucho más densos que las unidades anteriores, el esfuerzo generado por el nuevo cono provoca el cierre del conducto principal, promoviendo la extensión horizontal de tipo *sill*. Estos magmas al buscar salir a la superficie formarían nuevos conductos eruptivos, asociados a los centros volcánicos adventicios, que poseen similar composición y proporción de minerales que la unidad Antuco II (Figura 31)

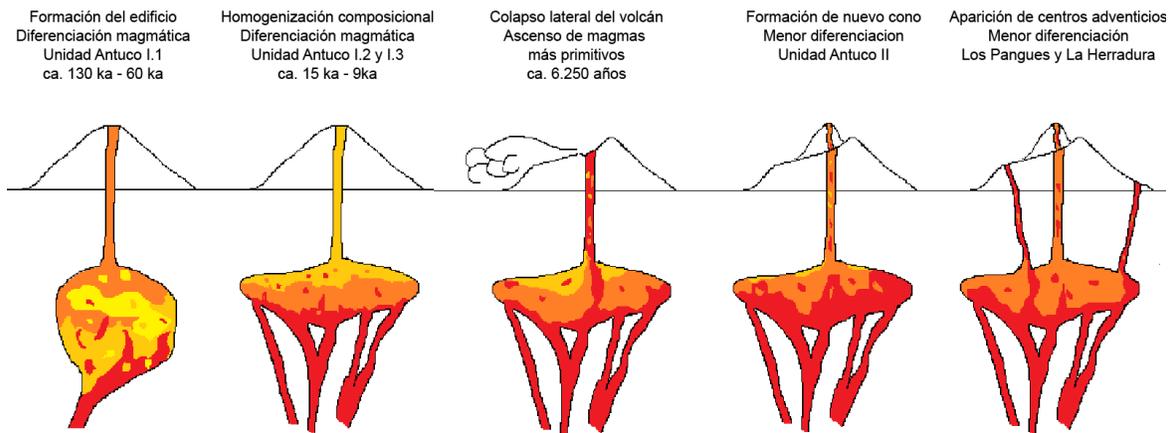


Figura 31: Modelo evolutivo del reservorio somero del volcán Antuco.

Dado que los tiempos de actividad de estas unidades son menores a 10 ka, es posible que no exista el tiempo suficiente en el proceso de diferenciación, y por esa razón se encuentren acotadas composicionalmente, aunque si puede existir una segregación interna del reservorio con respecto a la proporción de los distintos minerales.

7. Conclusiones

1. Petrográficamente, las muestras del volcán Antuco son similares entre sí con respecto a la composición mineral. Sólo la Unidad Antuco I.2 presenta proporciones muy bajas de fenocristales. Sin embargo, la Unidad Antuco II y los C.V. adventicios son bastante similares, lo que coincide con que sus tiempos de actividad.
2. Los magmas primitivos de lavas del Antuco provienen del proceso de fusión parcial de una peridotita libre de granate, posterior fraccionamiento de olivinos, piroxenos y plagioclasas con nula influencia de contaminación cortical.
3. Las variaciones composicionales a nivel mineral y texturas de desequilibrio que denotan procesos de diferenciación magmática en un reservorio somero que se encontraría a menos de 5 km, estos procesos estarían asociados a *inputs* de magmas más densos y calientes, despresurización, fraccionamiento mineral y procesos convectivos internos del reservorio que segregarían los minerales, mezclándolos y generando las distintas texturas encontradas.
4. Eventos externos al reservorio y edificio volcánico, pudieron desencadenar la reactivación de la actividad del volcán Antuco, en por lo menos 2 ocasiones, una cerca de los 15.000 años y la otra, debido al colapso lateral del edificio volcánico a los 6.250 años. Esto habría generado, en el primer caso, un ascenso de fundido pobre en cristales, mientras que, en el segundo caso, la erupción de magmas más primitivos y profundos.
5. El volcán Antuco, dentro de su evolución, muestra que en sus primeros tiempos de actividad, mostraba una mayor diferenciación en su reservorio más somero, ya que el tiempo de residencia de los magmas en el reservorio era mayor, mientras que desde los 15ka, los tiempos de actividad son más cortos mostrando una menor diferenciación en los productos volcánicos.

6. Se sugiere utilizar métodos de química mineral más exactos (EMPA) para generar modelos de mayor precisión. También, obtener a partir de la estratigrafía, en especial de la Unidad Antuco I.1, edades que permitan ordenar los eventos eruptivos del volcán Antuco y poder observar mejor las variaciones geoquímicas del reservorio, dentro de cada unidad.

7. El entendimiento de la evolución de un volcán, permite establecer las bases de los procesos asociados a los ciclos eruptivos, identificando eventos gatillantes que permitan la formación o destrucción de edificios volcánicos o variaciones en su composición que cambien los estilos eruptivos. Además, la información de la temperatura y profundidad de los reservorios, permite establecer probables zonas geotermales ligadas a estos puntos de alta temperatura.

8. Bibliografía

Angermann, D., Klotz, J., & Reigber, C. (1999). Space-geodetic estimation of the Nazca-South America Euler vector. *Earth and Planetary Science Letters*, 171(3), 329-334.

Brüggen, J. 1942. El volcán Antuco y la geología glacial del valle del Laja. Imprenta Universitaria. 35 p. Santiago de Chile.

Cembrano, J., Lara, L. (2009). The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: A review. *Tectonophysics*, 471(1), 96-113.

Déruelle, B. & López-Escobar, L. 1999. Nevados de Chillán and Antuco volcanoes (Southern Andes) revisited: a remarkable example of magmatic differentiation through closed-system crystal fractionation. Fourth International Symposium on Andean Geodynamics. P. 206-209. Göttingen, Alemania.

Drake, R. E. 1976. Chronology of Cenozoic igneous and tectonic events in the central Chilean Andes, latitudes 35°30'S to 36°S. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Volumen 1. P. 265-284.

Enrione, A. & Villarroel, P. 1962. Geología del Área de la Central Hidroeléctrica El Toro. Memoria de Título (inédito). Departamento de Geología. Universidad de Chile. Santiago de Chile.

Ghiorso M.S., Gualda, G.A.R., (2015) An H₂O-CO₂ mixed fluid saturation model compatible with rhyolite-MELTS. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 2015, in press.

González, O. Vergara, M. 1962. Reconocimiento geológico de la cordillera de los andes entre los paralelos 35° y 38° L.S. Escuela de Geología, U. de Chile. Memoria de Título. Escala 1:250.000

Gualda G.A.R., Ghiorso M.S., Lemons R.V., Carley T.L. (2012) Rhyolite-MELTS: A modified calibration of MELTS optimized for silica-rich, fluid-bearing magmatic systems. *Journal of Petrology*, 53, 875-890.

Gudmundsson, A. (2012). Magma chambers: Formation, local stresses, excess pressures, and compartments. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 237, 19-41.

Gutiérrez, F., & Parada, M. A. (2010). Numerical modeling of time-dependent fluid dynamics and differentiation of a shallow basaltic magma chamber. *Journal of Petrology*, 51(3), 731-762.

Grove, T.L., Donnelly-Nolan, J.M., Housh, T., 1997. Magmatic processes that generated the rhyolite of Glass Mountain, Medicine Lake Volcano, N. California. *Contrib. Mineral. Petrol.* 127, 205–223.

Hildreth W., Moorbath S. (1988) Crustal contribution to arc magmatism in the Andes of central Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98, 455-489.

Holland, T., & Powell, R. (1991). A Compensated-Redlich-Kwong (CORK) equation for volumes and fugacities of CO₂ and H₂O in the range 1 bar to 50 kbar and 100–1600 C. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 109(2), 265-273.

Irvine, T. N. J., & Baragar, W. R. A. F. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian journal of earth sciences*, 8(5), 523-548.

Lange, R. A., Frey, H. M., & Hector, J. (2009). A thermodynamic model for the plagioclase-liquid hygrometer/thermometer. *American Mineralogist*, 94(4), 494-506.

Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B. (1986) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3): 745-750.

Lohmar S. 2000. Estratigrafía y geoquímica del volcán Antuco y sus depósitos (Andes del Sur, 37° ,25'S). Universidad de Concepción. Memoria de Título.

Lohmar, S., Parada, M., Gutiérrez, F., Robin, C., & Gerbe, M. C. (2012). Mineralogical and numerical approaches to establish the pre-eruptive conditions of the mafic Licán Ignimbrite, Villarrica Volcano (Chilean Southern Andes). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 235, 55-69.

López-Escobar, L.; Frey, F. & Vergara, M. 1977. Andesites and High-Alumina Basalts from the Central-South Chile High Andes: Geochemical Evidence Bearing

on Their Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. Volumen 63. P. 199-228.

Lopez-Escobar, L. Vergara, M. Frey, F. 1981. Petrology and geochemistry of lavas from Antuco volcano, a basaltic volcano of the Southern Andes (37° 25'S) Original Research Article *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 11, Issues 2–4, Pages 329-331,335-35

López-Escobar, L., Cembrano, J., & Moreno, H. (1995). Geochemistry and tectonics of the Chilean Southern Andes basaltic Quaternary volcanism (37-46 S). *Andean Geology*, 22(2), 219-234.

López-Escobar, L. & Vergara, M. 1997. Eocene-Miocene Longitudinal Depression and Quaternary volcanism in the Southern Andes, Chile (33-42,5°S): a geochemical comparison. *Revista Geológica de Chile. Volumen 24, Nº 2. P. 227-244. Santiago de Chile.*

Loucks, R. R. (1996). A precise olivine-augite Mg-Fe-exchange geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 125(2-3), 140-150.

McDonough, W. F., & Sun, S. S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical geology*, 120(3), 223-253.

Moore, G., Vennemann, T., Carmichael, I.S.E., 1998. An empirical model for the solubility of H₂O in magmas to 3 kilobars. *Am. Mineral.* 83, 36–42.

Morgado, E., Parada, M. A., Contreras, C., Castruccio, A., Gutiérrez, F., & McGee, L. E. (2015). Contrasting records from mantle to surface of Holocene lavas of two nearby arc volcanic complexes: Caburgua-Huelemolle Small Eruptive Centers and Villarrica Volcano, Southern Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 306, 1-16.

Moreno, H. Lahsen, A. Varela, J. Vergara, M. 1984. Estudio Geológico del grupo volcánico Antuco-Sierra velluda. Departamento de Geología y Geofísica. U. de Chile, para ENDESA, Contrato OICB-03.

Moreno, H. Thiele, R. Lahsen, A. Varela, J. López, L. Vergara, M. 1985. Geocronología de rocas volcánicas cuaternarias en los andes del sur entre las latitudes 37° y 38° S, Chile. *Asociación geológica argentina, Revista XL (3-4): 297-299.*

Moreno, H. Lahsen, A. Varela, J. Vergara, M. 1986. Edades K-Ar de rocas volcánicas cuaternarias del Grupo Volcánico Antuco-Sierra Velluda, Andes del Sur, 37°27' S. Comunicaciones N° 36.

Muñoz, J. & Stern, C. 1988. The Quaternary volcanic belt of the southern continental margin of South America: Transverse structural and petrochemical variations across the segment between 38°S and 39°S. *Journal of South American Earth Sciences*. Volumen 1, N° 2. P. 147-161.

Nelson, S., Montana, A. (1992). Sieve-textured plagioclase in volcanic rocks produced by rapid decompression. *American Mineralogist*, 77, 1242-1249.

Neymeyer, H. Muñoz, J. 1983. Hoja Laguna de la Laja, región del Bio Bio. Carta Geológica de Chile, escala 1:250.000. 57, SERNAGEOMIN.

Norabuena, E., Leffler-Griffin, L., Mao, A., Dixon, T., Stein, S., Sacks, S. & Ocola, L., Ellis, M. (1998). Space geodetic observations of Nazca-South America convergence across the central Andes. *Science*, 279(5349), 358-362.

Peccerillo R., Taylor S. R. (1976) Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contribution of Mineralogy and Petrology*, 58, 63-81.

Pinel, V., & Albino, F. (2013). Consequences of volcano sector collapse on magmatic storage zones: Insights from numerical modeling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 252, 29-37.

Pinel, V., & Jaupart, C. (2000). The effect of edifice load on magma ascent beneath a volcano. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 358(1770), 1515-1532.

Pinel, V., & Jaupart, C. (2003). Magma chamber behavior beneath a volcanic edifice. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B2).

Pinel, V., & Jaupart, C. (2004). Magma storage and horizontal dyke injection beneath a volcanic edifice. *Earth and Planetary Science Letters*, 221(1), 245-262.

Pinel, V., & Jaupart, C. (2004). Likelihood of basaltic eruptions as a function of volatile content and volcanic edifice size. *Journal of volcanology and geothermal research*, 137(1), 201-217.

Pinel, V., & Jaupart, C. (2005). Some consequences of volcanic edifice destruction for eruption conditions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 145(1), 68-80.

Putirka K. 2008. Thermometers and Barometers for Volcanic Systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Mineralogical Society of America, 69, 61-120.

Roduit, N. JMicroVision: Image analysis toolbox for measuring and quantifying components of high-definition images. Version 1.2.2. <http://www.jmicrovision.com> (accessed 2 July 2006).

Seaman, S. J. (2000). Crystal clusters, feldspar glomerocrysts, and magma envelopes in the Atascosa Lookout lava flow, southern Arizona, USA: recorders of magmatic events. *Journal of Petrology*, 41(5), 693-716.

Stern, Ch. 2004. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Andean Geology*, vol. 31, núm. 2, diciembre, 2004, pp. 161-206

Stern, C.R, Moreno, H., López-Escobar, L., Clavero, J.E., Lara, L.E., Naranjo, J.A., Parada, M.A., Skewes, M. A. 2007. Chilean volcanoes. En: Moreno, T. & Gibbons, W. (eds) *The Geology of Chile*. The Geological Society, London, 21–114.

Sun S.S., McDonough W.F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle compositions and processes. In: Saunders A.D., Norry M.J. (Eds.), *Magmatism in oceanic basins*. Geological Society of London. Special Publication, 42, 313-345.

Thiele, R.; Moreno, H.; Elgueta, S.; Lahsen, A.; Rebolledo, S & Petit-Breuilh, M^a E. 1998. Evolución geológico-geomorfológica cuaternaria del tramo superior del valle del río Laja. *Revista Geológica de Chile*. Volumen 25. N°2. P. 229-253. Santiago de Chile.

Vergara, M. López, E. 1982. El volcanismo mioceno y plioceno entre los 36° y 40° L.S. de los andes chilenos: Comentario y Revisión. Quinto congreso latinoamericano de geología, Argentina. Actas, III: 513-521.

Völker, D., Kutterolf, S., & Wehrmann, H. (2011). Comparative mass balance of volcanic edifices at the southern volcanic zone of the Andes between 33 S and 46 S. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 205(3), 114-129.

9. Anexos

Anexo A: Descripción de muestras.

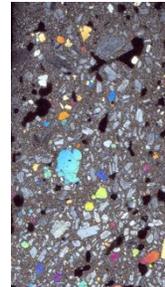
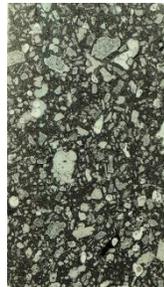
DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

| | | |
|-------------------|------------------------------|------------------|
| Código: | ANT-01 | Unidad |
| Ubicación: | 5858528 N 285393 E 19H | C.V. Los Pangues |

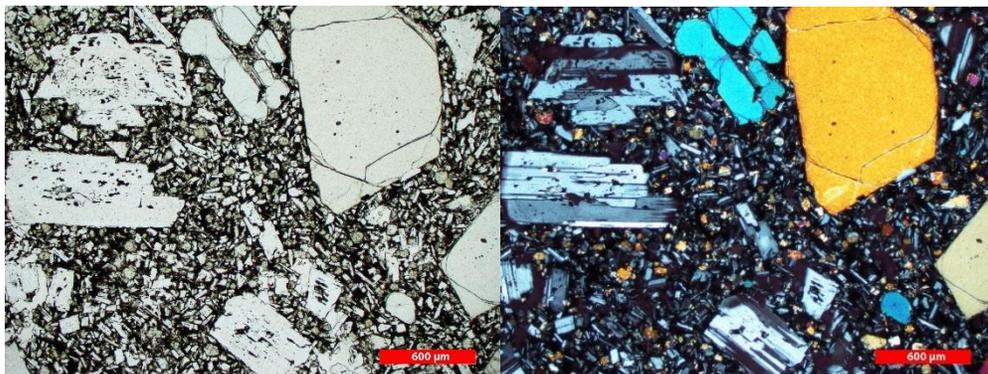
Descripción:

Roca de textura porfírica compuesta por fenocristales y microfenocristales de plagioclasas y olivinos de gran tamaño, mostrando como máximo 2,3 y 4 mm respectivamente. Principalmente se presentan como cristales euhedrales y subhedrales. Sólo algunos presentan bordes de reacción o bordes de disolución. Algunos fenocristales de plagioclasas presentan textura sieve y zonación. Además, se presenta escasos microfenocristales de magnetita. Se pueden observar vesículas de tamaños variables (máximo 1 cm) y alargadas. La matriz se compone de cristales de plagioclasas, olivinos, piroxenos y magnetita menor a 0.1 mm, siendo casi totalmente cristalina, presentando una textura intergranular.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 24,2 |
| | Olivino | 6,6 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | <0,1 |
| | Matriz | 62,4 |
| | Vesículas | 6,8 |



Imágenes:



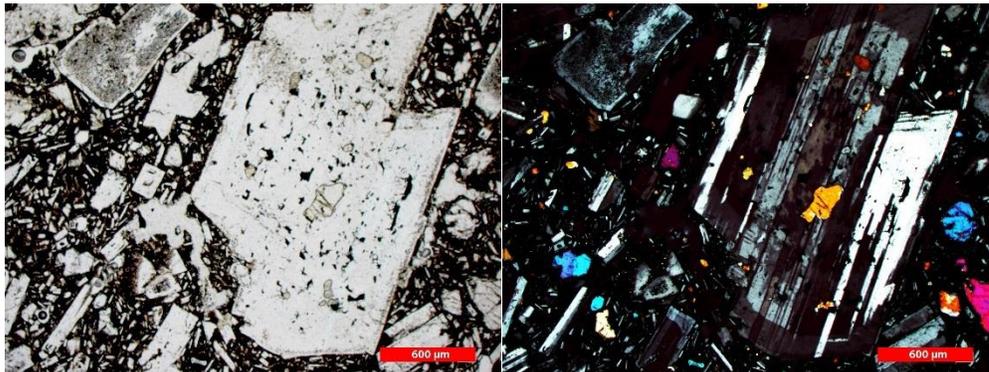
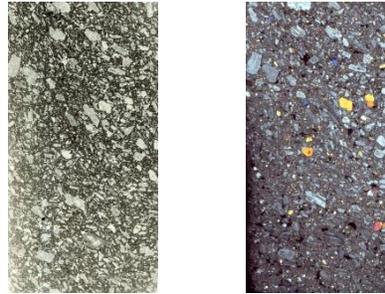
DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-02 **Unidad**
Ubicación: 5860498 N 290376 E 19H Antuco II

Descripción:

Roca de textura porfírica compuesta por fenocristales y microfenocristales de plagioclasas y olivinos de gran tamaño, mostrando como máximo 2,4 y 2 mm respectivamente. Principalmente se presentan como cristales euhedrales y subhedrales. Los olivinos presentan bordes de reacción o bordes de disolución. Algunos fenocristales de plagioclasas presentan textura sieve y zonación. Presenta cúmulos de plagioclasas y olivinos. Se observan vesículas pequeñas e irregulares. La matriz se compone de cristales de plagioclasas, olivinos, piroxenos y magnetita de tamaños menores a 0.1 mm, siendo casi totalmente cristalina, presentando una textura intergranular.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 30,6 |
| | Olivino | 2,4 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 66 |
| | Vesículas | 1 |



DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

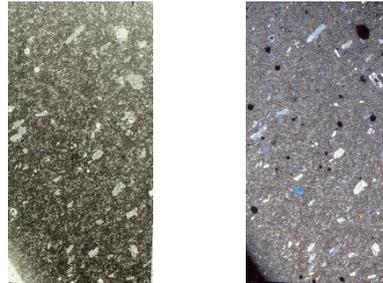
Código: ANT-03 **Unidad**
Ubicación: 5860874 N 290986 E 19H Antuco I.2

Descripción:

Roca de textura porfírica compuesta principalmente por una matriz de plagioclasas y piroxenos. Los fenocristales y microfenocristales de plagioclasas están en bajas proporciones y olivinos son escasos. Los cristales son subhedralmente principalmente. Algunos fenocristales de plagioclasas presentan textura sieve y zonación. Se pueden observar vesículas de tamaños variables y redondeadas.

Porcentajes:

| | |
|--------------|------|
| Plagioclasas | 9 |
| Olivino | 0,4 |
| Piroxenos | 0 |
| Opacos | 0 |
| Matriz | 88,8 |
| Vesículas | 1,8 |



Imágenes:



DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

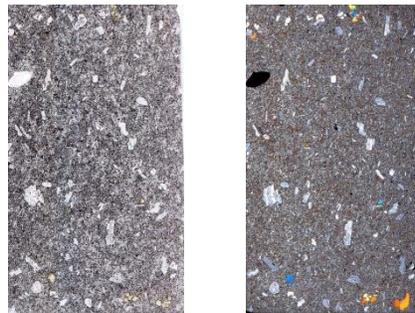
Código: ANT-04 **Unidad**
Ubicación: 5860874 N 290986 E 19H Antuco I.2

Descripción:

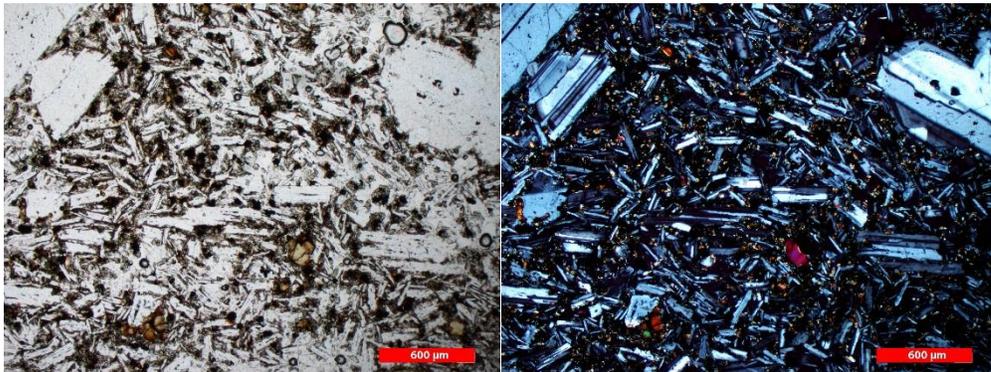
Roca porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasas en baja proporción y escasos olivinos, de tamaños milimétricos. Posee una matriz de plagioclasas, piroxenos, olivinos muy escasos y opacos, en textura intergranular. Presenta poca vesicularidad, mostrando formas ovaladas.

Porcentajes:

| | |
|--------------|------|
| Plagioclasas | 6,2 |
| Olivino | 0,6 |
| Piroxenos | 0 |
| Opacos | 0 |
| Matriz | 92,2 |
| Vesículas | 1 |



Imágenes:



DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-05

Unidad:

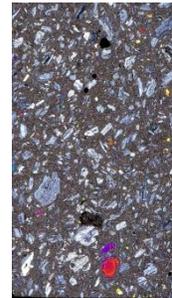
Ubicación: 5862298 N 292826 E 19H

Antuco I.3

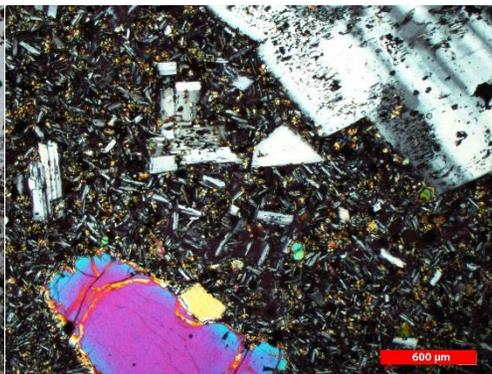
Descripción:

Roca porfírica compuesta de fenocristales y microfenocristales de plagioclasas subhedraes zonadas, con textura sieve y bordes reabsorbidos de tamaños entre 0,3 y 4 mm; fenocristales de olivino fracturados y con bordes reabsorbidos de tamaños entre 0,2 y 3 mm. La matriz muestra una textura intergranular entre plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos. Posee escasas vesículas de formas irregulares y tamaños cercanos al milímetro.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 29,6 |
| | Olivino | 0,6 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 69,2 |
| | Vesículas | 0,6 |



Imágenes:



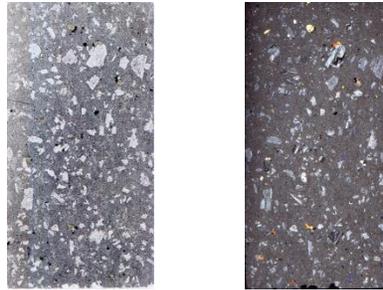
DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-06 **Unidad**
Ubicación: 5855074 N 297232 E 19H Antuco I.1

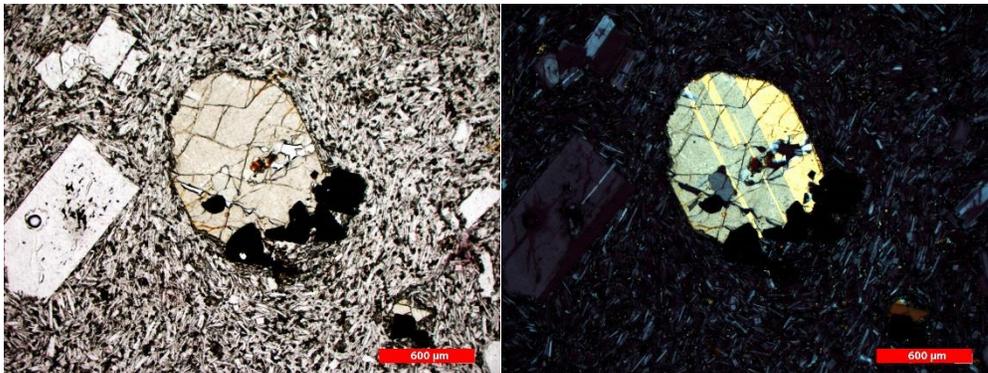
Descripción:

Roca porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasas zonadas euhedrales y subhedrales de tamaños hasta 4,2 mm, poseen textura sieve en algunos casos y mostrando a veces bordes embahados. Los fenocristales de olivino se encuentran fracturados y con bordes reabsorbidos o bordes de reacción. Los piroxenos se encuentran principalmente con bordes de reacción y comúnmente en *cluster* con fenocristales de magnetita. Además, se pueden observar cúmulos mayores formados por plagioclasas, piroxenos y magnetitas. La matriz se conforma de plagioclasas, piroxenos, escasos olivinos y opacos generando una textura intergranular. Las vesículas son pequeñas y redondeadas.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 21 |
| | Olivino | 0,8 |
| | Piroxenos | 0,6 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 76,4 |
| | Vesículas | 1,2 |



Imágenes:



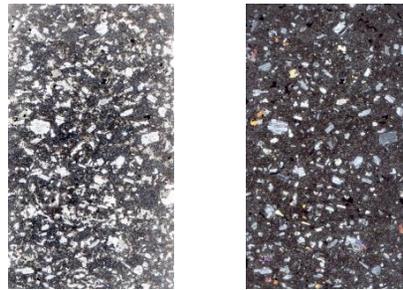
DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-07 **Unidad**
Ubicación: 5855074 N 297232 E 19H Antuco I.1

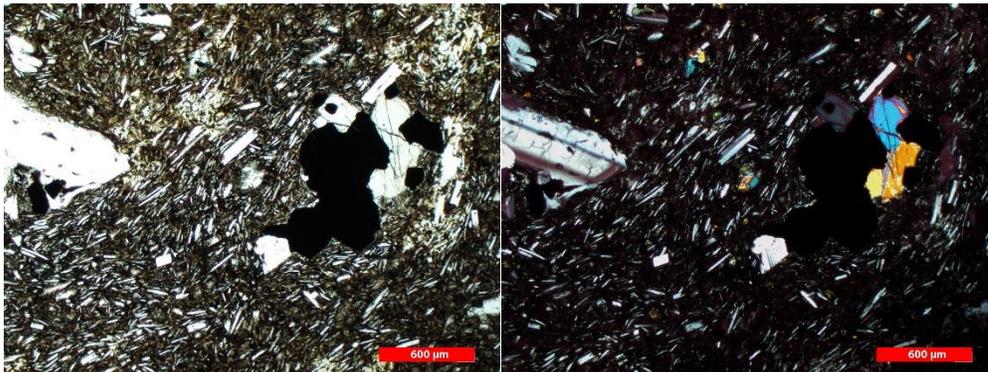
Descripción:

Roca porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasas zonadas euhedrales y subhedrales de tamaños hasta 4 mm, poseen textura sieve en algunos casos y mostrando a veces bordes embahados. Los fenocristales de olivino se encuentran fracturados y con bordes reabsorbidos o bordes de reacción. Los piroxenos se encuentran principalmente con bordes de reacción y comúnmente en *cluster* con fenocristales de magnetita. Además, se pueden observar cúmulos mayores formados por plagioclasas, piroxenos y magnetitas. La matriz se conforma de plagioclasas, piroxenos, escasos olivinos y opacos generando una textura intergranular, además se observa una textura pseudotraquítica. Las vesículas son pequeñas e irregulares.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 15,8 |
| | Olivino | 1,2 |
| | Piroxenos | 0,6 |
| | Opacos | 0,6 |
| | Matriz | 80,2 |
| | Vesículas | 1,6 |



Imágenes:



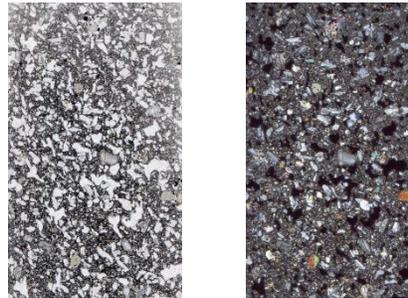
DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-08 **Unidad**
Ubicación: 5857655 N 296378 E 19H Antuco I.1

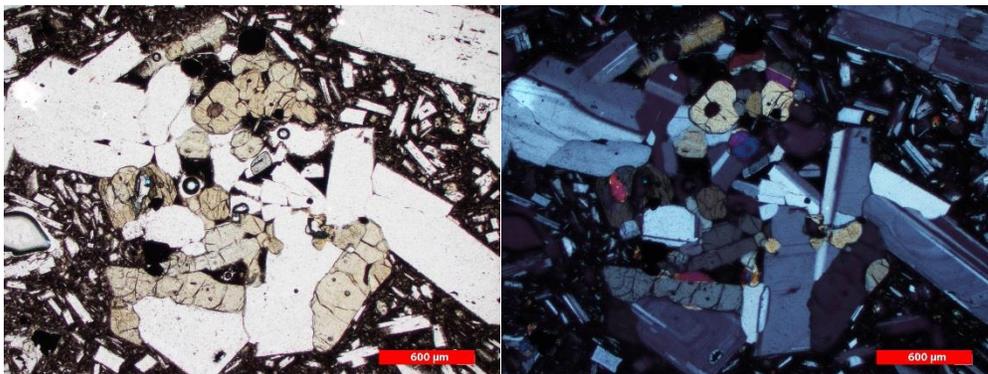
Descripción:

Roca porfírica con textura pseudotraquítica e intergranular en la matriz, compuesta por plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos. Posee fenocristales de plagioclasas, olivino, piroxenos y magnetita, formando cúmulos en ocasiones. También se observan vesículas milimétricas irregulares distribuidas homogéneamente. Los fenocristales mayores de plagioclasas presentan textura sieve y borde reabsorbidos, además de zonación.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 14,8 |
| | Olivino | 1,2 |
| | Piroxenos | 1,8 |
| | Opacos | <0,1 |
| | Matriz | 74 |
| | Vesículas | 8,2 |



Imágenes:



DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-09

Unidad:

Ubicación: 5858981 N 295976 E 19H

C.V. La Herradura

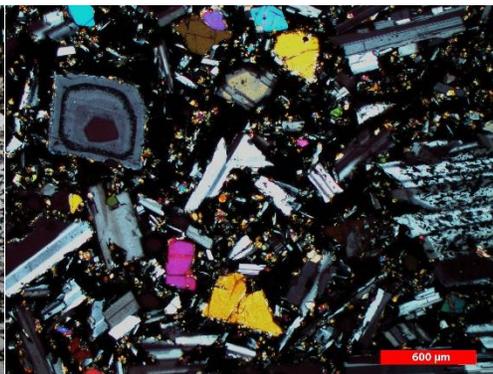
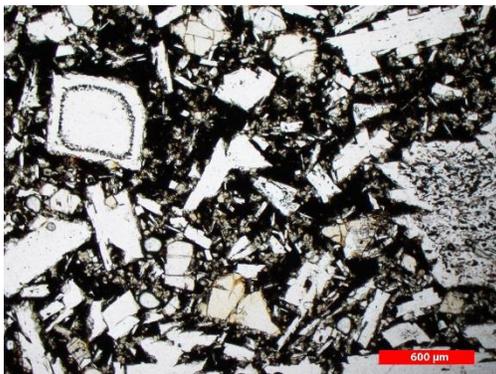
Descripción:

Roca porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasas zonadas y olivinos, donde presentan texturas de desequilibrio como bordes reabsorbidos y textura sieve en las plagioclasas. La matriz se compone de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos, formando una textura intergranular. Se observan vesículas de tamaños entre 4 y 5 mm, redondeadas y casi esféricas.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 38 |
| | Olivino | 3,8 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 56,2 |
| | Vesículas | 2 |



Imágenes:



DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-10

Unidad:

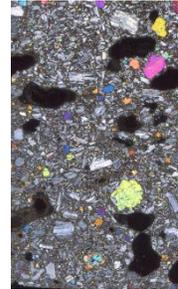
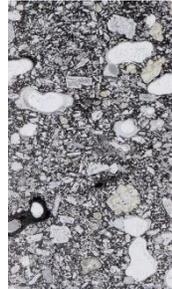
Ubicación: 5858965 N 295970 E 19H

C.V. La Herradura

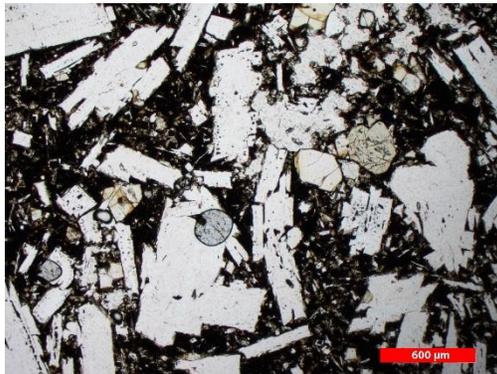
Descripción:

Roca porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasas y olivinos. Las plagioclasas presentan texturas de disequilibrio de tipo sieve y bordes reabsorbidos, además de zonación. Los olivinos sólo muestran bordes reabsorbidos. La matriz se compone de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos en una textura intergranular. Posee vesículas de gran tamaño (5-9 mm), redondeadas y alargadas.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 23,6 |
| | Olivino | 6,6 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 58,6 |
| | Vesículas | 11,2 |



Imágenes:



DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

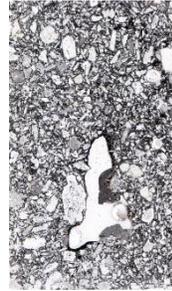
Código: ANT-11 **Unidad**
Ubicación: 5858891 N 296061 E 19H C.V. La Herradura

Descripción:

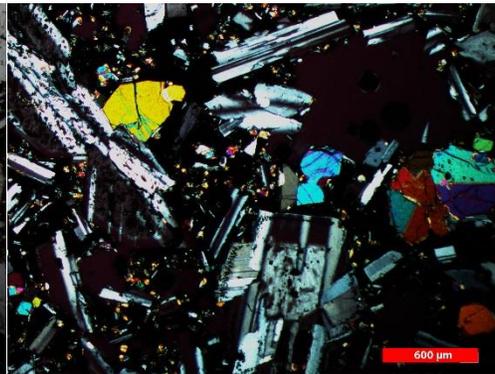
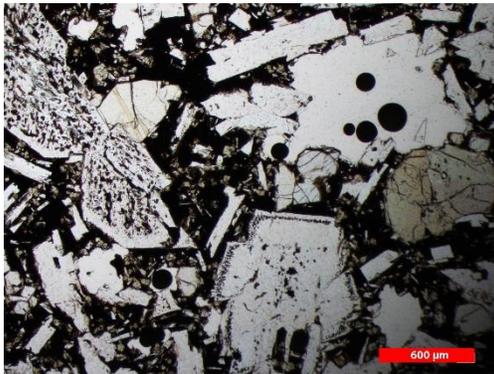
Roca de textura porfírica, compuesta de fenocristales subhedrales y anhedrales de plagioclasas zonadas y olivinos, los cuales presentan texturas de desequilibrio como bordes de reabsorción y textura sieve. La matriz se compone de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos en una textura intergranular. Posee vesículas redondeadas e irregulares alcanzando tamaños centimétricos.

Porcentajes:

| | |
|--------------|------|
| Plagioclasas | 28,2 |
| Olivino | 5,4 |
| Piroxenos | 0 |
| Opacos | 0 |
| Matriz | 56,2 |
| Vesículas | 10,2 |



Imágenes:



DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-13

Unidad:

Ubicación: 5861535 N 292398 E 19H

Antuco I.3

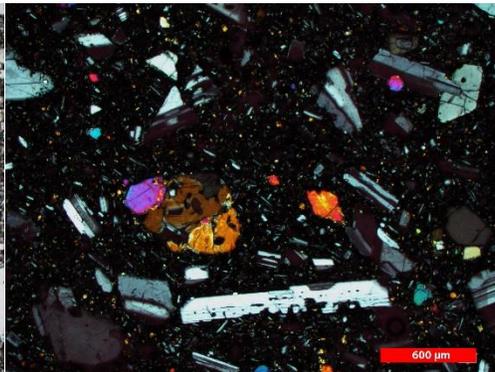
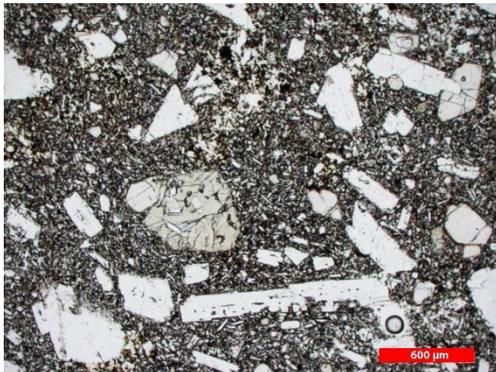
Descripción:

Roca porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasas subhedrales con bordes reabsorbidos y los de tamaños mayores presentan textura sieve. Los fenocristales de olivino son euhedrales y se encuentran reabsorbidos. La matriz se compone de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos en una textura intergranular. Posee escasa vesículas redondeadas y pequeñas.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 29,6 |
| | Olivino | 2 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 68,4 |
| | Vesículas | 0 |



Imágenes:



DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-14

Unidad:

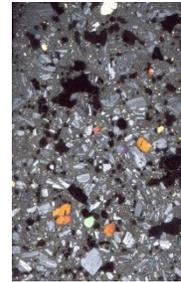
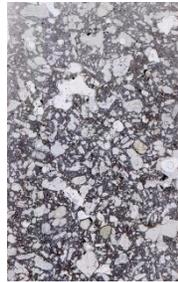
Ubicación: 5861376 N 292200 E 19H

Antuco I.3

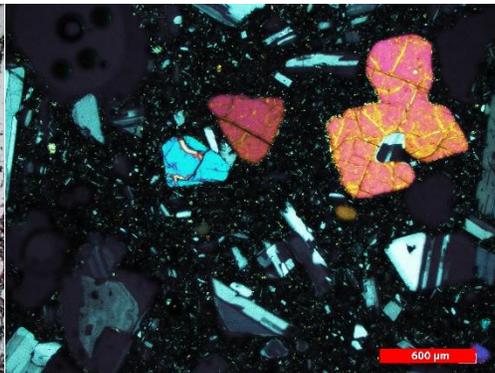
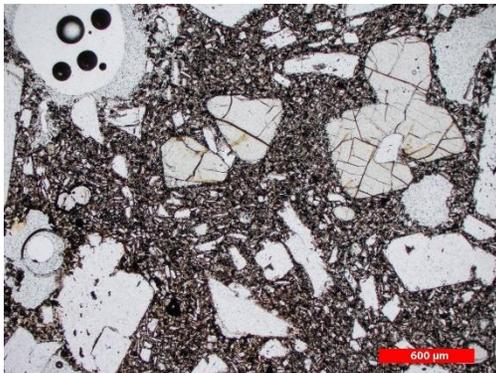
Descripción:

Roca porfírica compuesta por fenocristales subhedrales de plagioclasas con tamaños que alcanzan los 0,7 mm. Algunas presentan zonación y textura de disequilibrio tipo sieve y bordes reabsorbidos. Los olivinos son subhedrales, presentando bordes reabsorbidos. La matriz se compone de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos en una textura intergranular. Las vesículas poseen formas irregulares y alcanzan tamaños cercanos a los 0,8 mm

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 17,6 |
| | Olivino | 1,8 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 65,4 |
| | Vesículas | 15,2 |



Imágenes:



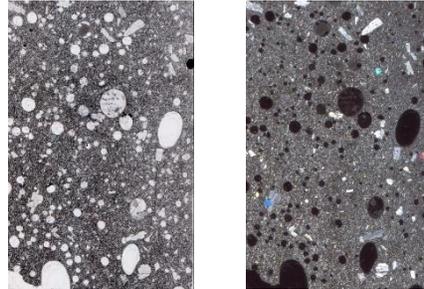
DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-15 **Unidad:**
Ubicación: 5861622 N 292146 E 19H Antuco I.2

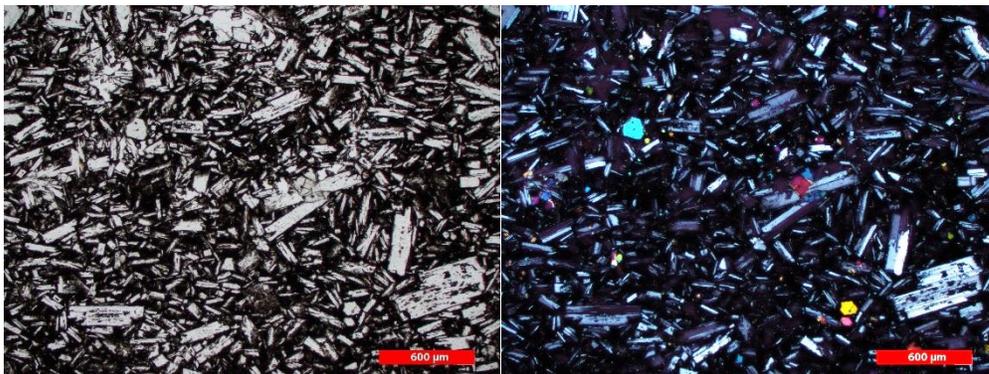
Descripción:

Roca porfírica con escasos fenocristales, tanto de plagioclasas como de olivinos. Sus formas cristalinas son subhedrales con bordes reabsorbidos. La matriz se compone de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos en una textura intergranular. Las vesículas son abundantes y poseen formas esféricas redondeadas.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 4,8 |
| | Olivino | 0,6 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 83 |
| | Vesículas | 11,6 |



Imágenes:



DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-16

Unidad:

Ubicación: 5861257 N 291623 E 19H

Antuco I.3

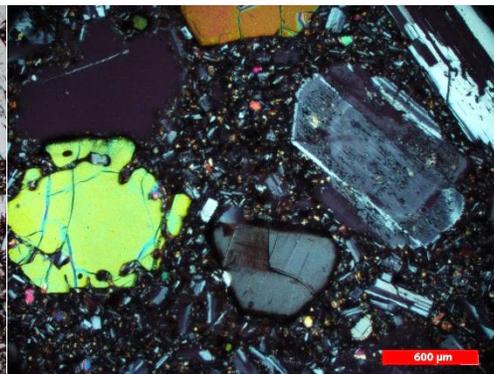
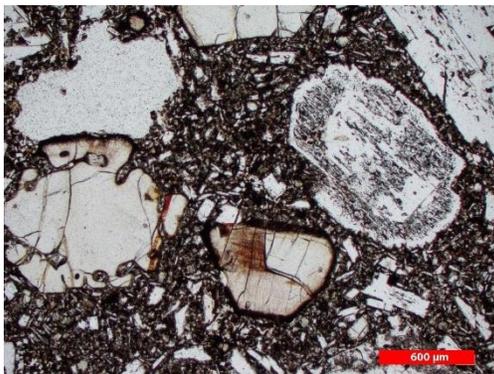
Descripción:

Roca porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasas subhedrales zonadas con bordes reabsorbidos y textura sieve. También se observan fenocristales de olivino reabsorbidos, pero conservando su forma cristalina. La matriz se compone de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos en una textura intergranular. Posee vesículas pequeñas poco redondeadas con formas irregulares.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 32 |
| | Olivino | 4 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 59,6 |
| | Vesículas | 4,4 |



Imágenes:



DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-17

Unidad:

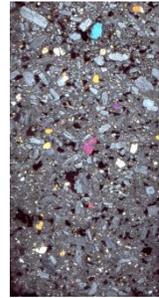
Ubicación: 5860196 N 290384 E 19H

Antuco II

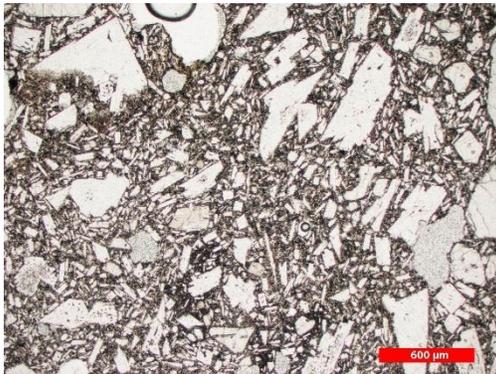
Descripción:

Roca porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasas zonadas subhedrales con textura sieve y bordes reabsorbidos. Los fenocristales de olivino son subhedrales, algunos con bordes reabsorbidos. La matriz se compone de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos en una textura intergranular. Las vesículas presentan formas irregulares y se distribuyen en toda la roca.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 17,2 |
| | Olivino | 3 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 70,8 |
| | Vesículas | 9 |



Imágenes:



DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-18

Unidad:

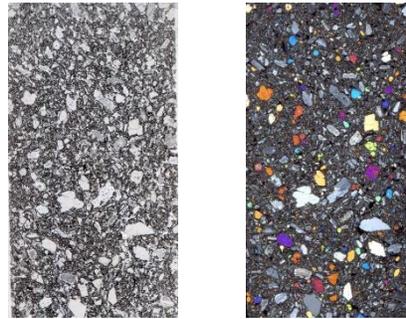
Ubicación: 5860248 N 290374 E 19H

Antuco II

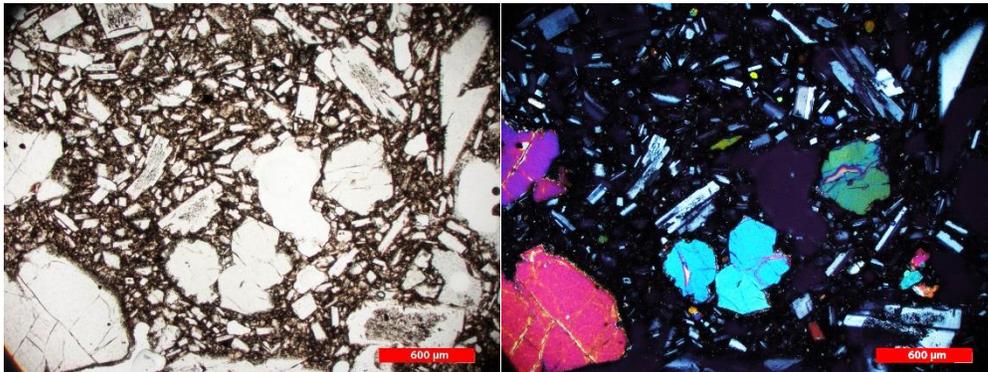
Descripción:

Roca porfírica compuesta de plagioclasas subhedrales zonadas, con textura sieve y bordes reabsorbidos. También se presentan cristales de olivino subhedrales, algunos reabsorbidos de tamaños entre 0,1 y 0,5mm, a veces formando cúmulos cristalinos junto a las plagioclasas. La matriz se compone de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos en una textura intergranular. Presenta escasas vesículas irregulares.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 14,2 |
| | Olivino | 6,6 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 78,8 |
| | Vesículas | 0,4 |



Imágenes:



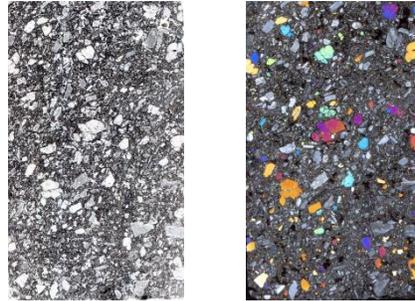
DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-19 **Unidad:**
Ubicación: 5859590 N 288835 E 19H Antuco II

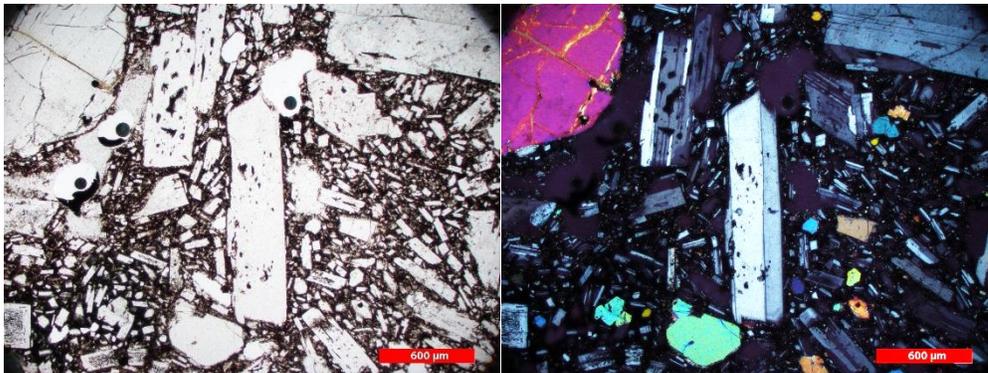
Descripción:

Roca porfírica compuesta de plagioclasas subhedrales zonadas, con textura sieve y bordes reabsorbidos, de tamaños hasta los 1,5mm. También se presentan cristales de olivino subhedrales, algunos reabsorbidos de tamaños entre 0,1 y 1,3mm, a veces formando cúmulos cristalinos junto a las plagioclasas. La matriz se compone de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos en una textura intergranular. Presenta vesículas irregulares, distribuidas homogéneamente en la muestra.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 9,4 |
| | Olivino | 9 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 79,2 |
| | Vesículas | 2,4 |



Imágenes:



DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-20

Unidad:

Ubicación: 5859393 N 288027 E 19H

Antuco II

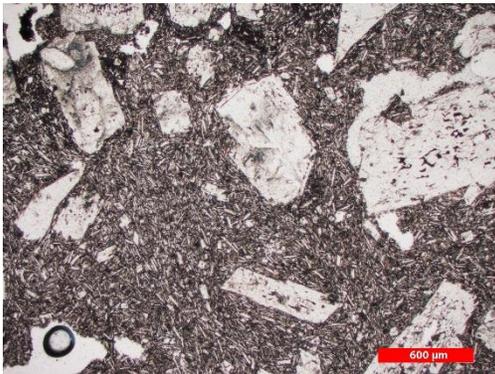
Descripción:

Roca porfírica compuesta principalmente por fenocristales de plagioclasas zonados subhedrales, poseen textura sieve y bordes reabsorbidos. Los fenocristales de olivino son escasos y de tamaños no mayor a los 0,3 mm. La matriz se compone de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos en una textura intergranular. Presenta vesículas irregulares en bajas cantidades.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 18,8 |
| | Olivino | 2,6 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 77,2 |
| | Vesículas | 1,4 |



Imágenes:



DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-21

Unidad:

Ubicación: 5859196 N 287793 E 19H

Antuco II

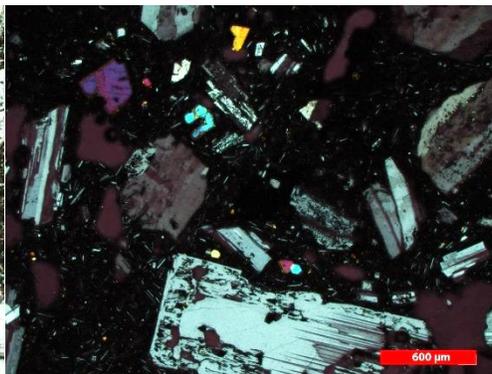
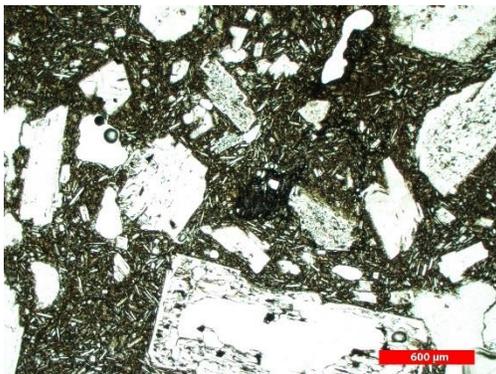
Descripción:

Roca porfírica compuesta principalmente por fenocristales de plagioclasas zonados subhedrales, poseen textura sieve y bordes reabsorbidos. Los fenocristales de olivino son escasos y de tamaños no mayor a los 0,5 mm. La matriz se compone de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos en una textura intergranular. Presenta vesículas irregulares en bajas cantidades.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 24,6 |
| | Olivino | 3 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 69 |
| | Vesículas | 3,4 |



Imágenes:



DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-22

Unidad:

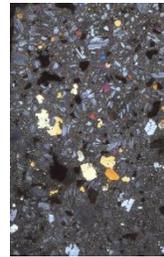
Ubicación: 5858330 N 284623 E 19H

C.V. Los Pangues

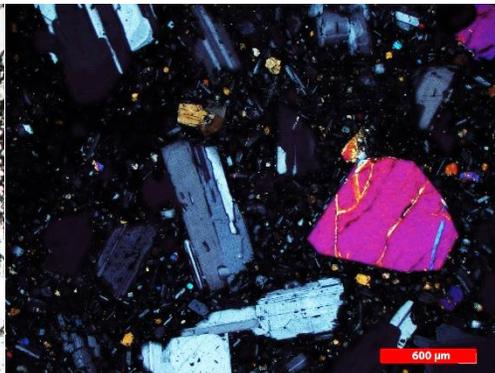
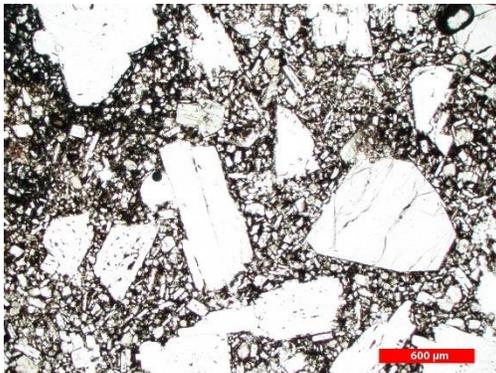
Descripción:

Roca porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasas zonados subhedrales, donde algunos presentan textura sieve y bordes reabsorbidos. Los fenocristales de olivino se encuentran más completos que en otras muestras, aunque presentan en algunos casos bordes reabsorbidos. La matriz se compone de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos en una textura intergranular. Presenta vesículas irregulares en bajas cantidades. Las vesículas presentes son de formas irregulares y se distribuyen en toda la muestra.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 17,2 |
| | Olivino | 5 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 68,6 |
| | Vesículas | 9,2 |



Imágenes:



DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-23

Unidad:

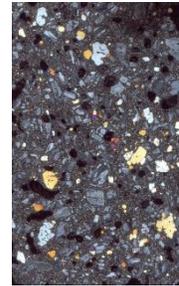
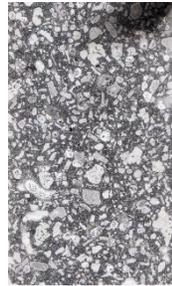
Ubicación: 5858318 N 284647 E 19 H

C.V. Los Pangues

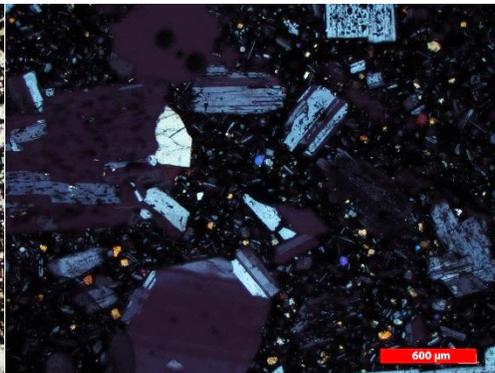
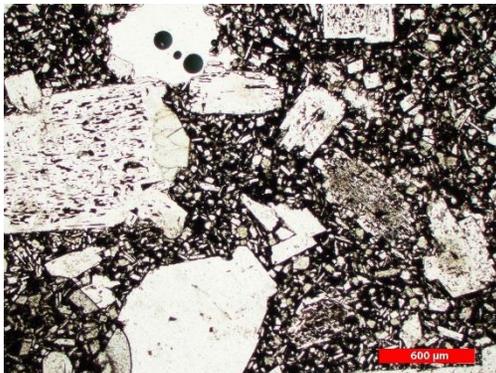
Descripción:

Roca porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasas zonadas y olivinos reabsorbidos. Las plagioclasas llegan a tamaños cercanos a los 1,2 mm y presentan textura sieve y bordes reabsorbidos. Los fenocristales de olivino son escasos y de tamaños no mayor a los 0,3 mm. La matriz se compone de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos en una textura intergranular. Presenta vesículas irregulares en bajas cantidades. Las vesículas presentes son irregulares o alargadas distribuidas en toda la muestra.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 16,4 |
| | Olivino | 5,6 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 70,2 |
| | Vesículas | 7,8 |



Imágenes:



DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-24

Unidad:

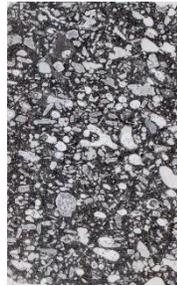
Ubicación: 5858315 N 284655 E 19H

C.V. Los Pangues

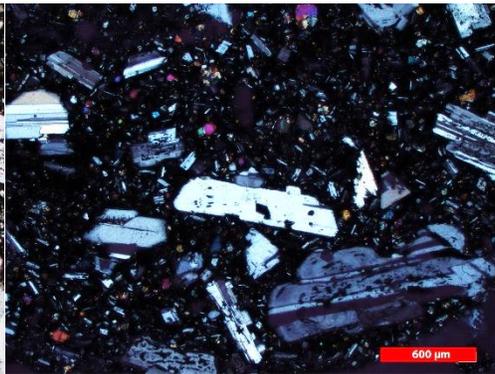
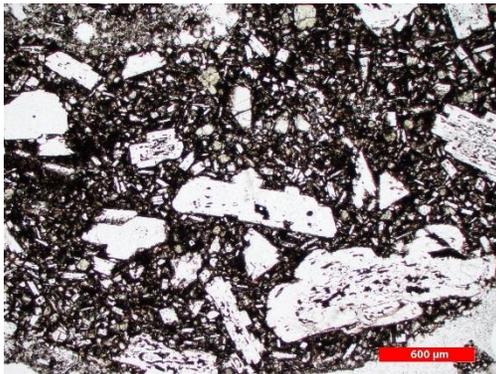
Descripción:

Roca porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasas zonadas y olivinos reabsorbidos. Las plagioclasas llegan a tamaños cercanos a los 1,8 mm y presentan textura sieve y bordes reabsorbidos. Los fenocristales de olivino son de tamaños no mayor a los 0,6 mm. La matriz se compone de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos en una textura intergranular. Presenta vesículas irregulares en bajas cantidades. Las vesículas presentes son redondeadas alargadas distribuidas en toda la muestra.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 18,6 |
| | Olivino | 4,4 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 63,6 |
| | Vesículas | 13,4 |



Imágenes:



DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-25

Unidad:

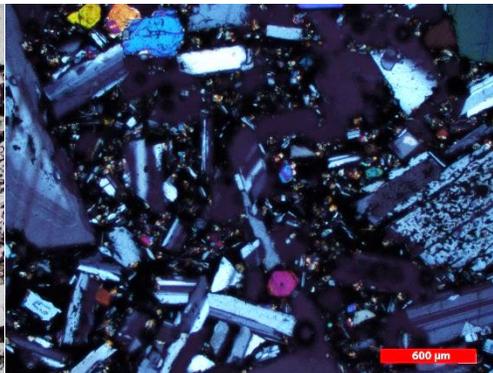
Ubicación: 5858998 N 295892 E 19H

C.V. La Herradura

Descripción:

Roca porfírica compuesta principalmente por fenocristales de plagioclasas zonadas, subhedrales, con textura sieve y bordes reabsorbidos. Alcanzan tamaños hasta los 3 mm. Los fenocristales de olivino son subhedrales con bordes reabsorbidos alcanzando tamaños de hasta 1 mm. Es posible encontrar cúmulos minerales de plagioclasas y olivinos. La matriz se compone de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos en una textura intergranular. Presenta vesículas de tamaños dispares y formas irregulares, llegando a medir casi 2cm.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 29,8 |
| | Olivino | 2,6 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 63,2 |
| | Vesículas | 4,4 |



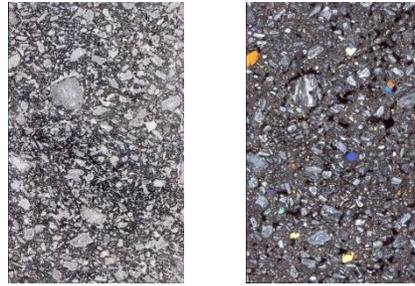
DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-26 **Unidad:**
Ubicación: 5861320 N 291640 E 19H Antuco I.3

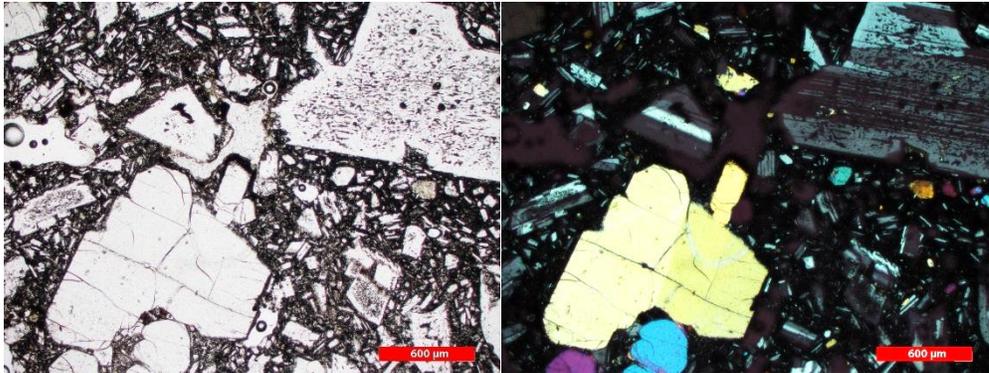
Descripción:

Roca porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasas zonados, subhedrales, con textura sieve y bordes reabsorbidos. Estos cristales llegan a un tamaño máximo de 3 mm. Los fenocristales de olivino son subhedrales, algunos con bordes reabsorbidos. Es posible encontrar cúmulos cristalinos de olivinos y plagioclasas. La matriz se compone de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos en una textura intergranular. Las vesículas son de formas irregulares y se distribuyen homogéneamente en la muestra.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 23,2 |
| | Olivino | 1,4 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 68,8 |
| | Vesículas | 6,6 |



Imágenes:



DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-28

Unidad:

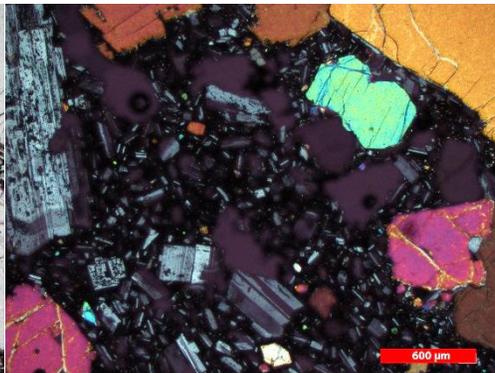
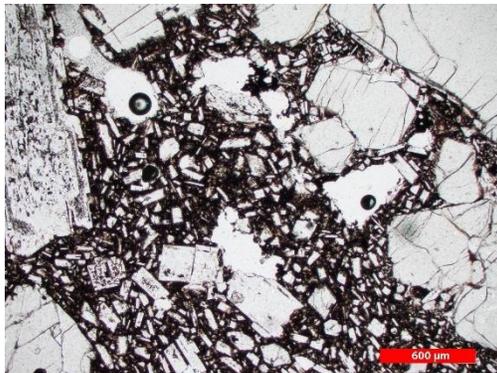
Ubicación: 5859571 N 288697 E 19H

Antuco II

Descripción:

Roca porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasas zonadas subhedrales, con textura sieve y bordes reabsorbidos que llegan a tamaños de 4,5 mm. También presenta fenocristales de olivino reabsorbidos de tamaños que alcanzan los 4 mm y su proporción es una de las mayores registradas en las muestras del Antuco. Es posible observar cúmulos de minerales de plagioclasas y olivinos. La matriz se compone de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos en una textura intergranular. Posee vesículas pequeñas e irregulares.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 14 |
| | Olivino | 12,8 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 72 |
| | Vesículas | 1,2 |



DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-29

Unidad:

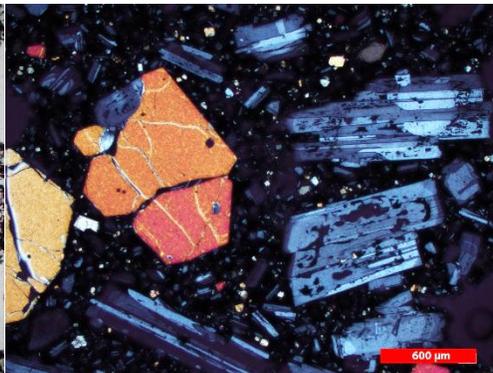
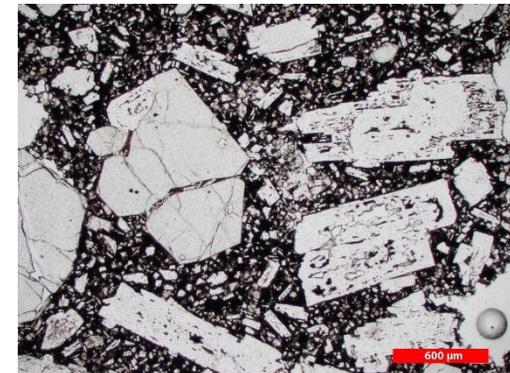
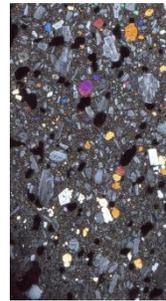
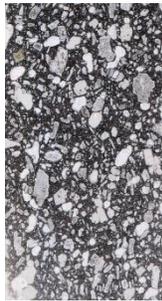
Ubicación: 5858183 N 285222 E 19H

C.V. Los Pangues

Descripción:

Roca porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasas zonadas y olivinos algunos reabsorbidos. Las plagioclasas llegan a tamaños cercanos a los 1,6 mm y presentan textura sieve y bordes reabsorbidos. Los fenocristales de olivino son de tamaños no mayor a los 0,7 mm. La matriz se compone de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos en una textura intergranular. Presenta vesículas irregulares en bajas cantidades. Las vesículas presentes son redondeadas entre esféricas y alargadas distribuidas en toda la muestra.

| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 21,2 |
| | Olivino | 5,4 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 63,6 |
| | Vesículas | 9,8 |



DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DEL VOLCÁN ANTUCO

Código: ANT-30

Unidad:

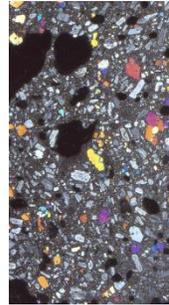
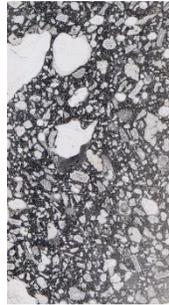
Ubicación: 5858185 N 285202 E 19H

C.V. Los Pangues

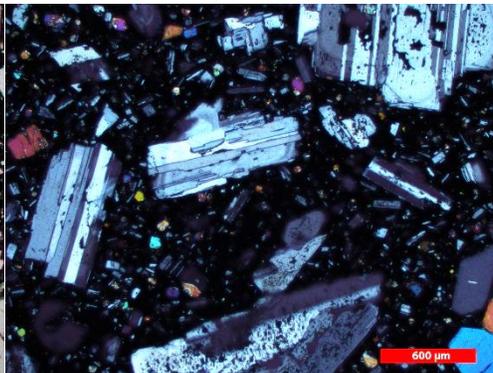
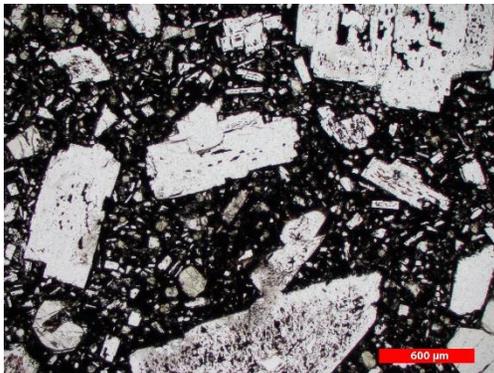
Descripción:

Roca porfírica compuesta por fenocristales de plagioclasas zonadas y olivinos algunos reabsorbidos. Las plagioclasas llegan a tamaños cercanos a los 2 mm y presentan textura sieve y bordes reabsorbidos. Los fenocristales de olivino son de tamaños no mayor a los 1,4 mm. La matriz se compone de plagioclasas, piroxenos, olivinos y opacos en una textura intergranular. Presenta vesículas irregulares en bajas cantidades. Las vesículas presentes son redondeadas entre esféricas y alargadas distribuidas en toda la muestra, llegando a tamaños cercanos a los 8 mm.

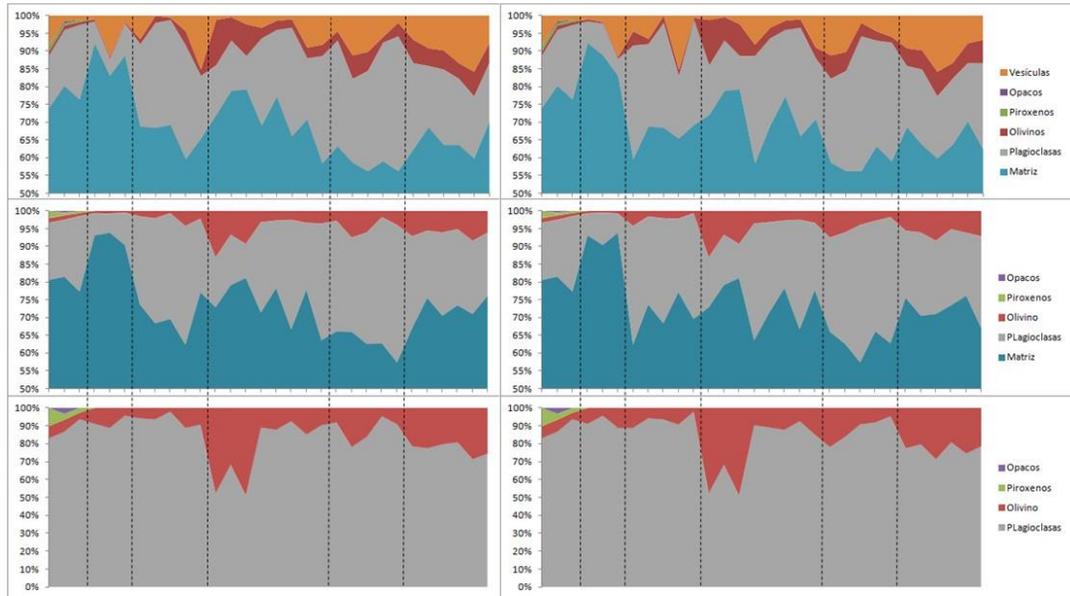
| | | |
|---------------------|--------------|------|
| Porcentajes: | Plagioclasas | 17,4 |
| | Olivino | 7 |
| | Piroxenos | 0 |
| | Opacos | 0 |
| | Matriz | 59,8 |
| | Vesículas | 15,8 |



Imágenes:



Anexo B: Gráficos de distribución modal de fenocristales



Ordenado según SiO₂

Ordenado según #Mg

Anexo C: Datos Geoquímicos

López Escobar *et al.*, 1981

| | Antuco I | | | Antuco II | | | Cono parásito | |
|------------------------------------|----------|--------------|--------|-----------|--------|--------|---------------|--------|
| | VK126 | 511775 | 511776 | VK133 | 511773 | 511777 | VK137 | 801 |
| SiO ₂ | 52,58 | 52,80 | 54,35 | 51,35 | 51,81 | 52,86 | 51,73 | 53,08 |
| TiO ₂ | 1,00 | 1,02 | 0,93 | 0,96 | 0,94 | 0,99 | 1,22 | 1,18 |
| Al ₂ O ₃ | 19,13 | 18,29 | 18,16 | 19,13 | 18,17 | 17,22 | 17,98 | 18,19 |
| Fe ₂ O ₃ | 2,10 | 1,77 | 1,97 | 2,06 | 1,94 | 2,90 | 2,27 | - |
| FeO | 5,72 | 6,33 | 5,91 | 6,21 | 6,94 | 6,85 | 6,39 | 8,88 |
| MnO | 0,16 | 0,15 | 0,14 | 0,17 | 0,16 | 0,17 | 0,18 | - |
| MgO | 4,92 | 5,65 | 5,60 | 6,00 | 6,12 | 6,78 | 5,53 | 5,95 |
| CaO | 9,12 | 8,75 | 8,46 | 9,09 | 9,05 | 8,15 | 8,73 | 8,85 |
| Na ₂ O | 3,96 | 3,48 | 3,35 | 4,00 | 3,42 | 3,43 | 4,19 | 3,83 |
| K ₂ O | 0,80 | 0,78 | 0,72 | 0,72 | 0,67 | 0,67 | 0,88 | 0,80 |
| P ₂ O ₅ | 0,24 | 0,19 | 0,17 | 0,25 | 0,21 | 0,23 | 0,31 | 0,27 |
| H ₂ O + CO ₂ | 0,47 | 0,32 | 0,38 | 0,62 | 0,31 | 0,20 | 0,45 | - |
| Total | 100,20 | 99,53 | 100,14 | 100,56 | 99,74 | 100,45 | 99,86 | 92,15 |
| Sc | | 27,64 ± 0,03 | 27,11 | | 26,97 | 25,48 | | 20,20 |
| Cr | | 128,6 ± 0,7 | 96,40 | | 104,70 | 119,20 | | 174,00 |
| Co | | 31,7 ± 0,2 | 31,00 | | 35,50 | 43,60 | | 19,60 |
| Ni | | 100 | 100,00 | | 100,00 | 160,00 | | 69,00 |
| Rb | | 23 | 25,00 | | 17,00 | 17,00 | | 20,00 |
| Sr | | 589 | 583,00 | | 555,00 | 538,00 | | 470,00 |
| Ba | | 260 ± 24 | 265,00 | | 200,00 | 216,00 | | 150,00 |
| La | | 10,6 ± 0,1 | 9,80 | | 8,80 | 9,40 | | 6,70 |
| Ce | | 26,3 ± 0,3 | 24,10 | | 21,90 | 24,20 | | 18,80 |
| Nd | | 14,7 ± 0,6 | 14,50 | | 12,80 | 13,70 | | 10,30 |
| Sm | | 3,10 ± 0,02 | 3,01 | | 2,66 | 3,20 | | 2,49 |
| Eu | | 1,17 ± 0,02 | 1,07 | | 1,06 | 1,08 | | 1,01 |
| Tb | | 0,56 ± 0,03 | 0,47 | | 0,53 | 0,52 | | - |
| Ho | | 0,7 ± 0,1 | 0,70 | | 0,70 | 0,80 | | 0,50 |
| Yb | | 1,75 ± 0,06 | 1,59 | | 1,82 | 1,81 | | 1,60 |
| Lu | | 0,29 ± 0,01 | 0,31 | | 0,31 | 0,31 | | 0,23 |
| Hf | | 1,77 ± 0,04 | 1,67 | | 1,54 | 1,70 | | 1,70 |
| Ta | | n.d. | n.d. | | 0,59 | n.d. | | 0,40 |
| Th | | 2,32 ± 0,07 | 2,02 | | 1,59 | 1,62 | | 2,00 |

Vergara y Katsui 1969.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| SiO ₂ | 51,35 | 51,73 | 52,58 | 55,00 | 57,46 | 58,66 |
| TiO ₂ | 0,96 | 1,22 | 1,00 | 1,49 | 1,37 | 0,95 |
| Al ₂ O ₃ | 19,13 | 17,98 | 19,13 | 16,80 | 16,39 | 17,94 |
| Fe ₂ O ₃ | 2,06 | 2,27 | 2,10 | 3,98 | 4,57 | 2,28 |
| FeO | 6,21 | 6,39 | 5,72 | 5,81 | 4,05 | 3,95 |
| MnO | 0,17 | 0,18 | 0,16 | 0,22 | 0,19 | 0,12 |
| MgO | 6,00 | 5,53 | 4,92 | 3,35 | 2,70 | 2,21 |
| CaO | 9,09 | 8,73 | 9,12 | 7,16 | 5,72 | 5,92 |
| Na ₂ O | 4,00 | 4,19 | 3,96 | 4,71 | 6,03 | 4,48 |
| K ₂ O | 0,72 | 0,88 | 0,80 | 1,16 | 1,08 | 1,85 |
| P ₂ O ₅ | 0,25 | 0,31 | 0,24 | 0,35 | 0,38 | 0,26 |
| H ₂ O + | 0,43 | 0,32 | 0,34 | 0,32 | 0,14 | 1,46 |
| H ₂ O - | 0,19 | 0,13 | 0,13 | 0,14 | 0,08 | 0,28 |
| Total | 100,56 | 99,86 | 100,20 | 100,49 | 100,16 | 100,36 |

Enrione y Villarroel 1962

| | Antuco I | | | | |
|------------------------------------|----------|--------|--------|--------|-------|
| | 1803-1 | 1803-4 | H-125 | H-114 | H-103 |
| SiO ₂ | 51,95 | 53,03 | 55,88 | 55,48 | 59,46 |
| TiO ₂ | 1,02 | 1,06 | 1,53 | 1,17 | 1,00 |
| Al ₂ O ₃ | 20,51 | 20,43 | 17,70 | 18,38 | 18,70 |
| Fe ₂ O ₃ | 2,84 | 1,96 | 3,26 | 1,91 | 1,40 |
| FeO | 5,78 | 5,67 | 6,45 | 5,85 | 4,93 |
| MnO | 0,13 | 0,12 | 0,16 | 0,12 | 0,14 |
| MgO | 3,96 | 2,97 | 2,80 | 3,46 | 2,00 |
| CaO | 9,59 | 9,32 | 6,61 | 6,98 | 5,39 |
| Na ₂ O | 3,67 | 3,85 | 4,69 | 4,11 | 4,84 |
| K ₂ O | 0,68 | 0,80 | 1,28 | 1,47 | 1,40 |
| P ₂ O ₅ | 0,20 | 0,22 | 0,29 | 0,28 | 0,29 |
| H ₂ O + CO ₂ | 0,43 | 0,62 | 0,41 | 0,79 | 0,37 |
| Total | 100,76 | 100,05 | 101,06 | 100,00 | 99,92 |

Lohmar 2000

* Vergara 1985

**López-Escobar et al., 1981

| | Antuco I | | | | | |
|-------|----------|-----------|-----------|--------|-----------|-----------|
| | Qval1 | Av. Volc. | Qval3 | Qval * | Qval3 | Qval3** |
| | 250199-7 | 260199-3 | 010283-01 | 1803-1 | 201098-04 | 051177-06 |
| SiO2 | 51,2 | 52,5 | 51,48 | 51,95 | 52,1 | 52,15 |
| TiO2 | 0,98 | 1,12 | 1,05 | 1,02 | 1,1 | 0,94 |
| Al2O3 | 18,56 | 17,88 | 19,69 | 20,51 | 20,11 | 18,42 |
| Fe2O3 | 7,33 | 8,12 | 9,01 | 9,26 | 7,51 | 8,49 |
| MnO | 0,13 | 0,15 | 0,19 | 0,13 | 0,13 | - |
| MgO | 6,61 | 4,82 | 4,89 | 3,96 | 3,47 | 5,67 |
| CaO | 9,75 | 9,08 | 9,08 | 9,59 | 10,01 | 9,1 |
| Na2O | 3,15 | 3,34 | 3,75 | 3,67 | 3,76 | 3,05 |
| K2O | 0,94 | 0,93 | 0,81 | 0,68 | 0,66 | 0,75 |
| P2O5 | 0,14 | 0,21 | 0,19 | 0,2 | 0,19 | 0,22 |
| ppc | 0,69 | 1,13 | 0,31 | 0,43 | 0,48 | - |
| Total | 99,48 | 99,28 | 100,45 | 101,4 | 99,52 | 98,79 |

| | Antuco I | | | | | |
|-------|-----------|-----------|--------|-----------|-----------|-----------|
| | Qval1 | Qval2** | Qval1* | Qval2 | Qval2 | Qval1 |
| | 250199-10 | 051177-05 | 1803-4 | 211098-04 | 010283-06 | 250199-12 |
| SiO2 | 52,65 | 52,8 | 53,03 | 53,38 | 54,12 | 54,27 |
| TiO2 | 0,94 | 1,02 | 1,06 | 1,45 | 1,42 | 1,45 |
| Al2O3 | 17,78 | 18,29 | 20,43 | 17 | 17,18 | 16,9 |
| Fe2O3 | 7,61 | 8,8 | 8,26 | 9,78 | 11,24 | 9,59 |
| MnO | 0,13 | 0,15 | 0,12 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |
| MgO | 6,43 | 5,65 | 2,97 | 3,74 | 3,58 | 3,5 |
| CaO | 9,15 | 8,75 | 9,32 | 7,87 | 7,46 | 7,1 |
| Na2O | 3,19 | 3,48 | 3,85 | 4,17 | 4,31 | 4,58 |
| K2O | 0,98 | 0,78 | 0,8 | 0,86 | 0,85 | 0,97 |
| P2O5 | 0,15 | 0,19 | 0,22 | 0,26 | 0,21 | 0,23 |
| ppc | 0,37 | 0,32 | 0,62 | 0,48 | 0,32 | 0,45 |
| Total | 99,38 | 100,23 | 100,68 | 99,16 | 100,86 | 99,21 |

| | Antuco I | | | | | |
|-------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|--------|
| | Qval1 | Qval2** | Qval1 | Qval1 | Qval2** | Qval* |
| | 230199-2 | 051177-01 | 230199-5 | 230199-10 | 051177-01 | H-125 |
| SiO2 | 54,3 | 54,88 | 54,95 | 55,12 | 55,19 | 55,48 |
| TiO2 | 1,2 | 1,33 | 1,17 | 1,08 | 1,38 | 1,53 |
| Al2O3 | 17,9 | 16,5 | 17,43 | 17,67 | 16,99 | 17,7 |
| Fe2O3 | 7,3 | 11,05 | 7,32 | 7,28 | 11,06 | 10,43 |
| MnO | 0,13 | 0,19 | 0,12 | 0,12 | - | 0,16 |
| MgO | 4,15 | 3,28 | 4,1 | 4,76 | 3,35 | 2,8 |
| CaO | 7,84 | 7,25 | 7,92 | 7,52 | 7,41 | 6,61 |
| Na2O | 3,94 | 4,44 | 4,09 | 3,76 | 3,92 | 4,69 |
| K2O | 1,38 | 0,84 | 1,44 | 1,33 | 0,86 | 1,28 |
| P2O5 | 0,28 | 0,21 | 0,29 | 0,26 | 0,24 | 0,29 |
| ppc | 0,68 | 0,28 | 0,3 | 0,32 | - | 0,41 |
| Total | 99,1 | 100,25 | 99,13 | 99,22 | 100,4 | 101,38 |

| | Antuco I | | | | | | |
|-------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|----------|
| | Qval * | Qval1 | Qval* | Qval1 | Qval1 | Qval1 | Qval1 |
| | H-114 | 250199-2 | H-103 | 250199-4 | 250199-3 | 250199-5 | 250199-1 |
| SiO2 | 55,48 | 58,1 | 59,46 | 59,63 | 63,05 | 63,12 | 64,4 |
| TiO2 | 1,17 | 1,11 | 1 | 1,06 | 0,76 | 0,72 | 0,73 |
| Al2O3 | 18,38 | 17,89 | 18,7 | 17,43 | 16,48 | 16,78 | 16,11 |
| Fe2O3 | 8,41 | 6,5 | 6,88 | 6,27 | 5,38 | 5,74 | 5,36 |
| MnO | 0,12 | 0,17 | 0,14 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,15 |
| MgO | 3,46 | 2,08 | 2 | 2,18 | 1,35 | 1,28 | 1,27 |
| CaO | 6,98 | 5,43 | 5,39 | 5,29 | 3,92 | 3,62 | 3,6 |
| Na2O | 4,11 | 4,78 | 4,84 | 5,03 | 5,25 | 5,36 | 5,09 |
| K2O | 1,47 | 1,7 | 1,4 | 1,7 | 2,28 | 2,35 | 2,27 |
| P2O5 | 0,28 | 0,4 | 0,29 | 0,37 | 0,27 | 0,27 | 0,27 |
| ppc | 0,79 | 1,25 | 0,37 | 0,24 | 0,67 | 0,35 | 0,48 |
| Total | 100,65 | 99,41 | 100,47 | 99,36 | 99,57 | 99,75 | 99,73 |

| | Antuco I | Antuco II | | | | |
|-------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Qval1 | Qval5 | Qval3 | Qval2 | Qval4** | Qval1 |
| | 230199-1 | 010283-03 | 250199-11 | 211098-02 | 051177-07 | 310183-06 |
| SiO2 | 65,08 | 50,88 | 52,1 | 52,2 | 52,86 | 52,88 |
| TiO2 | 0,68 | 0,98 | 1,11 | 1,1 | 0,99 | 1,08 |
| Al2O3 | 16,4 | 17,68 | 19,5 | 19,5 | 17,22 | 19,45 |
| Fe2O3 | 4,48 | 9,61 | 8,08 | 7,43 | 10,51 | 8,55 |
| MnO | 0,11 | 0,14 | 0,14 | 0,13 | 0,17 | 0,15 |
| MgO | 1,15 | 7,46 | 3,7 | 4,29 | 6,78 | 4,39 |
| CaO | 3,7 | 8,8 | 9,4 | 9,01 | 8,15 | 9,08 |
| Na2O | 4,66 | 3,33 | 3,79 | 4,01 | 3,43 | 3,8 |
| K2O | 2,7 | 0,79 | 0,72 | 0,73 | 0,67 | 0,72 |
| P2O5 | 0,26 | 0,21 | 0,19 | 0,22 | 0,23 | 0,22 |
| ppc | 0,31 | 0,42 | 0,57 | 0,45 | 0,2 | - |
| Total | 99,53 | 100,3 | 99,3 | 99,07 | 101,21 | 100,32 |

| | Antuco II | | Centros volcánicos menores | | | |
|-------|-----------|-----------|----------------------------|-----------|-----------|----------|
| | Qval1 | Qval1 | Qcvlh | Qcvlp** | Qcvnn | Qcvlh ** |
| | 211098-05 | 211098-06 | 310183-11 | 051177-03 | 230199-12 | 801 |
| SiO2 | 55,24 | 56,8 | 51,66 | 51,81 | 52,28 | 53,08 |
| TiO2 | 1,56 | 1,48 | 1,14 | 0,94 | 1,06 | 1,18 |
| Al2O3 | 16,8 | 16,41 | 18 | 18,17 | 20,17 | 18,19 |
| Fe2O3 | 9,36 | 8,5 | 9,76 | 9,65 | 7,29 | 9,87 |
| MnO | 0,17 | 0,17 | 0,14 | 0,16 | 0,14 | - |
| MgO | 3,08 | 2,89 | 5,75 | 6,12 | 3,52 | 5,95 |
| CaO | 6,71 | 6,63 | 8,86 | 9,05 | 9,73 | 8,85 |
| Na2O | 4,45 | 4,42 | 3,62 | 3,42 | 3,71 | 3,83 |
| K2O | 1,12 | 1,18 | 0,81 | 0,67 | 0,67 | 0,8 |
| P2O5 | 0,31 | 0,29 | 0,2 | 0,21 | 0,18 | 0,27 |
| ppc | 0,23 | 0,5 | 0,59 | 0,31 | 0,26 | - |
| Total | 99,03 | 99,27 | 100,53 | 100,51 | 99,01 | 102,02 |

| | Antuco I | | | | | |
|--------------|----------|-----------|-----------|--------|-----------|-----------|
| | Qval1 | Av. Volc. | Qval3 | Qval * | Qval3 | Qval3** |
| | 250199-7 | 260199-3 | 010283-01 | 1803-1 | 201098-04 | 051177-06 |
| SiO2 (% p/p) | 51,2 | 52,5 | 51,48 | - | 52,1 | 54,35 |
| Ti (ppm) | 5876 | 6715 | 6296 | - | 6595 | 5575 |
| P | 611 | 916 | 829 | - | 829 | 742 |
| K | 7803 | 7469 | 6724 | - | 5478 | 5976 |
| Rb | - | - | - | - | - | 25 |
| Cs | - | - | - | - | - | 1,05 |
| Sr | 484 | 524 | 485 | - | 500 | 583 |
| Ba | 235 | 257 | 221 | - | 183 | 265 |
| Ga | - | - | - | - | - | 20 |
| Pb | - | - | - | - | - | 8 |
| Sc | 24 | 29 | 22 | - | 26 | 27,11 |
| V | 173 | 259 | 220 | - | 239 | 180 |
| Cr | 124 | 53 | 60 | - | 29 | 96,4 |
| Co | 24 | 25 | 24 | - | 23 | 31 |
| Ni | 65 | 18 | 39 | - | 15 | 100 |
| Cu | 55 | 30 | 68 | - | 68 | - |
| Zn | 65 | 74 | 80 | - | 79 | 76 |
| Y | 14 | 18 | 17 | - | 19 | 15,2 |
| Zr | 85 | 90 | 87 | - | 70 | 80 |
| Nb | - | - | 6 | - | - | 1,9 |
| Hf | 2,1 | 3 | 2 | - | 2,6 | 1,67 |
| Ta | - | - | - | - | - | - |
| Th | 4 | 2 | 2 | - | 2 | 2,02 |
| La | 12 | 13 | 8 | - | 9 | 9,8 |
| Ce | 26 | 32 | 20 | - | 23 | 24,1 |
| Nd | 13 | 18 | 14 | - | 15 | 14,5 |
| Sm | 2,75 | 3,91 | 2,96 | - | 3,16 | 3,01 |
| Eu | 0,89 | 1,11 | 0,97 | - | 1,09 | 1,07 |
| Gd | 2,78 | 3,65 | 3,02 | - | 3,48 | - |
| Tb | - | - | - | - | - | 0,47 |
| Dy | 2,8 | 3,72 | 3,16 | - | 3,7 | - |
| Ho | 0,55 | 0,7 | 0,68 | - | 0,74 | 0,7 |
| Er | 1,42 | 1,9 | 1,79 | - | 1,95 | - |
| Yb | 1,39 | 1,87 | 1,76 | - | 1,98 | 1,59 |
| Lu | 0,22 | 0,29 | 0,28 | - | 0,29 | 0,31 |

| | Antuco I | | | | | |
|--------------|-----------|-----------|--------|-----------|-----------|-----------|
| | Qval1 | Qval2** | Qval1* | Qval2 | Qval2 | Qval1 |
| | 250199-10 | 051177-05 | 1803-4 | 211098-04 | 010283-06 | 250199-12 |
| SiO2 (% p/p) | 52,65 | 52,8 | - | 53,38 | 54,12 | 54,27 |
| Ti (ppm) | 5636 | 6116 | - | 8694 | 8514 | 8694 |
| P | 655 | 829 | - | 1117 | 916 | 1004 |
| K | 8135 | 6475 | - | 7139 | 7056 | 8052 |
| Rb | - | 23 | - | - | - | - |
| Cs | - | 1,2 | - | - | - | - |
| Sr | 469 | 589 | - | 427 | 460 | 478 |
| Ba | 221 | 260 | - | 257 | 240 | 270 |
| Ga | - | 19 | - | - | - | - |
| Pb | - | 7 | - | - | - | - |
| Sc | 24 | 27,64 | - | 29 | 30 | 28 |
| V | 175 | 186 | - | 259 | 314 | 254 |
| Cr | 129 | 128,6 | - | 24 | 15 | 4 |
| Co | 26 | 31,7 | - | 21 | 25 | 23 |
| Ni | 74 | 100 | - | 16 | 10 | 6 |
| Cu | 40 | - | - | 73 | 83 | 39 |
| Zn | 70 | 72,1 | - | 96 | 114 | 96 |
| Y | 13 | 15,9 | - | 24 | 23 | 23 |
| Zr | 85 | 87,3 | - | 102 | 104 | 105 |
| Nb | - | 2,6 | - | - | 9 | - |
| Hf | 2 | 1,77 | - | 3,5 | 1 | 3 |
| Ta | - | - | - | - | - | - |
| Th | 4 | 2,32 | - | 3 | 1 | 3 |
| La | 10 | 10,6 | - | 11 | 9 | 14 |
| Ce | 25 | 26,3 | - | 28 | 23 | 33 |
| Nd | 13 | 14,7 | - | 20 | 17 | 20 |
| Sm | 2,69 | 3,1 | - | 4,01 | 3,64 | 4,64 |
| Eu | 0,92 | 1,17 | - | 1,43 | 1,25 | 1,5 |
| Gd | 2,68 | - | - | 4,43 | 3,7 | 4,39 |
| Tb | - | 0,56 | - | - | - | - |
| Dy | 2,63 | - | - | 4,4 | 4,08 | 4,58 |
| Ho | 0,53 | 0,7 | - | 0,9 | 0,88 | 0,94 |
| Er | 1,31 | - | - | 2,4 | 2,38 | 2,5 |
| Yb | 1,31 | 1,75 | - | 2,5 | 2,27 | 2,54 |
| Lu | 0,2 | 0,29 | - | 0,37 | 0,35 | 0,38 |

| | Antuco I | | | | | |
|--------------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|-------|
| | Qval1 | Qval2** | Qval1 | Qval1 | Qval2** | Qval* |
| | 230199-2 | 051177-01 | 230199-5 | 230199-10 | 051177-01 | H-125 |
| SiO2 (% p/p) | 54,3 | 54,88 | 54,95 | 55,12 | - | - |
| Ti (ppm) | 7195 | 7975 | 7015 | 6476 | - | - |
| P | 1222 | 916 | 1266 | 1135 | - | - |
| K | 11456 | 6973 | 11954 | 11041 | - | - |
| Rb | - | 17 | - | - | - | - |
| Cs | - | 0,63 | - | - | - | - |
| Sr | 530 | 485 | 546 | 504 | - | - |
| Ba | 360 | 265 | 381 | 360 | - | - |
| Ga | - | 22,8 | - | - | - | - |
| Pb | - | 7 | - | - | - | - |
| Sc | 23 | 33,26 | 21 | 24 | - | - |
| V | 200 | 213 | 205 | 197 | - | - |
| Cr | 22 | 12,2 | 19 | 57 | - | - |
| Co | 24 | 24,5 | 25 | 24 | - | - |
| Ni | 29 | 40 | 33 | 46 | - | - |
| Cu | 48 | - | 48 | 48 | - | - |
| Zn | 84 | 83,1 | 84 | 87 | - | - |
| Y | 20 | 23,7 | 18 | 20 | - | - |
| Zr | 125 | 90,8 | 131 | 131 | - | - |
| Nb | - | 2,2 | - | 7 | - | - |
| Hf | 4 | 1,93 | 3,2 | 3,6 | - | - |
| Ta | - | - | - | - | - | - |
| Th | 4 | 2 | 4 | 4 | - | - |
| La | 21 | 9,98 | 20 | 19 | - | - |
| Ce | 46 | 25,2 | 44 | 43 | - | - |
| Nd | 24 | 14,6 | 24 | 22 | - | - |
| Sm | 4,75 | 2,91 | 4,36 | 4,4 | - | - |
| Eu | 1,4 | 1,38 | 1,36 | 1,35 | - | - |
| Gd | 4,34 | - | 4,01 | 3,98 | - | - |
| Tb | - | 0,7 | - | - | - | - |
| Dy | 3,99 | - | 3,64 | 3,86 | - | - |
| Ho | 0,75 | 0,9 | 0,71 | 0,77 | - | - |
| Er | 1,92 | - | 1,79 | 1,94 | - | - |
| Yb | 1,96 | 2,41 | 1,78 | 1,95 | - | - |
| Lu | 0,29 | 0,41 | 0,26 | 0,29 | - | - |

| | Antuco I | | | | | | |
|--------------|----------|----------|-------|----------|----------|----------|----------|
| | Qval * | Qval1 | Qval* | Qval1 | Qval1 | Qval1 | Qval1 |
| | H-114 | 250199-2 | H-103 | 250199-4 | 250199-3 | 250199-5 | 250199-1 |
| SiO2 (% p/p) | - | 58,1 | - | 59,63 | 63,05 | 63,12 | 64,4 |
| Ti (ppm) | - | 6655 | - | 6356 | 4557 | 4317 | 4377 |
| P | - | 1746 | - | 1615 | 1178 | 1178 | 1178 |
| K | - | 14113 | - | 14113 | 18927 | 19508 | 18844 |
| Rb | - | - | - | - | - | - | - |
| Cs | - | - | - | - | - | - | - |
| Sr | - | 442 | - | 430 | 340 | 345 | 305 |
| Ba | - | 473 | - | 380 | 430 | 483 | 510 |
| Ga | - | - | - | - | - | - | - |
| Pb | - | - | - | - | - | - | - |
| Sc | - | 19 | - | 18 | 13 | 13 | 12 |
| V | - | 85 | - | 71 | 27 | 25 | 30 |
| Cr | - | 2 | - | 2 | 2 | 12 | 2 |
| Co | - | 16 | - | 15 | 10 | 12 | 10 |
| Ni | - | 5 | - | 0 | 4 | 5 | 6 |
| Cu | - | 10 | - | 11 | 11 | 13 | 10 |
| Zn | - | 102 | - | 87 | 82 | 85 | 91 |
| Y | - | 33 | - | 32 | 33 | 35 | 33 |
| Zr | - | 167 | - | 173 | 170 | 240 | 206 |
| Nb | - | - | - | 8 | 7 | 6 | 7 |
| Hf | - | 4,6 | - | 4,8 | 5,8 | 6,3 | 5,9 |
| Ta | - | - | - | - | - | - | - |
| Th | - | 4 | - | 5 | 6 | 7 | 7 |
| La | - | 21 | - | 21 | 23 | 24 | 24 |
| Ce | - | 49 | - | 50 | 53 | 54 | 56 |
| Nd | - | 29 | - | 28 | 29 | 30 | 29 |
| Sm | - | 6,17 | - | 5,65 | 5,89 | 6,68 | 5,63 |
| Eu | - | 1,81 | - | 1,64 | 1,6 | 1,62 | 1,58 |
| Gd | - | 5,77 | - | 5,61 | 5,27 | 6,05 | 5,46 |
| Tb | - | - | - | - | - | - | - |
| Dy | - | 5,86 | - | 5,8 | 6,08 | 6,46 | 6,04 |
| Ho | - | 1,23 | - | 1,22 | 1,3 | 1,38 | 1,26 |
| Er | - | 3,62 | - | 3,48 | 3,74 | 3,94 | 3,64 |
| Yb | - | 3,59 | - | 3,54 | 3,7 | 4,06 | 3,67 |
| Lu | - | 0,55 | - | 0,53 | 0,57 | 0,61 | 0,57 |

| | Antuco I | | Antuco II | | | |
|--------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Qval1 | Qval5 | Qval3 | Qval2 | Qval4** | Qval1 |
| | 230199-1 | 010283-03 | 250199-11 | 211098-02 | 051177-07 | 310183-06 |
| SiO2 (% p/p) | 65,08 | 50,88 | 52,1 | 52,2 | 52,86 | 52,88 |
| Ti (ppm) | 4077 | 5876 | 6655 | 6595 | 5936 | 6476 |
| P | 1135 | 916 | 829 | 960 | 1004 | 960 |
| K | 22414 | 6345 | 5783 | 5863 | 5381 | 5977 |
| Rb | - | - | - | - | 17 | 16 |
| Cs | - | - | - | - | 0,99 | - |
| Sr | 330 | 478 | 525 | 490 | 538 | 548 |
| Ba | 570 | 233 | 196 | 220 | 216 | 211 |
| Ga | - | - | - | - | 18 | 20,1 |
| Pb | - | - | - | - | 4 | 8,4 |
| Sc | 8 | 23 | 27 | 27 | 25,48 | - |
| V | 292 | 210 | 212 | 225 | 185 | 198 |
| Cr | 2 | 150 | 36 | 51 | 119,2 | - |
| Co | 10 | 28 | 22 | 22 | 43,6 | - |
| Ni | 4 | 86 | 20 | 31 | 16 | 25 |
| Cu | 4 | 74 | 67 | 68 | - | - |
| Zn | 70 | 81 | 72 | 82 | 88 | 85,1 |
| Y | 21 | 19 | 19 | 19 | 17,1 | 20,1 |
| Zr | 194 | 96 | 95 | 88 | 81,6 | 92,4 |
| Nb | 8 | 6 | - | - | 2,3 | 2,1 |
| Hf | 4,5 | 1 | 2,9 | 2,4 | 1,7 | - |
| Ta | - | - | - | - | - | - |
| Th | 8 | 2 | 2 | 2 | 1,62 | - |
| La | 26 | 9 | 10 | 10 | 9,4 | - |
| Ce | 58 | 23 | 24 | 25 | 24,2 | - |
| Nd | 29 | 16 | 15 | 16 | 13,7 | - |
| Sm | 4,86 | 2,93 | 3,22 | 3,29 | 3,2 | - |
| Eu | 1,25 | 0,88 | 1,1 | 1,09 | 1,08 | - |
| Gd | 3,91 | 2,94 | 3,44 | 3,42 | - | - |
| Tb | - | - | - | - | 0,52 | - |
| Dy | 4,03 | 3,16 | 3,51 | 3,77 | - | - |
| Ho | 0,85 | 0,68 | 0,73 | 0,75 | 0,8 | - |
| Er | 2,39 | 1,76 | 1,95 | 1,99 | - | - |
| Yb | 2,45 | 1,7 | 1,9 | 2,04 | 1,81 | - |
| Lu | 0,37 | 0,27 | 0,29 | 0,3 | 0,31 | - |

| | Antuco II | | Centros volcánicos menores | | | |
|--------------|-----------|-----------|----------------------------|-----------|-----------|----------|
| | Qvall1 | Qvall1 | Qcvlh | Qcvlp** | Qcvnn | Qcvlh ** |
| | 211098-05 | 211098-06 | 310183-11 | 051177-03 | 230199-12 | 801 |
| SiO2 (% p/p) | 55,24 | 56,8 | 51,66 | 51,81 | 52,28 | 53,08 |
| Ti (ppm) | 9354 | 8874 | 6835 | 5636 | 6356 | 7075 |
| P | 1353 | 1266 | 873 | 916 | 786 | 1178 |
| K | 8995 | 9477 | 6505 | 5381 | 5381 | 6425 |
| Rb | - | - | - | 17 | - | 20 |
| Cs | - | - | - | 0,96 | - | 1,14 |
| Sr | 411 | 380 | 480 | 555 | 518 | 470 |
| Ba | 306 | 301 | 245 | 200 | 193 | 150 |
| Ga | - | - | - | 18,6 | - | 19,3 |
| Pb | - | - | - | 6 | - | 7,7 |
| Sc | 28 | 27 | 25 | 26,97 | 27 | 20,2 |
| V | 239 | 215 | 225 | - | 229 | - |
| Cr | 7 | 10 | 140 | 104,7 | 28 | 174 |
| Co | 22 | 18 | 24 | 35,5 | 20 | 19 |
| Ni | 10 | 11 | 48 | 100 | 20 | 69 |
| Cu | 91 | 91 | 78 | - | 55 | - |
| Zn | 126 | 97 | 74 | - | 77 | - |
| Y | 28 | 26 | 20 | 16,5 | 18 | 20,6 |
| Zr | 130 | 130 | 117 | - | 84 | - |
| Nb | 10 | 8 | 8 | - | - | - |
| Hf | 3,3 | 3 | 2 | 1,54 | 2,3 | 1,7 |
| Ta | - | - | - | 0,59 | - | 0,4 |
| Th | 3 | 3 | 2 | 1,59 | 2 | 2 |
| La | 14 | 14 | 10 | 8,8 | 10 | 6,7 |
| Ce | 36 | 36 | 24 | 21,9 | 25 | 18,8 |
| Nd | 23 | 22 | 17 | 12,8 | 15 | 10,3 |
| Sm | 4,98 | 5,03 | 3,6 | 2,66 | 3,37 | 2,49 |
| Eu | 1,6 | 1,57 | 1,09 | 1,06 | 1,19 | 1,01 |
| Gd | 5,48 | 5,43 | 3,55 | - | 3,2 | - |
| Tb | - | - | - | 0,53 | - | - |
| Dy | 5,26 | 5,16 | 3,92 | - | 3,54 | - |
| Ho | 1 | 1,04 | 0,78 | 0,7 | 0,71 | - |
| Er | 2,76 | 2,83 | 2 | - | - | 1,95 |
| Yb | 2,7 | 2,85 | 1,9 | 1,82 | 1,94 | 1,6 |
| Lu | 0,41 | 0,45 | 0,3 | 0,31 | 0,3 | 0,23 |