



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
Facultad de Ciencias Químicas  
Departamento Ciencias de la Tierra



**PETROGRAFÍA Y GEOQUÍMICA DE LA  
FORMACIÓN LA TERNERA (26,5° - 28,5° S),  
REGIÓN DE ATACAMA, CHILE.**

Memoria para optar al Título de Geólogo

**César Andrés Carrasco Concha**

**Profesora Patrocinante:** Dra. Verónica Laura Oliveros Clavijo  
**Profesores Comisión:** Dr. Oscar Enrique Figueroa Arriagada  
Dr. Alexey Alexandrovich Novoselov

CONCEPCIÓN, 2019



*A mis padres y hermanos  
y a mis amigos de la vida:  
Olga, Felipe, Mauricio, Angélica y Lucía.*

# ÍNDICE

Página

## RESUMEN

<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1 GENERALIDADES Y PROBLEMÁTICA EN CUESTIÓN</b> .....	1
<b>1.2 OBJETIVOS</b> .....	1
<b>1.1.1. Objetivo General</b> .....	1
<b>1.1.2. Objetivos Específicos</b> .....	2
<b>1.3 UBICACIÓN Y ACCESOS</b> .....	2
<b>1.4 GEOMORFOLOGÍA Y CLIMA</b> .....	4
<b>1.4.1 Geomorfología</b> .....	4
<b>1.4.2 Clima</b> .....	7
<b>1.5 METODOLOGÍA</b> .....	7
<b>1.5.1 Terreno</b> .....	7
<b>1.5.2 Desarrollo del trabajo</b> .....	7
1.5.2.1 Descripción petrográfica .....	8
1.5.2.2 Análisis químico .....	8
<b>1.6 TRABAJOS ANTERIORES</b> .....	8
<b>1.7 AGRADECIMIENTOS</b> .....	9
<b>2 MARCO GEOLÓGICO</b> .....	11
<b>2.1 GENERALIDADES</b> .....	11
<b>2.2 ROCAS METAMÓRFICAS</b> .....	11
<b>2.2.1 Formación Las Placetas</b> .....	11
<b>2.2.2 Milonitas La Estancilla</b> .....	12
<b>2.3 ROCAS INTRUSIVAS</b> .....	12
<b>2.3.1 Generalidades (Batolito Oriental)</b> .....	12
<b>2.3.2 Plutón La Estancilla</b> .....	13
<b>2.3.3 Plutón Pircas Coloradas</b> .....	13
<b>2.3.4 Plutón Montosa</b> .....	14
<b>2.3.5 Batolito El Hielo</b> .....	14
<b>2.3.6 Plutón Las Juntas</b> .....	15
<b>2.3.7 Plutón Noria y San Miguel</b> .....	15
<b>2.4 ROCAS ESTRATIFICADAS</b> .....	16
<b>2.4.1 Formación Chinchas</b> .....	16
<b>2.4.2 Formación Pantanoso</b> .....	16
<b>2.4.3 Estratos Las Represas (unidad informal)</b> .....	17
<b>2.4.4 Estratos Quebrada Las Chilcas</b> .....	17
<b>2.4.5 Formación Quebrada del Salitre</b> .....	18
<b>2.4.6 Formación La Ternera</b> .....	18
<b>2.4.7 Formación La Totora</b> .....	19
<b>2.4.8 Formación Lautaro</b> .....	20

2.4.9 Formación Lagunillas .....	21
2.5 ESTRUCTURAS .....	21
<b>3 MARCO TECTÓNICO .....</b>	<b>23</b>
<b>4 PETROGRAFÍA .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1 ROCAS VOLCÁNICAS .....</b>	<b>26</b>
4.1.1 Rocas volcánicas de composición básica .....	26
4.1.2 Rocas volcánicas de composición intermedia .....	27
4.1.2.1 Andesitas .....	27
4.1.3 Rocas volcánicas de composición ácida .....	29
<b>4.2 ROCAS VOLCANOCLÁSTICAS .....</b>	<b>29</b>
4.2.1 Rocas volcanoclásticas de grano medio .....	29
4.2.2 Rocas volcanoclásticas de grano fino .....	30
4.2.2.1 Tobas vítreas .....	30
4.2.2.2 Tobas cristalinas .....	31
4.2.2.3 Tobas líticas .....	33
<b>4.3 ROCAS SEDIMENTARIAS .....</b>	<b>33</b>
4.3.1 Rocas sedimentarias de grano medio .....	33
4.3.1.1 Areniscas .....	33
<b>5 GEOQUÍMICA .....</b>	<b>36</b>
<b>5.1 ALTERACIÓN .....</b>	<b>36</b>
5.1.1 Alteración según petrografía .....	36
5.1.2 Clasificación y alteración según geoquímica .....	37
<b>5.2 ELEMENTOS MAYORES .....</b>	<b>39</b>
5.2.1 Diagramas de clasificación .....	41
5.2.1.2 Diagramas Sílice vs Alkalís, y AFM para series subalcalinas y	
K <sub>2</sub> O vs SiO <sub>2</sub> .....	41
5.2.2 Diagramas de variación de elementos mayores .....	44
5.2.2.1 Diagrama Harker .....	44
<b>5.3 ELEMENTOS TRAZA .....</b>	<b>46</b>
5.3.1 Diagramas de variación de elementos traza .....	46
5.3.1.1 Diagrama Eu/Eu* vs SiO <sub>2</sub> (wt%) .....	46
5.3.1.2 Diagramas La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub> vs SiO <sub>2</sub> (wt%) y Sr/Y vs SiO <sub>2</sub> (wt%)	
(Ambos modificados de Profeta y otros, 2015) .....	47
5.3.2 Diagrama de tierras raras (REE) normalizado al condrito .....	49
5.3.3 Diagrama multielemento .....	51
5.3.3.1 Diagrama multielemento normalizado al manto primitivo .....	51
5.3.4 Diagramas de discriminación tectónica .....	54
5.3.4.1 Diagrama Th – Hf/3 – Ta para rocas basálticas .....	54
5.3.4.2 Diagrama La/10 – Y/15 – Nb/8 para rocas basálticas .....	55



<b>5.4 FORMACIÓN LA TERNERA Y OTRAS UNIDADES TRIÁSICAS .....</b>	<b>56</b>
<b>5.4.1 Comparación petrográfica entre Formación La Ternera y Formación Cerro Guanaco .....</b>	<b>56</b>
5.4.1.1 Basaltos .....	56
5.4.1.2 Andesitas .....	56
5.4.1.3 Lapillitas tobáceas .....	57
<b>5.4.2 Comparación geoquímica entre las formaciones, La Ternera, Cerro Guanaco, Quebrada del Salitre y La Totora .....</b>	<b>57</b>
5.4.2.1 Diagrama REE normalizado al condrito .....	58
5.4.2.2 Diagrama Multielemento normalizado al manto primitivo .....	58
<b>6 DISCUSIÓN .....</b>	<b>61</b>
<b>6.1 AMBIENTE GEOTECTÓNICO .....</b>	<b>61</b>
<b>6.2 FORMACIÓN LA TERNERA Y OTRAS UNIDADES TRIÁSICAS .....</b>	<b>65</b>
6.2.1 Petrografía Formación La Ternera y Formación Cerro Guanaco .....	65
6.2.2 Ambiente geotectónico Formación Cerro Guanaco, Quebrada del Salitre y La Totora .....	67
<b>7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>72</b>
<b>7.1 CONCLUSIONES .....</b>	<b>72</b>
<b>7.2 RECOMENDACIONES .....</b>	<b>73</b>
<b>8 REFERENCIAS .....</b>	<b>74</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1. 01 Mapa de ubicación y acceso del área de estudio .....	3
1. 02 Mapa geomorfológico del área de estudio .....	4
1. 03 Imagen satelital más perfiles topográficos de la zona de estudio .....	5
1. 04 Redes de drenaje presentes en el área de estudio.....	6
2. 01 Mapa morfoestructural con la ubicación de las muestras .....	11
2. 02 Figura esquemática con las cuencas de rift triásicas, entre ellas la cuenca La Ternera (Bell y Suarez, 1992) .....	22
4. 01 Ubicación de las muestras que serán descritas petrográficamente .....	25
4. 02 Fotomicrografía de A: Basalto de olivino y ortopiroxeno (CPV-15-271) y B: Basalto de olivino (CPV-15-284) .....	26
4. 03 Fotomicrografía A: Andesita basáltica (CPV-15-275) y B: Andesita (CPV-15-277) .....	28
4. 04 Fotomicrografía de Dacita, con textura vitrofídica y felsosfídica (CPV-15-287) .....	29
4. 05 Fotomicrografía de A: Toba vítrea (CPV-15-279) y B: Toba vítrea (CPV-15-285) .....	31
4. 06 Fotomicrografía A: Toba cristalina (CPV-15-280) y B: Toba cristalina (CPV-15-283) .....	32
4. 07 Fotomicrografía de Toba Lítica (CPV-15-276) .....	33
4. 08 Fotomicrografía de A: Litarenita volcánica (CPV-15-272) y B: Sublitarenita volcánica (CPV-15-282) .....	34
5. 01 Diagrama de clasificación para rocas volcánicas: TAS (Total Alkalís vs Silica) de Le Bas et al. (1986). B: Diagrama de clasificación para rocas volcánicas cuyas variables corresponden a Zr/TiO <sub>2</sub> vs Nb/Y, Diagrama de Winchester & Floyd (1977) .....	38
5. 02 Valores de la razón R (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / FeO) propuestos por Middlemost (1989), para rocas volcánicas de acuerdo con su clasificación en el diagrama TAS. Modificado de Rollinson (1993) .....	40
5. 03 Diagrama Sílice vs álcalis (Irvine y Baragar, 1971) .....	42
5. 04 Diagrama AFM (Irvine y Baragar, 1971) para clasificación de series subalcalinas .....	43
5. 05 Diagrama K <sub>2</sub> O vs SiO <sub>2</sub> , para la subdivisión de rocas subalcalinas (Peccerillo & Taylor, 1976) .....	44
5. 06 Diagramas Harker (variación de elementos mayores vs SiO <sub>2</sub> ) .....	45
5. 07 Diagrama Eu/Eu* vs SiO <sub>2</sub> (wt%) .....	47
5. 08 A: Diagrama Sr/Y vs SiO <sub>2</sub> (wt%) B: Diagrama LaN/YbN vs SiO <sub>2</sub> (wt%) Ambos con los espesores corticales según Profeta y otros (2015) .....	48
5. 09 Diagrama REE normalizado al condrito (Sun y McDonough, 1989), en el cual se incluyen todas las muestras .....	49

5.	10	Diagramas de REE normalizados al condrito (Sun y McDonough, 1989), para todas las muestras, ordenados de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, en relación al contenido creciente de SiO <sub>2</sub> (wt%) .....	50
5.	11	Diagrama Multielemento, normalizado al manto primitivo (Sun y McDonough, 1989), en el cual se incluyen todas las muestras .....	52
5.	12	Diagramas Multielemento normalizados al manto primitivo (Sun y McDonough, 1989), para todas las muestras, ordenados de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, en relación al contenido creciente de SiO <sub>2</sub> (wt%) .....	53
5.	13	Diagrama de discriminación tectónica Th – Hf/3 – Ta para rocas basálticas (Wood, 1980) .....	54
5.	14	Diagrama de discriminación tectónica La/10 – Y/15 – Nb/8 para rocas basálticas (Cabanis y Lecolle, 1989) .....	55
5.	15	Diagrama comparativo de REE normalizado al condrito, formaciones triásicas .....	59
5.	16	Diagrama comparativo Multielemento normalizado al manto primitivo para las formaciones triásicas .....	59
6.	01	A: Diagrama REE normalizado al condrito para A: composiciones promedio de rocas corticales y MORB (White, 2011) B: rocas de la Formación la Ternera .....	62
6.	02	Diagrama multielemento normalizado al manto primitivo para A: composiciones promedio de rocas corticales (gris) (White, 2011) y andesitas del arco de Banda (rojo) B: rocas en estudio .....	63
6.	03	Razones A: La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub> y B: Sr/Y; para rocas de La Formación la Ternera. Las líneas marrones indican el espesor cortical aproximado según la mayoría de las muestras .....	64
6.	04	Diagramas de discriminación tectónica A: La/10 – Y/15 – Nb/8 (Cabanis y Lecolle, 1989) B: Th – Hf/3 – Ta (Wood, 1980) .....	64
6.	05	A: Basalto de olivino y ortopiroxeno (CPV-15-271, Anexo I). B: Basalto de olivino y ortopiroxeno (CPV-14-164, Anexo II) .....	66
6.	06	A: Andesita (CPV-15-277, Anexo I) B: Andesita (CPV-14-167, Anexo II)...	66
6.	07	A: Lapillita tobácea (CPV-15-273, Anexo I) B: Lapillita tobácea (CPV-14-157, Anexo II) .....	67
6.	08	Diagrama comparativo de REE normalizado al Condrito, para las formaciones triásicas con los rangos de SiO <sub>2</sub> (wt%) para las muestras .....	69
6.	09	Diagramas de discriminación tectónica A: La/10 – Y/15 – Nb/8 (Cabanis y Lecolle, 1989) B: Th – Hf/3 – Ta (Wood, 1980), para las formaciones triásicas .....	70
6.	10	Razones A: La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub> y B: Sr/Y; para rocas de las formaciones triásicas .....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
5. 01.	Valores de R para las muestras según su clasificación petrográfica .....	40
5. 02.	Tabla comparativa para la clasificación de las 9 muestras, correspondientes a rocas volcánicas y volcanoclásticas .....	41
5. 03.	Concentraciones de elementos traza para el manto primitivo, propuestas por Sun y McDonough (1989) .....	51
6. 01.	Comparación petrográfica entre las formaciones La Ternera y Cerro Guanaco .....	68



## RESUMEN

En la Cordillera Frontal y la Cordillera de Domeyko entre los  $26,5^{\circ}$  -  $28,5^{\circ}$  S, aflora un conjunto de rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias, pertenecientes a la Formación La Ternera, la cual se encuentra dividida en dos miembros principales: uno inferior, sedimentario y otro superior, volcánico. El objetivo de la presente memoria será describir petrográfica y geoquímicamente la Formación La Ternera, con el fin de determinar el marco tectónico en el cual se extruyó el miembro volcánico, todo esto considerando la edad de la unidad, la cual según Espinoza y otros (en prep.) corresponde a 220 Ma, es decir Triásico Superior. Para las lavas de la Formación La Ternera, se reconocieron litologías como basaltos, andesitas basálticas, andesitas y dacitas, con texturas principalmente porfídicas y pilotaxíticas, y mineralogía de plagioclasa, olivino y ortopiroxeno, para las rocas más básicas, mientras que, las más ácidas presentan: anfíbol, biotita y vidrio, con desvitricación moderada a fuerte. Las rocas volcanoclásticas se componen por lapillitas tobáceas y tobas: líticas, cristalinas y vítreas; con texturas mayormente fragmentales y vitroclásticas. Finalmente, la componente sedimentaria de la formación se encuentra representada por areniscas: Litarenitas volcánicas y sublitarenitas.

Geoquímicamente, las rocas volcánicas y volcanoclásticas de la Formación La Ternera, se caracterizan por ser subalcalinas y pertenecer a la serie calcoalcalina. En relación con su comportamiento en los diagramas de variación (Harker), la mayoría de los elementos mayores muestran una tendencia lineal frente a la diferenciación, por ende, la evolución magmática de las rocas estaría determinada por la cristalización fraccionada. En los diagramas de variación prácticamente todas las muestras corresponden a rocas de arco o calcoalcalinas de zonas orogénicas, mientras que, los elementos traza muestran un enriquecimiento de elementos LILE (incompatibles) frente a los HFSE (compatibles), anomalías de Nb – Ta y bajas concentraciones de P, Ti y Sr (características típicas de zonas de subducción). Las LREE (Tierras raras livianas) se encuentran enriquecidas frente a las HREE (Tierras raras pesadas) y muestran una anomalía de Eu, que aparece y se acentúa en etapas finales de la diferenciación. Finalmente, las razones  $La_N/Y_N$  y  $Sr/Y$  descartan fraccionamiento de granate en la fuente y una corteza engrosada, entregando espesores corticales de 30 – 35 km.

La formación en estudio se comparó con otras unidades del Triásico superior como lo son: Cerro Guanaco (213 – 200 Ma), Quebrada del Salitre (232,9 Ma) y La Totorá (217 Ma). Cerro Guanaco muestra un comportamiento geoquímico prácticamente idéntico a La Ternera, a excepción de la anomalía de Eu la que se presenta desde etapas tempranas de la diferenciación. Quebrada del Salitre, en general presenta una geoquímica bastante similar a La Ternera, con diferencias en la anomalía de Eu (la cual comienza a expresarse en el rango 50 – 60  $SiO_2$  wt%) y muestras puntuales que caen en campos diferentes a los asociados a la subducción, en los diagramas de discriminación tectónica. En relación con, la Formación La Totorá, se condice bastante con el comportamiento de la formación en estudio y solo dista de este en una de sus muestras, la cual cae en el campo de rift intercontinental para uno de los diagramas de discriminación tectónica. Las razones  $La_N/Y_N$  y  $Sr/Y$  aplicadas para las 3 formaciones mencionadas reflejan un espesor cortical de 30 – 35 km.

En resumen, sobre la base de las evidencias petrográficas y geoquímicas, la Formación la Ternera se extruyó en un marco geotectónico de subducción asociado a una corteza continental adelgazada de 30 – 35 km y su evolución magmática estuvo supeditada a la cristalización fraccionada.

# **1 INTRODUCCIÓN**

## **1.1 GENERALIDADES Y PROBLEMÁTICA EN CUESTIÓN**

La Formación La Ternera se encuentra presente en la Precordillera Andina de Copiapó en la Región de Atacama entre los 26,5°-28,5° latitud S, en una franja NNE-SSW. El área en cuestión comprende un relieve muy irregular con alturas en su mayoría bordeando los 3000 m s.n.m. hasta 5000 m s.n.m. y se caracteriza por la abundancia de rocas intrusivas, principalmente del Paleozoico Tardío, las cuales conforman el basamento, así como también de grandes volúmenes de secuencias volcánicas y volcanosedimentarias del Triásico, como lo son: La Formación La Ternera, Formación Quebrada del Salitre y Formación La Totora, y finalmente secuencias volcanosedimentarias y sedimentarias del Jurásico correspondientes respectivamente a La Formación Lautaro y Formación Lagunillas principalmente.

El origen de la Formación La Ternera ha sido atribuido a un contexto de rifting desarrollado a finales del Triásico (Bell y Suárez, 1992; Blanco, 1996), el cual habría sido producto de una tectónica extensional o de rumbo asociada a un margen activo de placa (Bell y Suárez, 1992). Si bien existen publicaciones previas respecto a la formación en cuestión, como lo son: Brüggén (1950), quien la define y reconoce afloramientos, Bell y Suárez (1992, 1995) quienes establecen su origen y estratigrafía principalmente, y Blanco (1996) quien propone los ambientes de sedimentación de la formación, no existe basta información respecto de la petrología y petrografía del miembro volcánico y menos aún de su geoquímica.

Es a raíz de este hecho, es que surge la necesidad de estudiar las rocas de La Formación La Ternera, con la finalidad de entregar mayor información respecto a esta y así disminuir la falta de conocimiento que existe en torno a la secuencia. Con dicho propósito el presente trabajo comenzará con una caracterización petrográfica de las rocas, para luego continuar con un análisis geoquímico en base a elementos mayores y elementos traza, cuyo fin es establecer con mayor claridad el ambiente geotectónico preponderante en el momento en que las rocas de la formación fueron extruídas.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo General**

El objetivo general del estudio, es la identificación del marco tectónico dominante durante la extrusión del miembro volcánico de La Formación la Ternera, mediante geoquímica y petrografía de las rocas, en la Precordillera Andina de Copiapó entre los 27°-28° latitud S.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Dentro de los objetivos propuestos para lograr el objetivo general, se tiene:

- Caracterizar petrográficamente rocas volcánicas y volcanoclásticas de La Formación La Ternera.
- Caracterizar petrográficamente muestras de rocas sedimentarias de la secuencia en estudio.
- Analizar mediante geoquímica de elementos mayores rocas volcánicas y volcanoclásticas de la formación.
- Analizar mediante geoquímica de elementos traza muestras de rocas volcánicas y volcanoclásticas de la Formación la Ternera.

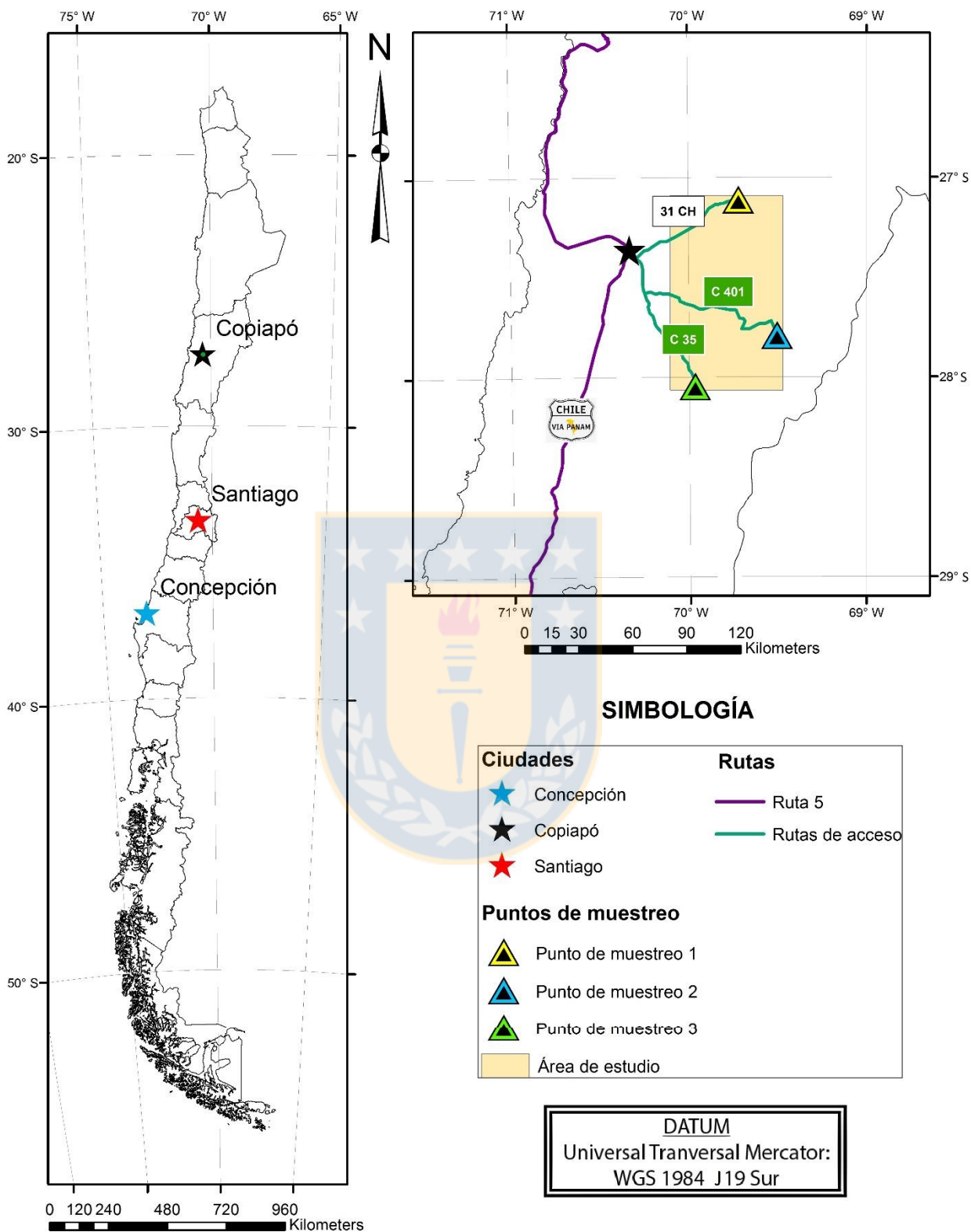
### 1.3 UBICACIÓN Y ACCESOS

El área de estudio se encuentra en la Precordillera Andina de Copiapó, Provincia de Copiapó, entre, los 27,11°-28,04 latitud S y 69,97°- 69,49° longitud W (Fig. 1.1).

En área se encuentra dividida en tres zonas de muestreo: una zona norte a 27,10° latitud S y 69,70° longitud W; una zona central a 27,70° latitud sur y 69,60°-69,40° longitud W, y una zona sur entre los 28,03°-28,04° latitud S y 69,97 longitud W.

Para acceder al área de estudio desde Concepción se deben recorrer 520 km hacia el norte, por la ruta 5 norte, hasta el área metropolitana de Santiago. Posteriormente se debe cubrir una distancia de 807 km por la ruta 5 norte hasta la Ciudad de Copiapó. Para acceder a la zona de muestreo norte desde la ciudad de Copiapó, se debe tomar la ruta 31Ch conocida como la Carretera del Inca y avanzar 76,8 km por esta misma hacia la localidad de La Puerta. El sector de la Guardia, correspondiente a la zona de muestreo central, se encuentra a 122 km desde la ciudad de Copiapó, siendo las rutas para seguir, la C-35 que sale desde la capital regional, luego virar al E por la ruta C-401, seguir por C-503 hasta la intersección con la ruta C-459, por la cual finalmente se llega al sector de La Guardia. Por último, para llegar a la zona de muestro sur, se debe seguir 94,9 km por la ruta C-35 hasta la zona de Resguardo de Copiapó. Es preciso mencionar que se puede llegar directo desde la zona de muestro sur a la central tomando la ruta C-459 hasta llega a la C-503.





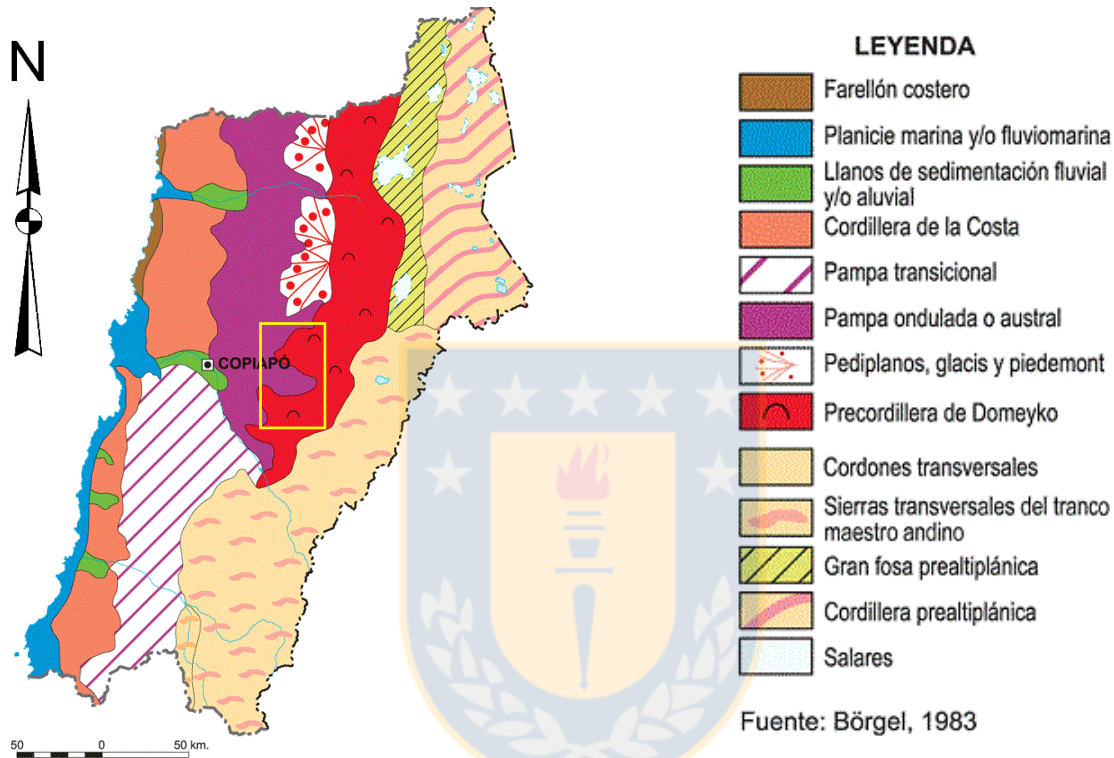
**Fig. 1.1** Se observa el mapa de ubicación y acceso al área de estudio. A la izquierda se muestra Chile continental y a la derecha un *zoom* a partir del cual se visualiza el área de estudio.



## 1.4 GEOMORFOLOGÍA Y CLIMA

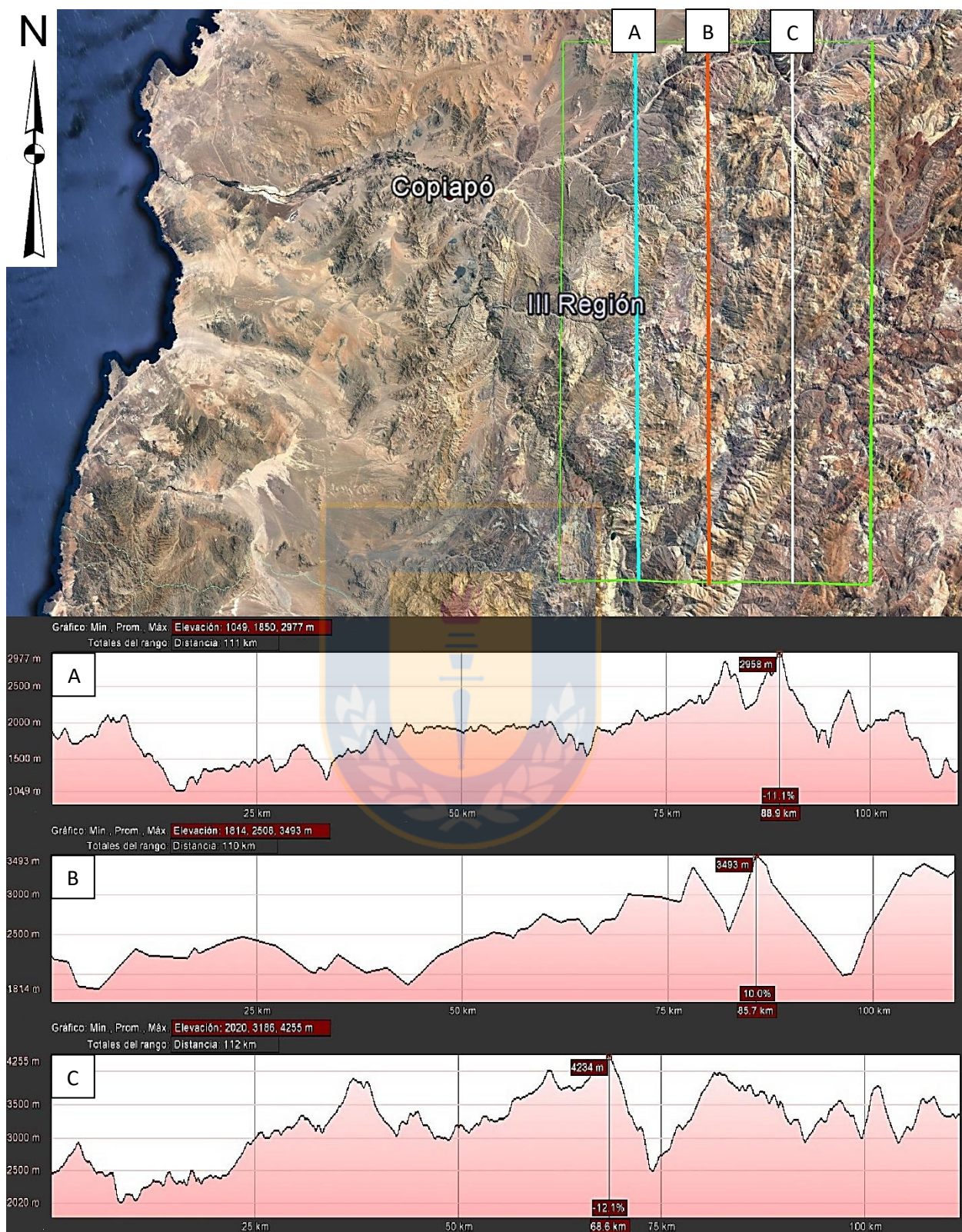
### 1.4.1 Geomorfología

El área de estudio se encuentra en la zona de la Pampa ondulada o austral y la Precordillera de Domeyko (Fig. 1.2), según la división geomorfológica realizada por Börgel (1983) para el territorio chileno.



**Fig. 1.2** Se observa en amarillo el área de estudio y las unidades geomorfológicas presentes.

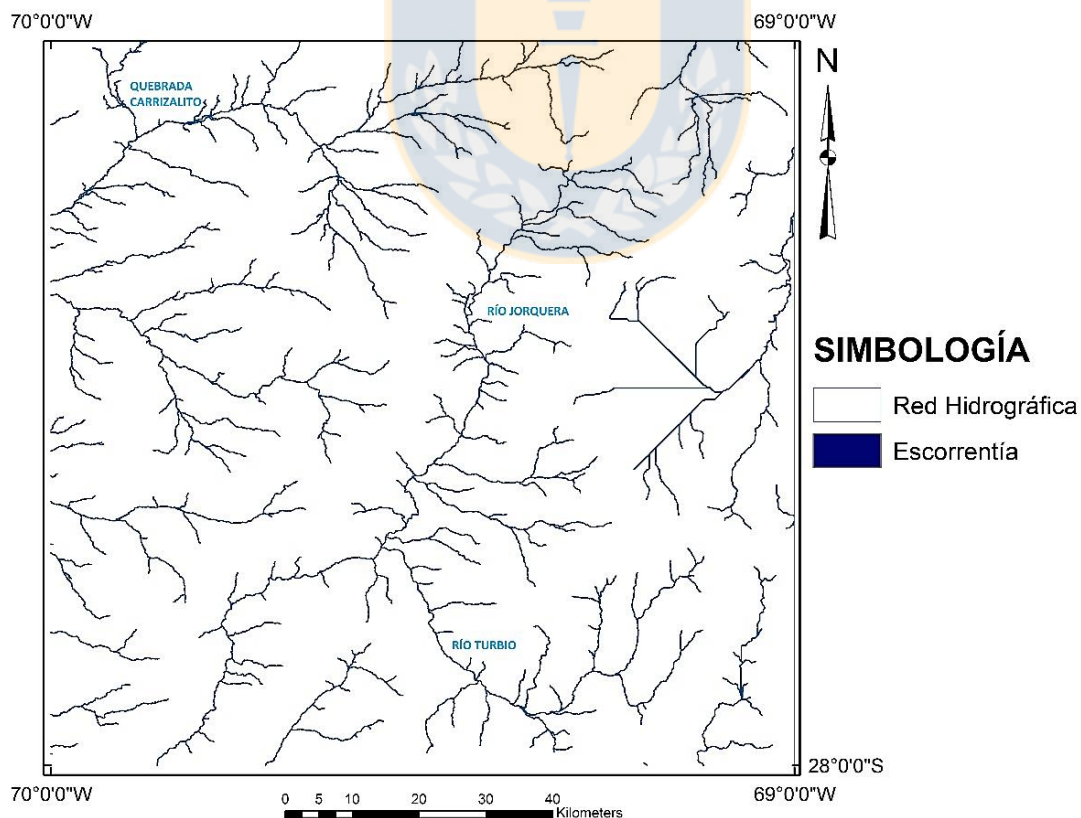
El relieve del área se caracteriza por ser abrupto, existiendo grandes cambios de altitud en distancias acotadas. Con el fin de evidenciar este hecho, se realizaron 3 perfiles N-S mediante el programa Google Earth, a los:  $69,95^\circ$ ,  $69,80^\circ$  y  $69,63^\circ$  longitud W (Fig. 1.3). De la figura se puede desprender que para el perfil A, la menor cota corresponde a 1049 m s.n.m., la mayor a 2977 m s.n.m y la cota promedio de 1850 m s.n.m. Para el perfil B la cota menor, mayor y promedio corresponden a: 1814, 3493 y 2508 m s.n.m respectivamente. Finalmente, para el perfil C, se tienen las cotas: 2020, 4255 y 3186 m s.n.m. correspondientes a la cota menor, mayor y promedio. De esto último se puede concluir que, las 3 cotas tomadas en consideración aumentan a medida que el perfil se ubica más hacia el E y además que la media de la diferencia de altitud entre las cotas mayores y las menores asciende a 2919 m, lo que en evidencia la variabilidad del relieve.



**Fig. 1.3** Se presenta el área de estudio en color verde y las secciones A, B y C, en color, celeste, naranja y blanco respectivamente, con sus perfiles asociados en la parte inferior de la imagen.



En lo que respecta a los cursos de aguas superficiales, el área comprende múltiples escorrentías tanto permanentes como temporales, dominando estas últimas debido al clima árido propio de la región. Los ríos que destacan dentro del área de estudio corresponden al Río Jorquera, Río Pulido y Río Turbio, mientras que, los que se encuentran adyacentes o interceptando en un espacio acotado a esta, son: el Río Copiapó y el Río Manflas. Es preciso mencionar que el Río Turbio es un afluente del Río Jorquera, que a su vez es afluente del Río Copiapó al igual que el Río Manflas. En la misma línea, existen morfologías que no constituyen ríos, no obstante, concentran cursos de agua intermitentes en período de lluvias abundantes, como lo es la Quebrada Carrizalito al N del área de estudio. Las características de la red de drenaje apuntan a una red del tipo dendrítica exorreica (Fig. 1.4), donde la forma arborescente indica que la conjunción de pequeños cursos de agua forma un curso mayor, el cual se presenta conectado con el océano. Este tipo de red hidrográfica se desarrolla cuando las rocas presentan una resistencia a la erosión uniforme y no ejercen control sobre la dirección del crecimiento del valle. Esta situación se crea al tratarse de rocas sedimentarias y volcánicas fuertemente estratificadas, donde las corrientes pueden cortar con igual facilidad en un lugar o en otro.



**Fig. 1.4** Se muestra la red de drenaje dendrítica presente en el área de estudio.

### **1.4.2 Clima**

Según Antonioletti y otros (1972), el área de estudio que comprende la pampa circundante a Copiapó tiene un tipo de clima desértico transicional, el cual tiende a localizarse en este tipo de relieves. El límite S de este clima es el Río Copiapó y sus principales características son, las elevadas temperaturas durante el día, ausencia de nubosidad y precipitaciones.

Para la Precordillera, Antonioletti reconoce un clima frío de montaña, el cual se localiza en la zona andina por sobre los 2000 m s.n.m. Donde las precipitaciones son más abundantes, dándose en forma de nieve o aguanieve en las altas cumbres. Esto permite el desarrollo de ríos de régimen de alimentación pluvionival, con cursos permanentes y carácter exorreico. La diferencia de temperatura entre el día y la noche es notoria.

## **1.5 METODOLOGÍA**

### **1.5.1 Terreno**

La campaña de terreno para el muestreo de la Formación La Ternera se realizó entre los días 10 y 15 de diciembre del año 2015. Esta primera etapa estuvo basada en los mapas geológicos del SERNAGEOMIN y se enmarca en el proyecto FONDECYT 1120715. El objetivo del terreno fue muestrear la Formación La Ternera para luego proceder a realizar un estudio petrográfico y geoquímico que se verá plasmado en el presente trabajo.

Para realizar este muestreo, se tuvieron ciertas consideraciones al momento de elegir las muestras, tales como: grado de alteración, cantidad a extraer según la finalidad (cortes transparentes, análisis químico o datación) y verificación mediante GPS de que la muestra cae dentro de los polígonos establecidos para la formación según los mapas utilizados.

Las localidades donde se muestreó la formación corresponden al valle del Río Pulido, Valle del Río Jorquera, sector de La Guardia y sector de La Puerta, principalmente.

### **1.5.2 Desarrollo del trabajo**

El desarrollo del presente estudio se basó en dos ejes principales, como lo son: la descripción petrográfica de las muestras y la construcción de diagramas en base a análisis químicos de, elementos mayores y elementos traza.

### 1.5.2.1 Descripción Petrográfica

Se realizó la descripción de 16 cortes transparentes de las muestras recolectadas durante la etapa de terreno. La descripción petrográfica, se llevó a cabo en un microscopio binocular de luz polarizada marca Zeiss, modelo Olympus TX41, con aumentos de 4X, 10X, 20X y 40X, facilitado por el Departamento Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción. La descripción consistió en la identificación y cuantificación de la mineralogía primaria y de alteración, además de las texturas relacionadas a esta mineralogía. Finalmente se procedió a su clasificación mediante los diagramas Streckeisen (1978), para rocas volcánicas; de Fisher (1966) y Schmid (1981), para la clasificación textural y composicional de las rocas volcanoclásticas; y de Nichols (1999) y Folk (1968), para la clasificación textural y composicional de las rocas sedimentarias.

### 1.5.2.2 Análisis Químico

De las 25 muestras tomadas en terreno, 9 fueron las elegidas para realizar los análisis químicos de elementos mayores y elementos traza. Dichos análisis fueron realizados en el laboratorio Actlabs, ubicado en Ontario, Canadá. El análisis de elementos mayores se llevó a cabo mediante FUS – ICP (Fusion – Inductively Coupled Plasma), mientras que los trazas, por medio de TD – MS (Thermal Desorption – Mass Spectrometry), FUS – ICP (Fusion – Inductively Coupled Plasma) y FUS – MS (Fusion – Mass Spectrometry).

## 1.6 TRABAJOS ANTERIORES

**Brüggen (1950)**, define la Formación La Ternera en el flanco noroccidental del Cerro La Ternera y la divide en dos miembros, uno inferior de naturaleza sedimentaria y uno superior, volcánico.

**Sepúlveda y Naranjo (1982)**, realizan el levantamiento e informe geológico de la Hoja Carrera Pinto, Región de Atacama. Escala 1:100000

**Bell y Suárez (1992)**, Definen el origen de la Formación La Ternera, su estratigrafía y las condiciones tectónicas en las que se habría depositado.

**Blanco (1996)**, Estudia las facies y ambientes depositacionales de la Formación La Ternera.

**Iriarte y otros (1999)**, realizan el levantamiento geológico de la Hoja La Guardia, Región de Atacama. Escala 1:100000.

**Mpodozis y otros (2012)**, realizan el levantamiento e informe geológico de la Hoja Laguna del Negro Francisco, Región de Atacama. Escala 1:100000.

**Salazar et al. (2013)**, confeccionan la Hoja El Tránsito – Lagunillas (entre los 28°30' – 29°00' latitud S, y los 70°30' – 70°00' longitud W), a escala 1: 100.000.

**Valin (2014)**, Estudia la Geoquímica de unidades del Triásico a Jurásico Inferior en el norte de Chile (28°00' – 29°30'), entre ellas rocas de la Formación La Totora.

**González (2015)**, Estudia la Petrografía y Geoquímica del Triásico Superior de la Alta Cordillera (28°45' – 30°02'S), Región de Coquimbo, Chile.

**Ciocca (2018)**, analiza la evolución geotectónica del margen suroccidental de Gondwana (19° - 40° S) del Carbonífero al Jurásico desde un punto de vista geoquímico. Incorpora rocas de la Formación Quebrada del Salitre.

**Celis (2018)**, estudia la Petrografía y Geoquímica de las rocas volcánicas y volcanoclásticas del Triásico Superior de la Cordillera de la Costa y la Cordillera de Domeyko, entre las coordenadas 23°50' – 26°10'), entre ellas rocas de la Formación Cerro Guanaco.

## 1.7 AGRADECIMIENTOS

En primera instancia agradecerle a la Profesora Verónica Oliveros por darme la oportunidad de realizar mi memoria de título en un área de la Geología que me apasiona, como lo es la Geoquímica y, además, por estar siempre dispuesta a resolver mis dudas y guiarme en la realización del presente trabajo.

Agradecer al departamento de Ciencias de la Tierra por facilitarme los instrumentos, específicamente el laboratorio de microscopía óptica para realizar el estudio de las láminas transparentes, en relación con esto último darle las gracias a Carlitos por siempre estar dispuesto a facilitarme las llaves de dicho laboratorio, siempre con la mayor de las disposiciones.

Continuando con los agradecimientos, no puedo dejar afuera a mis amigos, los que han sido fieles compañeros en el arduo camino que significa la universidad; entre ellos destaco a: Felipe, Angélica, Lucía, Olga, Mauricio e Isabella. A estos dos últimos les agradezco de forma especial. A Mauricio por esas largas noches acompañándome en el trabajo de mi tesis mientras él estudiaba para sus certámenes, noches que se hacían más cortas con su divertida compañía, mientras que, a Isabella,

por su gran ayuda y guía en la realización de la presente memoria, siempre fue una luz de conocimientos en los momentos en las que la oscuridad acechaba mi mente.

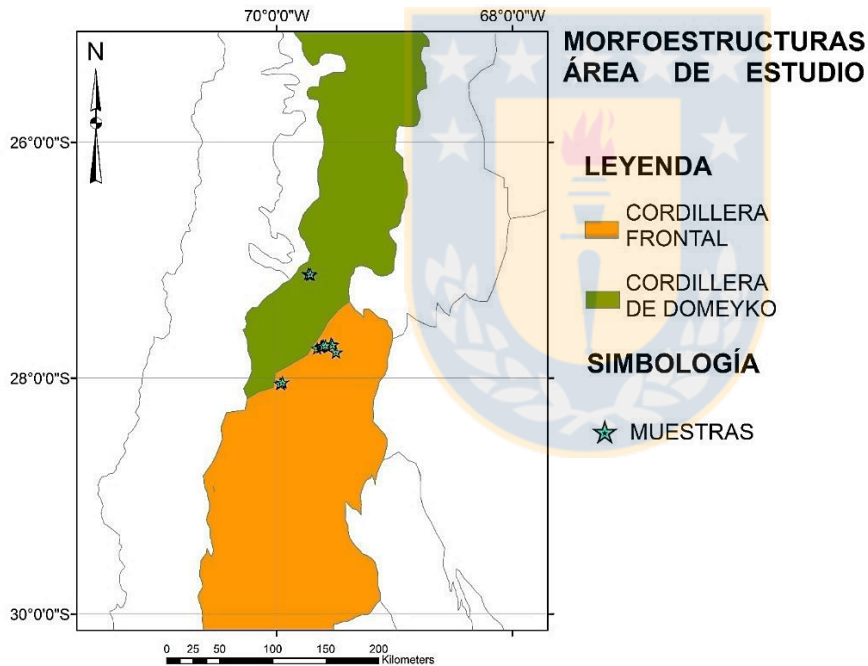
Para finalizar quiero darle mis más encarecidos agradecimientos a mi familia: Madre, Padre y hermanos. Especialmente, quiero agradecerle a mi madre, Hortensia, la cual ha sido un pilar fundamental en mi vida desde que yo era pequeño, la que a pesar de todas las dificultades que la vida nos puso por delante se encargó de hacer surgir a sus hijos a toda costa y sin la cual definitivamente no habría llegado a ser lo que soy.



## 2 MARCO GEOLÓGICO

### 2.1 GENERALIDADES

El área de estudio ( $27,11^{\circ}$ - $28,04$  latitud S), se encuentra dentro del territorio del margen continental, caracterizado por una subducción plana ( $27^{\circ}$ - $33^{\circ}$  latitud S) lo que conlleva a la ausencia de volcanismo actual. Morfoestructuralmente, el área se presenta dentro de la Cordillera de Domeyko y La Cordillera Frontal (Fig. 3.1). La primera corresponde a una cordillera central mientras que la otra, a una faja corrida y plegada de piel gruesa, donde la deformación tipo thick skinned se caracteriza, por la presencia de bloques de basamentos limitados por fallas inversas de alto ángulo, que generan sistemas de horst y graben. La deformación está controlada por el basamento y la cobertura volcanosedimentaria se adapta a él.



**Fig. 2.1** Se observan los puntos de muestro y como estos caen dentro las morfoestructuras señaladas.

### 2.2 ROCAS METAMÓRFICAS

#### 2.2.1 Formación Las Placetas

Definida por Reutter (1974 en Nasi y otros, 1990) en la región aledaña al río Valeriano. Consiste en grauvacas de color verde oscuro y esquistos, intruidos por granitos, junto con areniscas de color



verde con niveles carbonáticos intercalados. Constituida por una secuencia pelítico arenosa con bajo metamorfismo (Maksaev y otros, 1984 en Marín y Nullo, 1988), con más de 1000 m de espesor.

Marín y Nullo, en su trabajo consideran a la Formación Las Placetas, un conjunto de areniscas de grano fino, con intercalaciones de niveles pelíticos de color negro a violáceo, bien estratificadas.

Nasi y otros (1985 en Marín y Nullo, 1988) correlacionan esta unidad con la Formación Hurtado, ubicándola en el rango Devónico-Carbonífero sin embargo Tavera (1971 en Marín y Nullo, 1988) ubica a la formación en el Carbonífero Superior con base en restos fósiles como: *Lepidodendron peruvianus*, *Sigilaria sauli* y *Plagiozamites* sp.

La Formación Las Placetas, en base a la litología ha sido correlacionada, con las formaciones Hurtado y Chinchas, que afloran en la Alta Cordillera entre los 26°00' y los 31°00' latitud S.

### **2.2.2 Milonitas La Estancilla**

Asociadas al Plutón La Estancilla, Soffia (1989 en Iriarte y otros, 1999), las identifica como esquistos miloníticos que presentan una foliación penetrativa (N30°E/70°-80° NW). En estos esquistos se alternan bandas delgadas de cuarzo-feldespato, hornblenda-biotita y cuarzo-plagioclasa-muscovita. Entre estas bandas se identifican lentes de tonalitas que preservan la textura ígnea original.

Venas tonalíticas que son afectadas por la foliación, indican que la deformación ocurrió durante el emplazamiento del intrusivo.

La edad según una muestra datada mediante el método K-Ar en biotita, por Zentilli (1974 en Iriarte y otros, 1999), quedaría restringida al Pérmico Inferior-Medio ( $268 \pm 10$  Ma).

## **2.3 ROCAS INTRUSIVAS**

### **2.3.1 Generalidades (Batolito Oriental)**

La mayoría de las unidades intrusivas que se abordarán a continuación, se pueden considerar como parte de una superunidad correspondiente al Batolito Oriental (Sepúlveda y Naranjo, 1982). Algunas características respecto a las relaciones de contacto de este cuerpo intrusivo son las siguientes: las rocas de este batolito presentan una relación de intrusión, con contactos tajantes y

bien definidos, respecto a formaciones sedimentarias más antiguas como la Formación Pantanoso y la Formación Chinchas; el batolito infrayace en discordancia de erosión a conglomerados de la Formación La Ternera (Sepúlveda y Naranjo, 1982).

Respecto a la petrografía del Batolito Oriental, este comprende principalmente rocas del tipo monzogranito, hololeucocrático a leucocrático (Streckeisen, 1976 en Sepúlveda y Naranjo, 1982). El análisis modal (1200 puntos) de muestras provenientes de las nacientes de Quebrada Noria y del sector de las Represas, indica que son rocas de textura hipidiomórfica granular, compuestas por: cuarzo (25-23%) en cristales anhedrales de 0,2-2,5 mm; plagioclasa (32-26%) en cristales de 0,5-3 mm con zonación normal; ortoclasa (23-26%) anhedral de tamaño 0,3-4 mm, generalmente alterada a sericita y como accesorios (1%), generalmente , apatito, circón, rutilo y opacos. Es común también reconocer, en algunos casos, muscovita en cristales tabulares.

### **2.3.2 Plutón La Estancilla**

Asociado petrogenéticamente al Batolito Oriental, el Plutón La Estancilla corresponde a un intrusivo que aflora en el valle del río Jorquera (Soffia, 1989 en Iriarte y otros, 1999), presentando forma triangular elongada en dirección NNE, con 20 km de largo y 5 km de ancho (Iriarte y otros, 1999).

En lo que atañe a su petrografía, un tercio está conformado por tonalitas de hornblenda y biotita, mientras que los dos tercios más orientales del plutón, están constituidos por milonitas (abordadas en el subcapítulo de rocas metamórficas). Las tonalitas, son de grano grueso y color pardo verdoso, con presencia de inclusiones básicas, que muestran orientación sinmagmática de los máficos).

Presenta relación de contacto con la Formación La Ternera, a la cual infrayace en discordancia de erosión (Iriarte y otros, 1999).

La edad del Plutón se obtuvo a partir de una muestra datada mediante K-Ar en biotita, obteniéndose,  $268 \pm 10$  Ma (Zentilli, 1974 en Iriarte y otros, 1999).

### **2.3.3 Plutón Pircas Coloradas**

Relacionado petrogenéticamente al Batolito Oriental, el plutón se compone principalmente por monzogranitos hololeucocráticos de biotita, de color rosado pálido (70-75% SiO<sub>2</sub>) y por granodioritas de color gris pálido, de biotita y anfíbola, de grano medio a grueso, cortados por

diques micrograníticos, riolíticos y andesíticos (Iriarte y otros, 1999). Finalmente, compuesto por pórfidos monzograníticos (75-78% SiO<sub>2</sub>), de color rojizo, con “ojos” de cuarzo.

Presenta una relación de discordancia con lavas de la Formación La Ternera, las cuales lo cubren.

Dos dataciones de K-Ar en biotita de monzogranitos indicaron valores de 271±6 Ma y 269±6 Ma (Pérmico).

### **2.3.4 Plutón Montosa**

Al igual que los dos intrusivos anteriores, se encuentra espacial y temporalmente relacionado al Batolito Oriental. El Plutón Montosa se caracteriza por formar una franja NNE-SSW, de 80 km de largo por 10 km de ancho. Se extiende desde las nacientes del río Manflas por el sur, hasta el río Jorquera por el norte (Jensen 1976; Mpodozis y Kay, 1990 en Iriarte y otros, 1999).

Petrográficamente, el plutón está formado por granodioritas y granitos, de biotita y hornblenda, leucocráticos, de grano medio a grueso que, en la zona de Juntas de Montosa, pasan a dioritas y leucogabros de hornblenda y piroxeno, bandeados (texturas cumuladas) (Jensen, 1976 en Iriarte y otros, 1999).

Franjas de milonita son comunes en la parte oriental del plutón, asociadas a la falla Las Vizcachas-La Guardia.

Se presenta cubierto en discordancia por volcanitas de la Formación La Ternera, de igual forma que los dos cuerpos intrusivos vistos anteriormente.

Se obtuvieron dos edades mediante K-Ar en biotita: 263±6 Ma, en milonitas y 231±7 Ma, en granodiorita (Iriarte y otros, 1999).

### **2.3.5 Batolito El Hielo**

Complejo plutónico que aflora en la ladera occidental de la Sierra El Hielo. Está conformado preferentemente por monzogranitos hololeucocráticos de grano grueso, de color rosado pálido, con textura hipidiomórfica granular.

Geoquímicamente, los intrusivos corresponden a rocas ácidas (70-75%SiO<sub>2</sub>), calcoalcalinas, de alto a moderado potasio (3,3-4, % K<sub>2</sub>O) (Mpodozis y otros, 2012).

Se presenta intruyendo a las formaciones Pantanoso y Chinchas, formando con estas, parte del bloque de basamento (hort) de Sierra Varillar (Mercado, 1982 en Iriarte y otros, 1996).

Edades K-Ar en biotita reportadas por Muzzio (1980 en Mpodozis y otros, 2012) indicaron valores de  $252\pm 9$  Ma y  $257\pm 8$  Ma.

### **2.3.6 Plutón Las Juntas**

Intrusivo que aflora en la confluencia de los ríos Jorquera y Pulido, desde este lugar se extiende hacia el norte, como una franja de 10 km de largo por 1 km de ancho.

Está compuesto por monzogranitos de anfíbola y biotita, de grano grueso y color rosado a gris. En menor proporción presenta granodioritas de hornblenda.

Respecto a sus relaciones de contacto, se presenta cubierto por conglomerados basales de la Formación La Ternera.

Su edad no se presenta bien acotada, pues fue uno de los primeros plutones fechados en Chile en los años 60, mediante el método plomo-alfa, dando una edad de  $265\pm 30$  Ma (Levi y otros, 1963 en Iriarte y otros, 1999). Desde esa fecha no se disponen de dataciones radiométricas de mayor exactitud.

### **2.3.7 Plutón La Noria y San Miguel**

Cuerpos intrusivos de menor tamaño (1 - 35 km<sup>2</sup>), conformados por granodioritas de hornblenda y biotita, de grano medio a grueso, y en menor medida monzogranitos.

Hacia el oeste del Plutón La Noria, se desarrolla una franja de milonitas de hasta 3 km de ancho, franja que fue reactivada debido a la deformación presente durante el Terciario ( $57,7\pm 2,5$  Ma) (Falla La Noria-La Ternera).

Las edades obtenidas mediante K-Ar en biotita para estos plutones, corresponden a  $237\pm 6$  Ma, sin embargo, estas edades podrían corresponder a edades mínimas, asociadas a efectos termales dados por el emplazamiento de intrusivos eocenos, que se encuentran adyacentes al Plutón San Miguel (Iriarte y otros, 1996).

## 2.4 ROCAS ESTRATIFICADAS

### 2.4.1 Formación Chinchés

Definida por Mercado (1982 en Iriarte y otros, 1996), corresponde a una alternancia de lutitas y calizas. Se presenta como “roof pendants” en granotoides pérmicos (abordados en el subcapítulo anterior) y deformada como pliegues suaves a moderados con rumbos NS y NNE.

Litológicamente está conformada por areniscas verdes, cuarzo-feldespáticas, con alternancia de lutitas pizarrosas. Algunos niveles, presentan calizas oolíticas y estromatolíticas. También se observan escasos niveles de tobas de ceniza. Finalmente, los niveles lutíticos intercalados en toda la secuencia se presentan bien estratificados y con laminación fina.

En lo concerniente a las relaciones de contacto que presenta la Formación Chinchés; infrayace discordantemente a la Formación Pantanoso y se encuentra en contacto por intrusión con Batolito El Hielo.

Bell (1985 en Iriarte, 1996) define el ambiente depositacional de la formación y lo asocia a una cuenca lacustre tipo *pull apart*, identificando en Quebrada Chinchés, dientes y escamas de peces del género *Paleoniscoid*, los que podrían ser atribuidos al Carbonífero Inferior. Sin embargo, entre las Quebradas Las Ánimas e Infiernillos, se identificaron restos fósiles similares a los reconocidos en de Devónico de Argentina. En base a esto, la formación queda acotada al Devónico-Carbonífero Inferior.

### 2.4.2 Formación Pantanoso

Definida por Mercado (1982 en Iriarte y otros, 1996) en el Cerro Pantanoso, corresponde en términos generales a volcanitas riódacíticas e ignimbritas riolíticas.

Petrográficamente las rocas de esta formación se identificaron como riódacíticas porfíricas, con fenocristales de cuarzo embahados y plagioclasas de hasta 7 mm, en una masa fundamental afanítica, de color oscuro, constituida por microlitos de feldespato y vidrio desvitrificado.

Respecto a sus relaciones de contacto, la formación cubre discordantemente a la Formación Chinchés, lo que a su vez ayuda a acotar la edad máxima de la secuencia. En la misma línea, la edad mínima se puede obtener a través de la relación que presenta con Estratos Las Represas

(Pérmico Inferior), a la cual infrayace en discordancia. De este modo es posible concluir que la formación se depositó durante el Carbonífero.

Las condiciones de depositación, no están del todo claras, sólo se sabe que las escasas intercalaciones de ignimbritas indicarían un ambiente subaéreo.

#### **2.4.3 Estratos Las Represas (Unidad Informal)**

Sepúlveda y Naranjo (1982) estudian la secuencia e identifican, rocas sedimentarias con presencia de restos fósiles. Su localidad tipo corresponde a Quebrada Las Represas, lugar en la que se presenta plegada.

La formación se da como una franja NNE-SSW, con unos 6 km de largo y 1 km de ancho. La potencia se estima en 300 m, estando los primeros 150 m caracterizados por la presencia de conglomerados, de colores claros, en capas de 1 m con intercalaciones centimétricas de calizas grises. Dichos conglomerados están constituidos por clastos bien redondeados de 1-20 cm de diámetro, de composición riódacítica y granítica, en una matriz cuarzo-feldespática. Ahora, las intercalaciones centimétricas de caliza, corresponden a biomicritas muy coquinoideas, que incluyen clastos riódacíticos, redondeados de hasta 2 cm. Por otra parte, la parte superior de la secuencia presenta, areniscas feldespáticas, en estratos de menos de 1 m de potencia, con laminación y estructuras de estratificación convoluta. Estas areniscas se interestratifican con niveles de lutitas calcáreas de color gris oscuro.

Respecto a sus relaciones de contacto, la secuencia se apoya con discordancia de erosión sobre la Formación Pantanoso y su techo corresponde a los conglomerados y lavas de la Formación La Ternera, del Triásico, dispuestos sobre ella con discordancia angular.

La edad queda acotada al Pérmico Inferior gracias a restos fósiles recolectados, correspondientes a amonóideos. Esto confirma la edad otorgada por Naranjo y Sepúlveda (1980 en Sepúlveda y Naranjo, 1982)

#### **2.4.4 Estratos de Quebrada Las Chilcas**

Definidos por Sepúlveda y Naranjo (1982 en Iriarte y otros, 1996), corresponden a más de 1000 m de paraconglomerados rojos, gruesos, pobremente seleccionados, con intercalaciones de areniscas. La naturaleza de los clastos se asocia a fragmentos de riolitas, granitos leucocráticos y granos de

cuarzo y feldespato. Esto último deja en evidencia la erosión, de los intrusivos paleozoicos y de las formaciones volcano-sedimentarias.

La depositación de Estratos Quebrada Las Chilcas habría ocurrido en un ambiente de río trezado en un contexto climático semiárido. Esto a partir de la presencia de estratificación cruzada, grietas de desecamiento y paleocanales.

Finalmente, la edad queda acotada al Pérmico Inferior debido a una relación de transición concordante y gradual sobre calizas del Carbonífero-Pérmico Inferior (Mpodosis y Allmendinger, 1992 en Iriarte, 1996).

#### **2.4.5 Formación Quebrada del Salitre**

Definida por Tomlinson (1999) aflora al norte de los 26,3° latitud S, en la Hoja Potrerillos como una franja NNE-SSW. Se caracteriza por presentar rocas volcano-sedimentarias de edad Triásico Superior-Jurásico Inferior. Se compone por 4 grupos litológicos:

- Lavas y brechas basálticas.
- Areniscas, conglomerados y calizas marinas.
- Domos y lavas riolíticas macizas, afaníticas, de color pardo grisáceo con estructuras de flujo
- Brechas riolíticas asociadas a domos.

En relación con el ambiente en el que se desarrolló la formación, Bell y Suárez (1992), lo consideran dentro de un contexto de rifting continental, donde la depositación ocurrió dentro de la cuenca El Profeta, ubicada justo al norte de la cuenca La Ternera (sobre la cual se depositó la formación en estudio). Estos autores asocian esta etapa de rift como producto de una tectónica extensional o de rumbo asociada a un margen activo de placa. Cornejo y otros (2009) obtuvieron una edad de  $232,9 \pm 0,2$  Ma de un domo riolítico que intruye a una secuencia de lavas máficas del miembro inferior volcánico - sedimentario definido por ellos mismos.

#### **2.4.6 Formación La Ternera**

Definida por Brügggen (1950 en Sepúlveda y Naranjo, 1982), en el flanco noroccidental del Cerro La Ternera. La formación se divide en dos miembros, uno inferior de naturaleza sedimentaria y uno superior, volcánico.

El miembro inferior se caracteriza por areniscas arcosas de grano gruesa y color pardo rojizo, en capas que van desde los 15 cm a 1 m de espesor; areniscas cuarcíferas, de colores claros y con presencia de restos de troncos fósiles indeterminados; conglomerados en capas de hasta 5 m de potencia, de colores pardo-rojizos y blancos, con clastos bien redondeados de composición riolítica, granítica y cuarzo lechoso.

Petrográficamente las rocas corresponden a, sublitarenitas, subfelarenita, litarenita feldespática, sublitarenita y litarudita. Sus constituyentes principales son: cuarzo, líticos (de granito y riolita) y granos minerales de plagioclasa y ortoclasa.

El miembro superior, volcánico, corresponde a lavas andesíticas amigdaloidales, con fenocristales de plagioclasas y una masa fundamental holocristalina a hialopilitica. También se presentan niveles de menor espesor de tobas de cristales.

Las relaciones de contacto de la Formación La Ternera son abundantes. Cubre a cuerpos intrusivos como: Plutón La Estancilla; Plutón Montosa; Plutón Las Juntas y Plutón Pircas Coloradas, en discordancia. Se deposita en discordancia angular sobre Estratos Las Represas e infrayace concordantemente a las formaciones Lautaro y Lagunillas (Iriarte y otros, 1999).

Se correlaciona litoestratigráficamente con las formaciones San Felix y La Totorá (Charrier, 1979 en Sepúlveda y Naranjo, 1982). La depositación de la formación se habría dado en un ambiente transicional, marino continental, ocasionalmente de baja energía (Sepúlveda y Naranjo, 1982) dentro de un contexto de rift. Esto último evidenciado por depósitos sedimentarios con características syn-rift (Bell y Suárez, 1992; Blanco, 1996). Suárez y Bell (1992) asocian este rifting continental, como producto de una tectónica extensional o de rumbo asociada a un margen activo de placa.

Sepúlveda y Naranjo (1982) con base en material paleobotánico como: *Cladophlebis mendozaensis*, *Dictyphyllum tenuifolium* y *Pseudoctenis* aff. *falconeriana*, le otorgan una edad acotada al Triásico, mientras que Espinoza y otros (en prep.) mediante el método LA-ICP-MS en circón, obtiene una edad de 220 Ma (Triásico Superior).

#### **2.4.7 Formación La Totorá**

Definida por Reutter (1974 en Salazar y otros, 2013) en Quebrada La Totorá, como una secuencia volcánica conformada por lavas, brechas volcánicas y rocas sedimentarias de origen volcánico.



En su localidad tipo, litológicamente comprende 700 m de coladas andesíticas y andesítico-basálticas de color rojo, violeta y negro, con texturas porfídicas y ocasionalmente amigdaloidales. Se presentan potentes estratos brechosos bien desarrollados, con intercalaciones correspondientes a, arcosas líticas rojas, tobas de lapilli líticas y tobas de ceniza.

Presenta relaciones de contacto con granitoides y lavas del Carbonífero Superior-Triásico Medio, sobre los cuales se deposita. Se superpone con un contacto gradacional sobre la Formación San Felix y está cubierta en discordancia por las formaciones Lautaro y Algarrobal (Salazar y otros, 2013).

Según el método U-Pb en circón, Salazar y otros (2013) obtuvieron una edad entre  $210,4 \pm 2,9$  –  $217,9 \pm 1,4$  Ma. Las rocas volcánicas que componen esta unidad han sido interpretadas como el relleno de una depresión volcanotectónica continental controlada por una serie de fallas normales NS a NNE (Salazar, 2012 en Salazar y otros, 2013).

#### **2.4.8 Formación Lautaro**

Definida por Segerstrom (1959 en Salazar y otros, 2013) en el Tranque Lautaro (Localidad Tipo), Valle del río Copiapó.

Litológicamente se presenta en dos miembros (Jensen, 1976 en Salazar y otros, 2013). El miembro inferior llamado Miembro Manflas, presenta rocas carbonatadas de color pardo amarillento, dominando las calcilitas. Mientras que en el miembro superior denominado Quebrada de la Iglesia, predominan las areniscas carbonáticas de color rojo.

Se presenta en leve discordancia sobre la Formación La Totorá e infrayace en discordancia angular a la Formación Algarrobal (Salazar y otros, 2013). Además, cubre en forma concordante a la Formación La Ternera (Iriarte y otros, 1999).

La edad de la formación queda acotada al Sinemuriano Superior-Bajociano (199,3 Ma. – 170,3 Ma.), en base a estudios paleontológicos realizados por von Hillebrandt (1973 y 1976 en Salazar y otros, 2013). Estos estudios asignaron una edad Sinemuriano Superior-Toarciano Inferior, para el Miembro Manflas y Toarciano Superior-Bajociano, para el Miembro Quebrada de la Iglesia.

Respecto a la condición de depositación, estas se relacionan a una plataforma carbonatada marina (von Hillebrandt, 1973 en Salazar y otros, 2013).

### **2.4.9 Formación Lagunillas**

Definida por Jensen (1976 en Iriarte, 1999), corresponde a una secuencia de rocas sedimentarias silicilásticas y volcánicas, con un espesor aproximado de 1000 metros.

Litológicamente se divide en dos miembros. El Miembro Cocámbico (inferior), presenta un espesor aproximado de 600 m, dentro de los cuales predominan conglomerados rojos y brechas conglomerádicas de grano fino, además de areniscas rojas arcósico-cuarcíferas. Por otra parte, el Miembro Peñasco Largo (superior), con una potencia estimada de hasta 500 m, presenta coladas de lava andesíticas a andesito-basálticas con textura porfídica (Iriarte y otros, 1999).

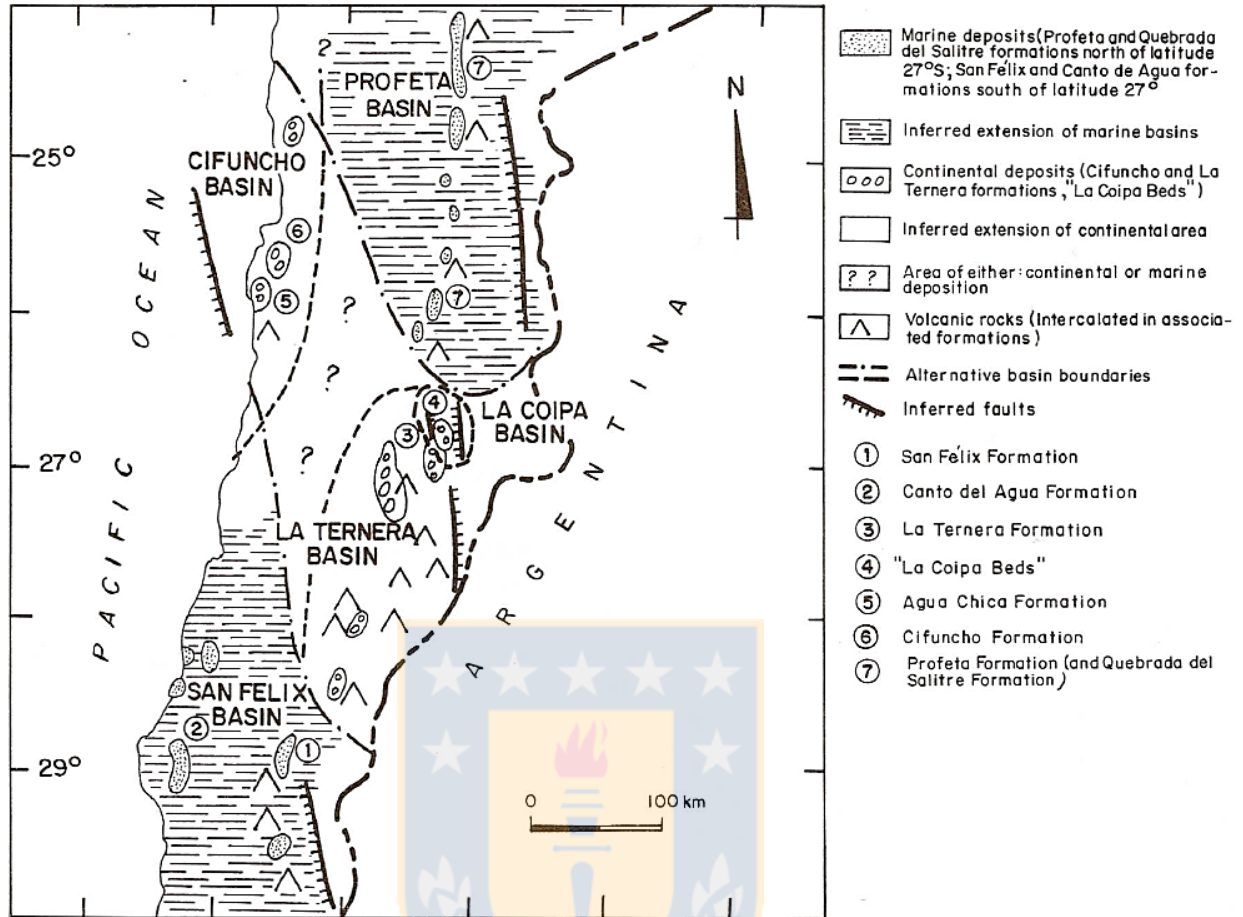
Se presenta concordante sobre la Formación Lautaro y sobre la Formación La Ternera e infrayace en concordancia a la Formación Quebrada Monardes (Jurásico Superior- Cretácico Inferior). Son estas relaciones de contacto las que permiten acotar su edad al Jurásico Medio-Jurásico Superior.

Según Jensen (1976 en Iriarte y otros, 1999) el ambiente depositacional de la formación correspondería a uno transicional que evoluciona a uno marino-continental (facies shabka-litoral).

## **2.5 ESTRUCTURAS**

Entre los 27° y 28° latitud S la evolución de las estructuras según Iriarte (1996 y 1999), se caracteriza por diversos eventos de deformación sobreimpuestos. El primero y de mayor edad, dio origen a las Milonitas La Estancilla y a las milonitas, asociadas al Plutón San Miguel y al Plutón Montosa, evento posiblemente asociado a una deformación dúctil durante el Pérmico (Jensen, 1976; Soffia, 1989 en Iriarte y otros, 1999). Ahora durante el Triásico las rápidas variaciones de facies y abruptos cambios de espesor que caracterizan a la Formación La Ternera indicarían un desarrollo dentro de una cuenca de rift (Charrier, 1979 e Iriarte, 1997 en Iriarte y otros, 1999), lo que se condice con lo expresa por Bell y Suárez (1992) para la misma formación (Fig. 2.2). Finalmente, para el Jurásico, formaciones como Lautaro y Lagunillas fueron depositadas en cuencas de trasarco probablemente heredadas de las cuencas de rift triásicas.

Las estructuras andinas desarrolladas entre los 27°-28° latitud S, para la zona de estudio, corresponden a fallas inversas de rumbo NNE de trazas kilométricas 40-100 km (Jensen, 1976; Jensen y Vicente, 1976; Soffia, 1989 en Iriarte y otros, 1999). Una de estas fallas corresponde a la falla La Ternera, inversa, de vergencia oeste, de medio a bajo ángulo y que representaría una de las fallas mayores, del extremo meridional del Sistema de Fallas de Domeyko. De la misma forma,



**Fig. 2.2** Se observan las cuencas de rift triásicas, entre ellas la cuenca La Ternera, dentro de la cual se deposita la formación homónima. (Bell y Suárez, 1992). Estas cuencas sentarán la base para el desarrollo de las cuencas de trasarco que se generarán durante el Jurásico.

más hacia el E, fallas inversas subparalelas de alto ángulo y vergencias opuestas, alzan bloques de basamento paleozoico y triásico, deformando suavemente la cobertura volcano-sedimentaria (Jensen, 1976 en Iriarte y otros, 1999).

### 3 MARCO TECTÓNICO

Durante el Paleozoico Tardío, la dinámica del margen continental de la Proto -Sudamerica se centró principalmente en la acreción de terrenos alóctonos (Ramos, 1988) y en un vasto magmatismo asociado a un pick compresivo, consecuencia de una fuerte migración del polo sur (Vilas y Valencio, 1978 en Charrier y otros, 2007), y por ende una subducción bien desarrollada durante el Carbonífero –Pérmico, esto último dentro del contexto del ciclo Gondwánico. Este ciclo se caracterizó por la generación de un prisma acrecional en la Cordillera de la Costa, un antearco y un arco ubicado en la Alta Cordillera. Los grandes volúmenes de magmas originados durante este período poseen una señal tanto litosférica como cortical, resultado de la asimilación de material cortical a partir de masas fundidas derivadas del manto (Lucassen y otros, 1999).

Durante el Pérmico, la conjunción de diferentes procesos tectónicos como lo son: la acreción de un terreno alóctono exótico, conocido como Terreno X (Mpodozis y Kay, 1992), la separación del slab (*slab break off*) y posterior fin de la subducción, además de una transpresión dextral consecuencia de la convergencia oblicua NNW de la Placa paleo-Pacífica bajo la Sudamericana (Kleiman y Japas 2009); habría sido el motor de la Orogenia San Rafael, la cual marca la etapa final del ciclo Gondwánico y es la principal responsable de la deformación, de las secuencias previamente depositadas en el lado chileno y también de la deformación generada hacia el antepaís argentino.

Luego de la separación del slab como un evento clave que marca el fin de la subducción y por ende el comienzo de la fase post-gondwánica, el ascenso de la astenósfera puso haber sido el origen de la extensa fusión cortical que se desarrolló desde el Pérmico Tardío al Triásico Medio. Esta etapa de extensión y rifting continental, al N de los 31° latitud S en el lado chileno, y al N de los 40° latitud S en el lado argentino (Cordillera Frontal, Bloque San Rafael y Cuenca de Neuquén), se encuentra fielmente reflejada por extensos afloramientos y secuencias de volcanismo desde basáltico a ácido, conocido como el Grupo Choyoi. En lo que respecta a las fuentes del magmatismo Choyoi, datos geoquímicos y petrológicos reflejan una fusión con importante contaminación cortical o lisa y llanamente una fusión cortical, como el principal origen de los magmas ácidos a intermedios (Martinez, 2004). Si bien desde un principio, la actividad magmática se encuentra influenciada por una importante señal cortical, dentro un régimen extensional preponderante, hacia el final de la actividad magmática Choyoi, magmas de alta temperatura,

anhidros y con una señal de intraplaca, alcanzaron niveles superficiales, momento que marca el inicio, del rifting continental y de la participación de la litósfera como un agente protagónico dentro del proceso de extensión (Llambías y otros, 2003; Martínez, 2004).

En relación al rifting continental, este pudo haber ocurrido en dos etapas, separadas entre sí por un magmatismo de composición ácida, reflejado por la depositación de secuencias volcánicas y volcanoclásticas, asociadas al pulso volcánico La Totorá-Pichidanguí (Charrier y otros, 2007). La primera etapa de rifting habría ocurrido durante el Pérmico Tardío-Anísico Tardío, dentro de la cual se habría generado la cuenca San Félix, la que a su vez fue rellena por la formación homónima, presente entre los 28,5°-29° latitud S y que se encuentra en inconformidad sobre unidades paleozoicas. La segunda etapa de rifting se habría desarrollado durante el Nórico-Sinemuriano, depositándose en este período la Formación La Ternera dentro la cuenca de rift Profeta-La Ternera. Respecto a esta última, Bell y Suárez (1992) sostienen que La Ternera se da en un contexto de rift, debido a la presencia de depósitos sedimentarios con características syn-rift y que este rift, habría sido producto de tectonismo extensional o de rumbo asociado a subducción en un margen activo de placa. Es partir de esta sentencia es que se puede postular que, al momento de la depositación de La Ternera, los procesos de subducción se comenzaron a reanudar.

Con la reanudación de los procesos de subducción, en el margen sudamericano durante el Jurásico Temprano, se da inicio al Ciclo Andino, el cual se extiende hasta el presente. Este ciclo ha sido dividido en dos grandes etapas según el régimen tectónico dominante. La primera, se extiende desde el Jurásico Inferior hasta el Cretácico Inferior. Se encuentra caracterizada por una tectónica extensional relacionada a una subducción tipo mariana y, por el desarrollo de un arco magmático en la Cordillera de la Costa, paralelo al margen occidental de Gondwana (Formación La Negra) y cuencas de trasarco al lado E (Charrier, 2007), correspondientes a la Cuenca de Tarapacá y Cuenca Abortada de Chile Central (Mpodosis y Ramos, 1989).

En contraste a la etapa anterior, la segunda etapa se enmarca dentro de una tectónica compresiva asociada a una subducción tipo chilena y se extiende desde el Cretácico Superior (donde la Fase Tectónica Peruana haría cambiar las condiciones tectónicas preponderantes hasta ese momento) hasta el reciente. Ocurre la migración progresiva del arco magmático hacia el E, hasta la posición en la que se encuentra en la actualidad y además se produce la inversión de las cuencas de trasarco a cuencas de antepaís (Charrier, 2007).



## 4 PETROGRAFÍA

A grandes rasgos los afloramientos de La Formación la Ternera se caracterizan por presentar capas buzantes, con niveles resistentes y otros lábiles en relación con la erosión, estos últimos generan tramos cubiertos en los cerros y material que cae a las quebradas en forma de abanicos aluviales de diversos tamaños. Las tonalidades de los afloramientos varían según el tipo de roca y el grado de alteración, no obstante, se identifican principalmente tonos, pardos claros, pardos oscuros, verdosos, rojizos y grises. En la figura 4.1 se observa la erosión diferencial propia de los afloramientos de la formación en estudio.



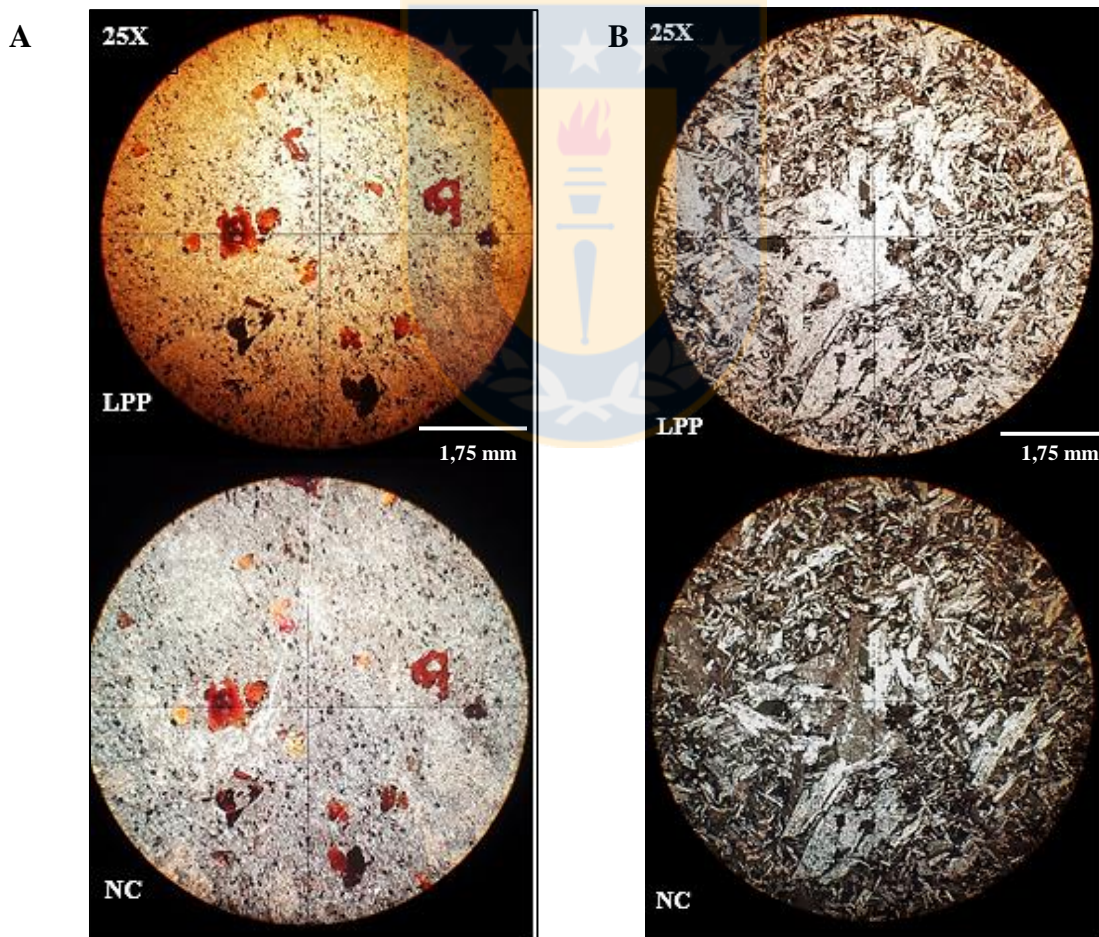
**Fig. 4.1** Afloramiento en el Río Jorquera. Coordenadas 6 J 6930755 N / 435509 E.

Las muestras que se describirán a continuación corresponden a rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias, todas correspondientes a la Formación La Ternera, ubicada en la Región de Atacama, al E de la ciudad de Copiapó, en localidades como: Río Pulido, Río Jorquera, Río Turbio, Quebrada el Carbón e intersección Quebrada Paipote con San Andrés. A cada una de las muestras, se les realizó una descripción bajo microscopio y una ficha (Anexo I, Descripción Petrográfica), en la cual se incluyen fotomicrografías, mineralogía primaria y de alteración, textura, etc.

## 4.1 ROCAS VOLCÁNICAS

### 4.1.1 Rocas volcánicas de composición básica

Las muestras que se ajustan dentro de esta clasificación son las, CPV-15-271 y CPV-15-284 (Anexo I, Descripción Petrográfica), las cuales corresponden a un basalto de olivino y ortopiroxeno (Fig. 4.2.A), y un basalto de olivino (Fig. 4.2.B), respectivamente. La primera posee una textura porfídica pilotaxítica e intergranular, donde los fenocristales se encuentran totalmente compuestos por olivino anhedral (13%) fuertemente alterado a iddingsita. La masa fundamental presenta, microlitos de plagioclasa euhedrales (34%) notoriamente orientados, con alteración a arcilla y epidota; ortopiroxeno (18%), presente entre los cristales de plagioclasas, fuertemente fracturado y alterado a clorita; y cantidades menores de, olivino (5%) alterado a iddingsita y opacos (10%). Los minerales de alteración alcanzan un 20%.



**Fig. 4.2** Fotomicrografía de A: Basalto de olivino y ortopiroxeno (CPV-15-271) y B: Basalto de olivino (CPV-15-284).

El basalto de olivino presenta una textura porfídica localmente glomeroporfídica e intergranular. Los fenocristales están compuestos exclusivamente por cristales de plagioclasa euhedral (20%), los que localmente se encuentran en cúmulos (esto le confiere a la roca una componente glomeroporfídica), además de alterados a calcita. La masa fundamental presenta cristales de plagioclasa (48%), olivino (16%) y opacos (7%). Los primeros son euhedrales a subhedrales y se encuentran alterados a arcilla. El olivino se presenta, con textura intergranular, es decir los microlitos de plagioclasa rodean al cristal en forma de armazón y alterado a iddingsita. Finalmente, la roca presenta cavidades rellenas por clorita, calcita y zeolitas, en forma de amígdalas. El porcentaje de los minerales de alteración: 9%.

#### **4.1.2 Rocas volcánicas de composición intermedia**

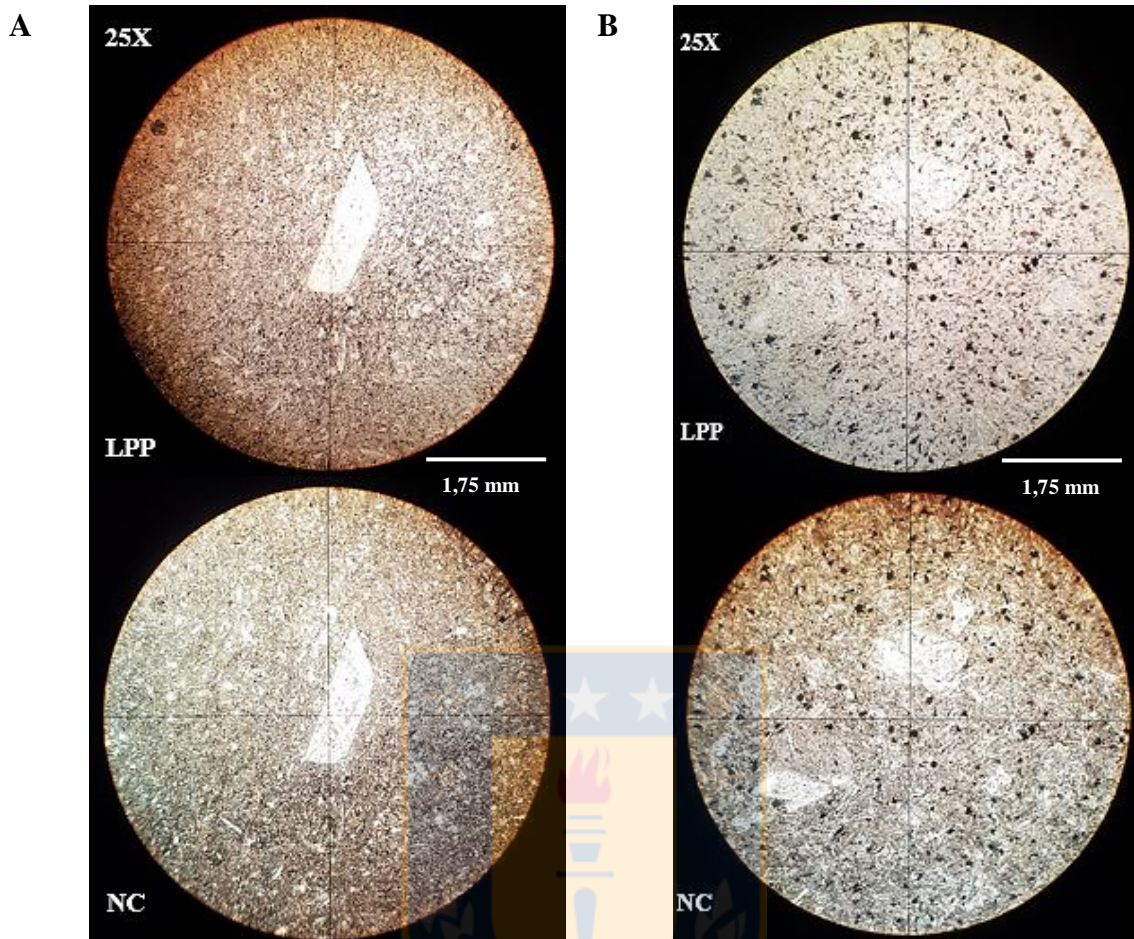
##### 4.1.2.1 Andesitas

Cuatro muestras caen dentro de esta clasificación y corresponden a las CPV-15-274, CPV-15-275, CPV-15-277 y CPV-15-278 (Anexo I, Descripción Petrográfica), siendo estas andesitas, excepto las CPV-15-275 y CPV-15-278, las cuales corresponde a andesitas basálticas. La primera, con una textura levemente porfídica y localmente pilotaxítica; posee fenocristales exclusivamente compuestos por plagioclasa euhedral (5%) levemente alterada a arcilla. La masa fundamental presenta cristales de plagioclasa y opacos. Los primeros son euhedrales (44%), localmente, alterados a calcita y con textura pilotaxítica. Por su parte los opacos (15%) se presentan uniformemente distribuidos por toda la masa fundamental. Finalmente, la roca presenta agregados irregulares de cuarzo secundario.

CPV-15-275 (Fig. 4.3.A) posee una textura porfídica localmente pilotaxítica e intersertal. Los fenocristales están compuestos por olivino anhedral (2%) fuertemente oxidado y plagioclasa euhedral (3%) levemente alterada a calcita; mientras que la masa fundamental, presenta cristales de plagioclasa (56%), vidrio (19%) y opacos (9%). La plagioclasa es euhedral, con textura pilotaxítica (cristales orientados) muy leve y con alteración moderada a calcita (alcanza un 11%). El vidrio, se encuentra entre los microlitos de plagioclasa (textura intersertal) y moderadamente desvitrificado.

La andesita correspondiente a CPV-15-277 (Fig. 4.3.B), muestra una textura glomeroporfídica localmente pilotaxítica, con fenocristales de; plagioclasa euhedrales a subhedrales (10%), presentes





**Fig. 4.3** Fotomicrografía A: Andesita basáltica (CPV-15-275) y B: Andesita (CPV-15-277).

en cúmulos y alterada a calcita; clinopiroxeno anhedral (4%), uralitizados y fuertemente fracturado; y anfíbol euhedral (3%), alterado en los bordes a clorita y epidota. La masa fundamental corresponde a plagioclasa euhedral (46%) y opacos (8%), la primera, localmente orientada y alterada a sericita y calcita. El porcentaje de minerales de alteración alcanza un 29%.

Finalmente, la última muestra clasificada como andesita basáltica, corresponde a la CPV-15-278, esta posee una textura porfídica pilotaxítica. Los fenocristales de plagioclasa euhedral (17%) se presentan moderadamente alterados a sericita. Por su parte la masa fundamental, esta principalmente compuesta por microlitos de plagioclasa (50%) y opacos. Los microlitos son euhedrales, presenta textura pilotaxítica y se encuentran alterados a calcita mientras que los opacos (11%) se encuentran uniformemente distribuidos, exceptos un porcentaje menor que se encuentra asociado a vetillas y corresponden a minerales de alteración.

### 4.1.3 Rocas volcánicas de composición ácida

La única muestra que cae dentro de esta categoría es la CPV-15-287 (Anexo I, Descripción Petrográfica) y corresponde a una dacita (Fig. 4.4). La roca presenta una textura vitrofídica y felsosídica. Los fenocristales se componen de: plagioclasa euhedral (3%) con alteración a epidota y arcillas; biotita euhedral (3%) alterada a clorita y epidota; y anfíbol anhedral a subhedral (4%) alterado intensamente a epidota.

La masa fundamental presenta: vidrio (54%) fuertemente desvitrificado; microlitos de plagioclasa (17%) inmersos en el vidrio masivo y opacos (9%). Las texturas observadas en la roca se condicen con la composición mayoritaria de la masa fundamental; vidrio volcánico e intercrecimiento de cuarzo y feldespato potásico, en este.

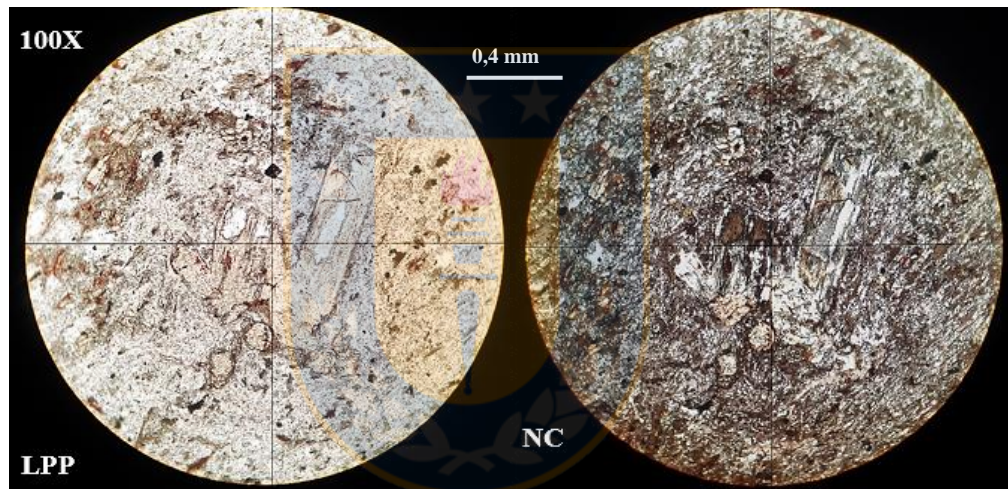


Fig. 4.4 Fotomicrografía de Dacita, con textura vitrofídica y felsosídica (CPV-15-287).

## 4.2 ROCAS VOLCANOCLÁSTICAS

### 4.2.1 Rocas volcanoclásticas de grano medio

La muestra CPV-15-273 (Anexo I, Descripción Petrográfica), es la única de las rocas volcanoclásticas que fue clasificada como lapillita tobácea pues texturalmente, el 73% de sus componentes, presentan un tamaño lapilli (entre 2 y 64 mm), mientras que el 27% restante, un tamaño ceniza (< 2 mm). Además, la roca presenta una textura fragmental vitrofídica.

En lo que respecta a la fábrica rocosa, esta es del tipo matriz soportada. Los líticos corresponden a, escoria (33%) de color muy oscuro, prácticamente negro y líticos volcánicos andesíticos (12%)

con textura porfídica, fenocristales en una masa fundamental en parte pilotaxítica y también vitrofídica. La matriz se encuentra compuesta exclusivamente por partículas vidrio (52%) con desvitrificación y alteración a calcita (3%).

#### **4.2.2 Rocas volcanoclásticas de grano fino**

##### 4.2.2.1 Tobas vítreas

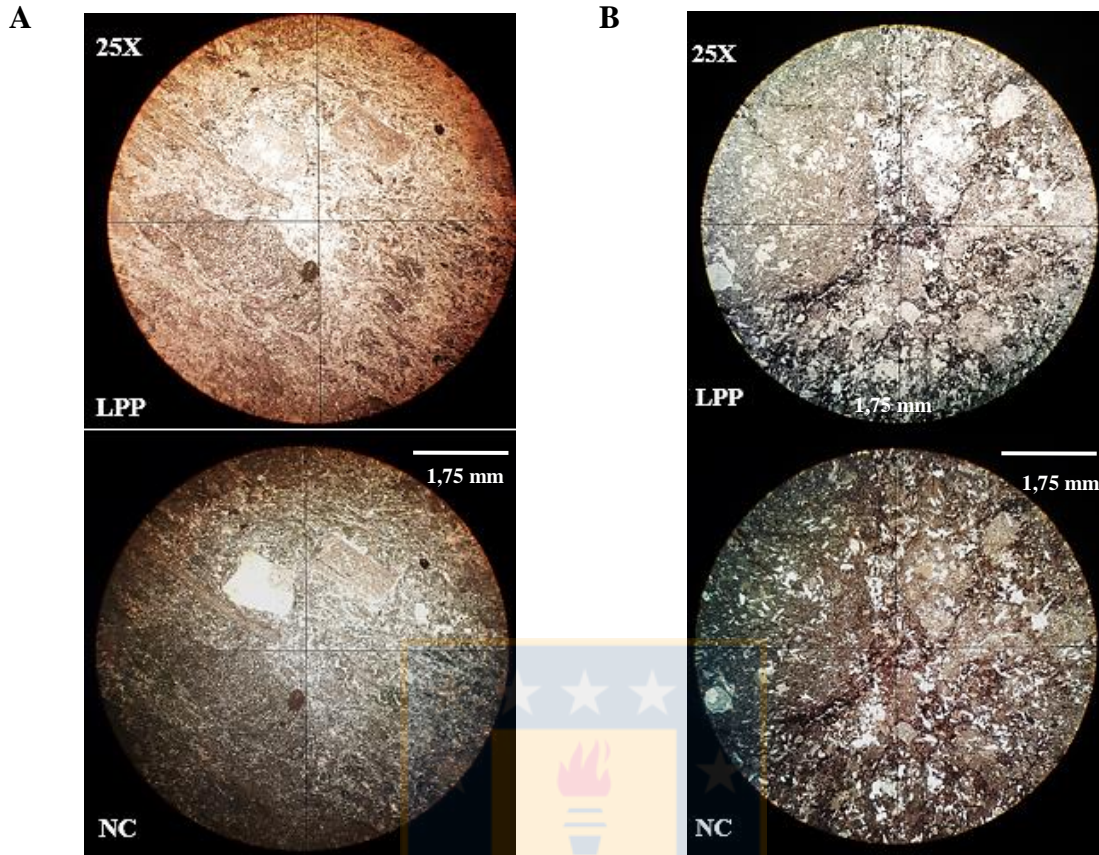
CPV-15-279, CPV-15-281 y CPV-15-285, son las muestras que fueron clasificadas como tobas vítreas. Texturalmente fueron clasificadas como tobas pues, más del 75% de los fragmentos poseen un tamaño ceniza. Para las tobas vítreas se reconoce una textura vitroclástica fragmental y una fábrica matriz soportada.

CPV-15-279 (Fig. 4.5.A), toba vítrea, (cristales, líticos y vidrio: 7, 7 y 86% normalizado). En la muestra se observan cristales de, plagioclasa euhedral (6%), con alteración a calcita y cuarzo anhedral (1%). Se identificaron líticos intrusivos (5%) de composición ácida y textura fanerítica equigranular; líticos volcánicos dacíticos (2%), con fenocristales de cuarzo en una masa afanítica altamente desvitrificada y líticos de escoria (18%) con moderada desvitrificación (a pesar de ser un lítico, la naturaleza vítrea de la escoria hace que se considere como vidrio al momento de la clasificación composicional). Por último, el vidrio se presenta en forma de: esquirlas (40%), no soldadas y alteradas a calcita; fiammes (8%) moderadamente desvitrificadas y polvo vítreo (20) con mayor desvitrificación que los componentes vítreos antes mencionados.

CPV-15-281, Toba vítrea (cristales: 32%, líticos: 12%, y vidrio: 56%) se caracteriza por la presencia de cristales de plagioclasa, anfíbol, cuarzo y opacos. Los primeros con euhedrales a subhedrales (15%) se presentan fracturados y alterados a arcilla y calcita. El anfíbol euhedral (2%), se encuentra completamente negro y se reconoce por su forma pseudo-rómbica. El cuarzo y opacos, son poco abundantes con porcentajes de 1 y 8 % respectivamente. En lo que respecta a los líticos, se reconocen del tipo volcánico y sedimentario. Los volcánicos (4%), de color pardo oscuro y textura porfídica, mientras que los sedimentarios son angulosos (6%), ricos en cuarzo y de grano muy fino. Finalmente, el vidrio (46%), corresponde a partículas finas de vidrio altamente desvitrificadas.

Para CPV-15-285 (Fig. 4.5.B), al igual que para la muestra anterior, la composición se obtuvo sobre la base de sus porcentajes de cristales, líticos y vidrio (30, 16 y 40% normalizado), los que





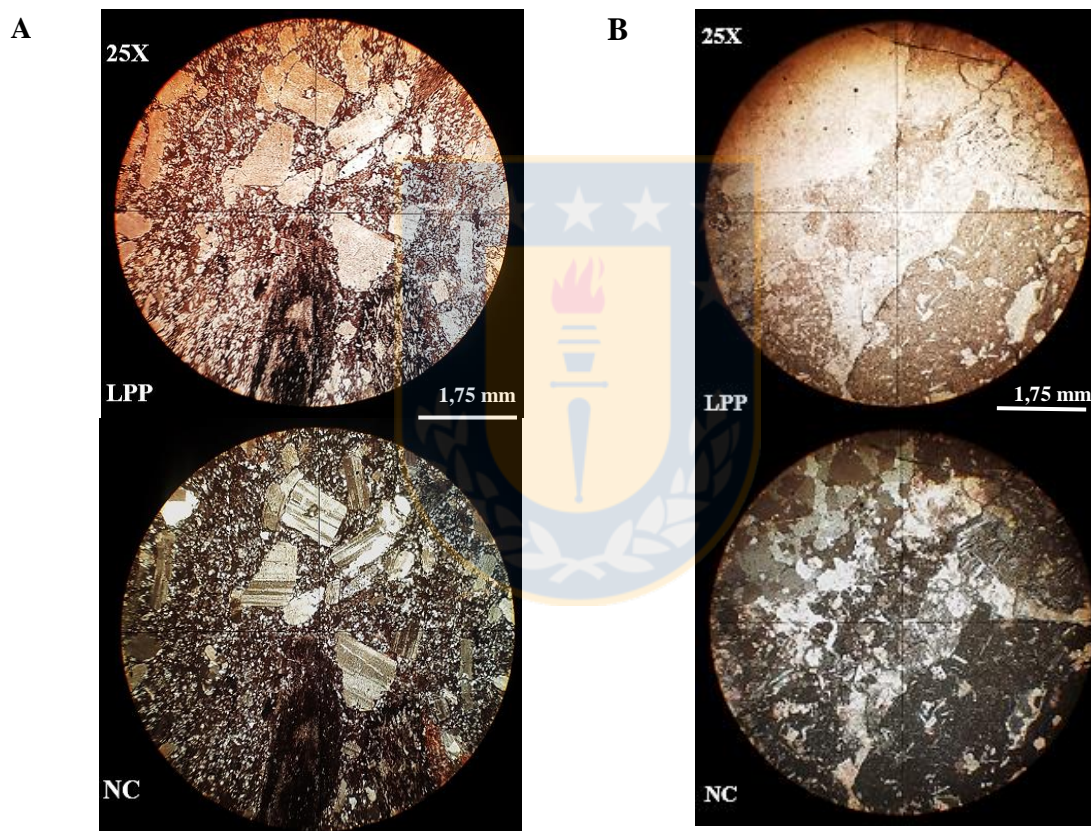
**Fig. 4.5** Fotomicrografía de A: Toba vítrea (CPV-15-279) y B: Toba vítrea (CPV-15-285).

normalizados arrojan una toba vítrea. Los primeros corresponden a plagioclasa euhedral a subhedral (19%) con alteración a arcillas y calcita; y opacos (11%). Los líticos son volcánicos andesíticos (12%) y dacíticos (4%), teniendo los primeros textura porfídica, locamente pilotaxítica, mientras que los segundos se observan de un color más claro, con fenocristales de cuarzo en una masa fundamental afanítica. El vidrio por su parte se presenta desvitrificado, alterado a calcita y en forma de esquirlas. Los minerales de alteración alcanzan un 14%.

#### 4.2.2.2 Tobas cristalinas

CPV-15-280 y CPV-15-283, son las muestras que corresponden a una toba cristalina. Texturalmente las rocas fueron clasificadas como tobas, pues más del 75% de sus componentes tienen tamaño ceniza (< 2mm). Además, se observó una textura vitroclástica fragmental, para ambas muestras.

Composicionalmente CPV-15-280, se clasifica como, una toba cristalina (Fig. 4.6.A), con base en los porcentajes normalizados de, cristales, líticos y vidrio (54, 0 y 38 %). Los primeros, están compuestos por plagioclasa euhedral a subhedral (49%), con alteración a arcillas y, ortopiroxeno (5%). Los líticos son volcanoclásticos vítreos (por lo que, al momento de realizar la clasificación composicional, se consideran como vidrio), siendo estos de escoria (2%) y pómez (8%). En lo que respecta al vidrio (25%), es de color oscuro, lo que hace pensar en una composición basáltica o andesítica y fiammes (3%), de color más claro que el vidrio masivo, por lo que se puede inferir una composición más ácida. Además, se observó una fábrica matriz-soportada para la roca.



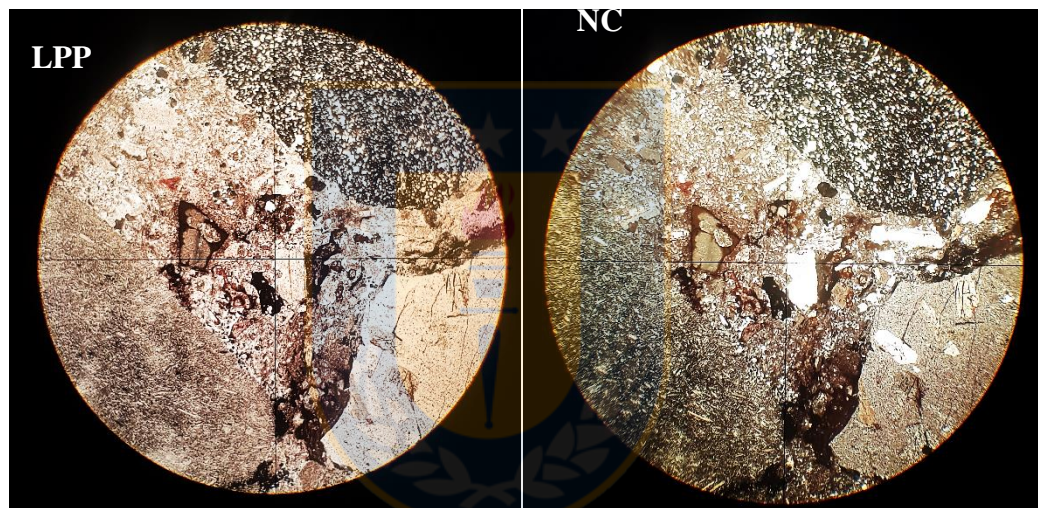
**Fig. 4.6** Fotomicrografía A: Toba cristalina (CPV-15-280) y B: Toba cristalina (CPV-15-283).

CPV-15-283 (4.6.B), corresponde a una toba cristalina (cristales, líticos y vidrio: 54, 35 y 11% normalizado). Los cristales identificados son exclusivamente plagioclasas euhedrales (40%), alteradas a calcita. Los líticos, son del tipo volcánico (8%) y de composición intermedia a ácida con una textura pilotaxítica. El vidrio (26%) se presenta como partículas finas entre los cristales de plagioclasa y líticos, además de alterado a calcita y desvitrificado.



#### 4.2.2.3 Tobas líticas

CPV-15-276 (Fig. 4.7), es la muestra que fue clasificada como toba lítica (cristales, líticos y vidrio: 33, 37 y 30 % respectivamente). Texturalmente, se describe como fragmental vitroclástica, con una fábrica grano-soportada. Los cristales corresponden plagioclasas subhedrales (25%), moderadamente fracturadas con alteración a sericita y opacos anhedrales (4%). Los líticos son principalmente del tipo volcánico andesíticos (24%) y riolíticos (8%); los primeros poseen textura porfídica, donde los fenocristales de plagioclasa se encuentran inmersos en una masa fundamental pilotaxítica. Los riolíticos se caracterizan por una textura porfídica y fenocristales rodeados por una masa fundamental vítrea y desvitrificada. El vidrio (27%) corresponde a partículas de vidrio altamente desvitrificado.



**Fig. 4.7:** Fotomicrografía de Toba Lítica (CPV-15-276).

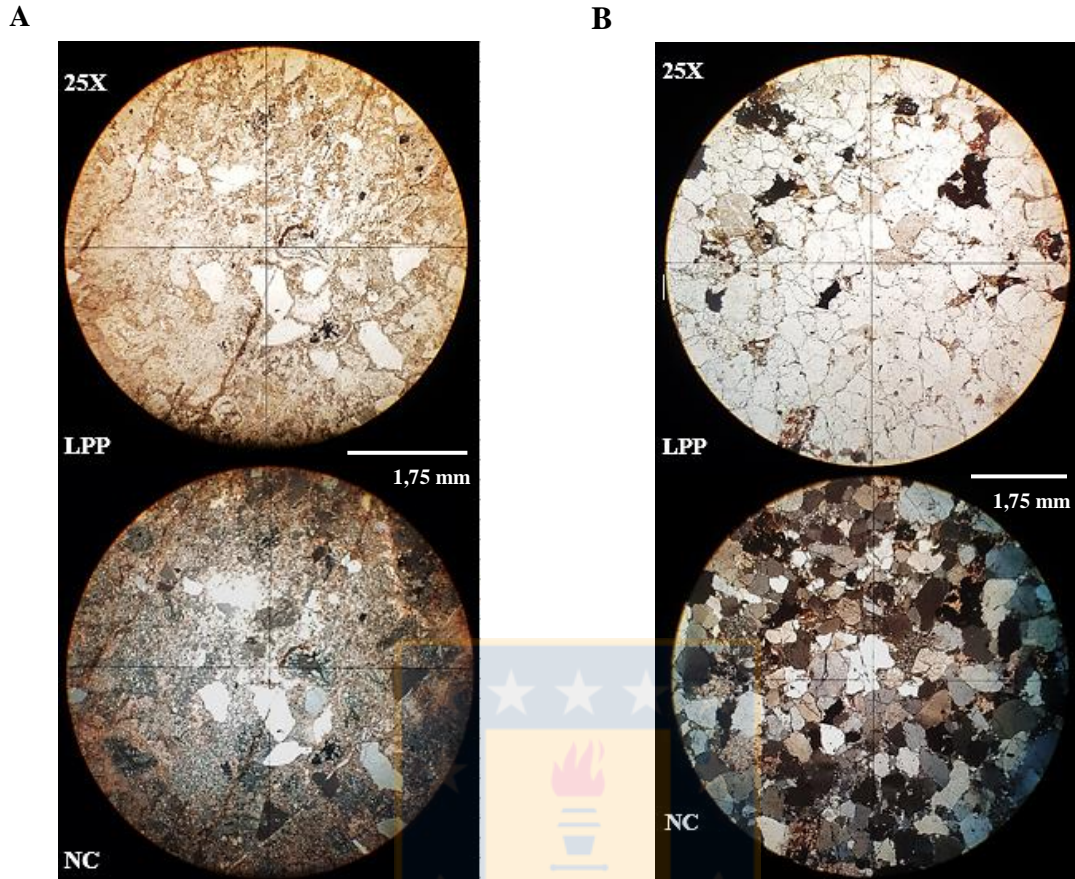
### 4.3 ROCAS SEDIMENTARIAS

#### 4.3.1 Rocas sedimentarias de grano medio

##### 4.3.1.1 Areniscas

Las muestras CPV-15-272 (Fig. 4.8.A) y CPV-15-282 (Fig. 4.8.B) (Anexo I, Descripción Petrográfica), texturalmente ambas corresponden a areniscas y composicionalmente a litarenitas volcánicas y sublitenita volcánica respectivamente.

CPV-15-272 fue clasificada texturalmente como arenisca, con base en la granulometría: limo (0%), arena (100%) y Grava (0%); y composicionalmente como litarenita volcánica, todo esto debido a



**Fig. 4.8** Fotomicrografía de A: Litarenita volcánica (CPV-15-272) y B: Sublitarenita volcánica (CPV-15-282).

naturaleza de sus componentes (porcentajes normalizados): cuarzo (11%), feldespato (1%) y líticos (88%).

Los monominerales que se presentan en esta roca son: plagioclasa subprismoidal y angular (2%), cuarzo esférico y angular (10%) y opacos (4%), mientras que los líticos son, intrusivos subcoidales y angulares (8%) de composición intermedia; volcánicos subprismoidales y angulares (66%), composicionalmente básicos y ácidos (estos últimos con alteración a calcita); y finalmente líticos volcanoclásticos subprismoidales y angulares (5%), correspondientes a una toba cristalina. Los líticos en general, se encuentran alterados a arcilla.

La fábrica rocosa es clasto soportada (clastos: 92%, matriz: 0% y cemento: 6%), la selección y la madurez textural, son buenas, mientras que la madurez composicional es inmadura. Finalmente,



los tipos de cemento observados corresponden a, cemento tipo A: hematita (2%), silíceo sintaxial (1%), cemento tipo B: calcáreo (3%).

La textura de CPV-15-282, es arenisca y se obtuvo a partir de la granulometría de sus componentes: limo (9%), arena (91%) y grava (0%). Composicionalmente, la roca corresponde a una sublitarenita volcánica: cuarzo (82%), feldespato (0%) y líticos (18%).

Los monominerales están compuestos por, cuarzo esférico y angular (75%), clinopiroxeno subdiscoidal y angular (1%), micas prismoidales y angulares (1%) y opacos (6%). Por su parte los líticos son, intrusivos esféricos y subangulares (5%), de composición intermedia; y volcánicos subdiscoidales y subangulares (12%), de composición ácida, alterados en su mayoría a arcilla.

La fábrica es clasto soportada (clastos: 89%, matriz: 9% y cemento: 2%), con una selección moderada. La madurez textural y composicional son madura y súper-madura, respectivamente. Por último, el único cemento que se observó fue del tipo arcilloso (2%).



## 5 GEOQUÍMICA

De las 16 muestras descritas bajo microscopio, 9 fueron escogidas para análisis químicos (Anexo III, Análisis químico), efectuados en el laboratorio Actlabs (Ontario, Canadá). Los elementos mayores fueron medidos mediante FUS – ICP (Fusion – Inductively Coupled Plasma), mientras que los trazas por medio de TD – MS (Thermal Desorption – Mass Spectrometry), FUS – ICP (Fusion – Inductively Coupled Plasma) y FUS – MS (Fusion – Mass Spectrometry). Es menester mencionar que la edad de las rocas en cuestión, debido a la influencia de múltiples procesos hidrotermales que han afectado al margen andino en los últimos 200 M.a. no permite contar con grados de alteración menores, de tal forma de obtener análisis químicos óptimos para la caracterización geoquímica.

### 5.1 ALTERACIÓN

#### 5.1.1 Alteración según petrografía

El estudio bajo microscopio evidenció la presencia de diversas alteraciones. Algunas de estas, exclusivas de un tipo de roca, mientras que otras, presentes en la mayoría de estas.

Para el caso de las rocas volcánicas, los principales minerales de alteración corresponden a calcita, cuarzo, clorita y arcillas. La primera se presenta alterando a plagioclasas o bien como vetillas, en basaltos y andesitas. El cuarzo, por su parte, como agregados policristalinos irregulares, en la masa fundamental de andesitas y también como mineral de intercrecimiento (producto de la desvitrificación de vidrio), en la dacita. La clorita se encuentra alterando parcial o totalmente a minerales máficos (ortopiroxeno, anfíbol y biotita) y como relleno de amígdalas, en basaltos, andesitas y dacitas. En lo que concierne a las arcillas, estas alteran a plagioclasas, en los 3 tipos de rocas ya mencionados (el grado de alteración aumenta con la acidez de la roca). Finalmente, en las rocas volcánicas, se identifican porcentajes menores de otros minerales de alteración, como lo son, la epidota, iddingsita, opacos y zeolitas.

La alteración de rocas volcanoclásticas, se caracteriza por la presencia de calcita, desvitrificación del vidrio y cuarzo. La primera, alterando al vidrio volcánico, a los líticos y a los cristales de plagioclasa. La desvitrificación, es un proceso que afecta al vidrio de todas las rocas en estudio tanto volcánicas como volcanoclásticas, en menor o mayor grado de alteración y consiste en un

intercrecimiento de cuarzo y feldespato potásico, de grano muy fino. Respecto al cuarzo, se da en agregados monomirales de este mineral, asociados a vetillas y por ende a procesos hidrotermales.

Las rocas sedimentarias corresponden al último y más acotado grupo de rocas en estudio. En estas domina la calcita, como mineral de alteración de líticos volcánicos ácidos presentes en areniscas, mientras que las arcillas, alteran a todos los líticos, tanto intrusivos como extrusivos o de composiciones básicas o ácidas.

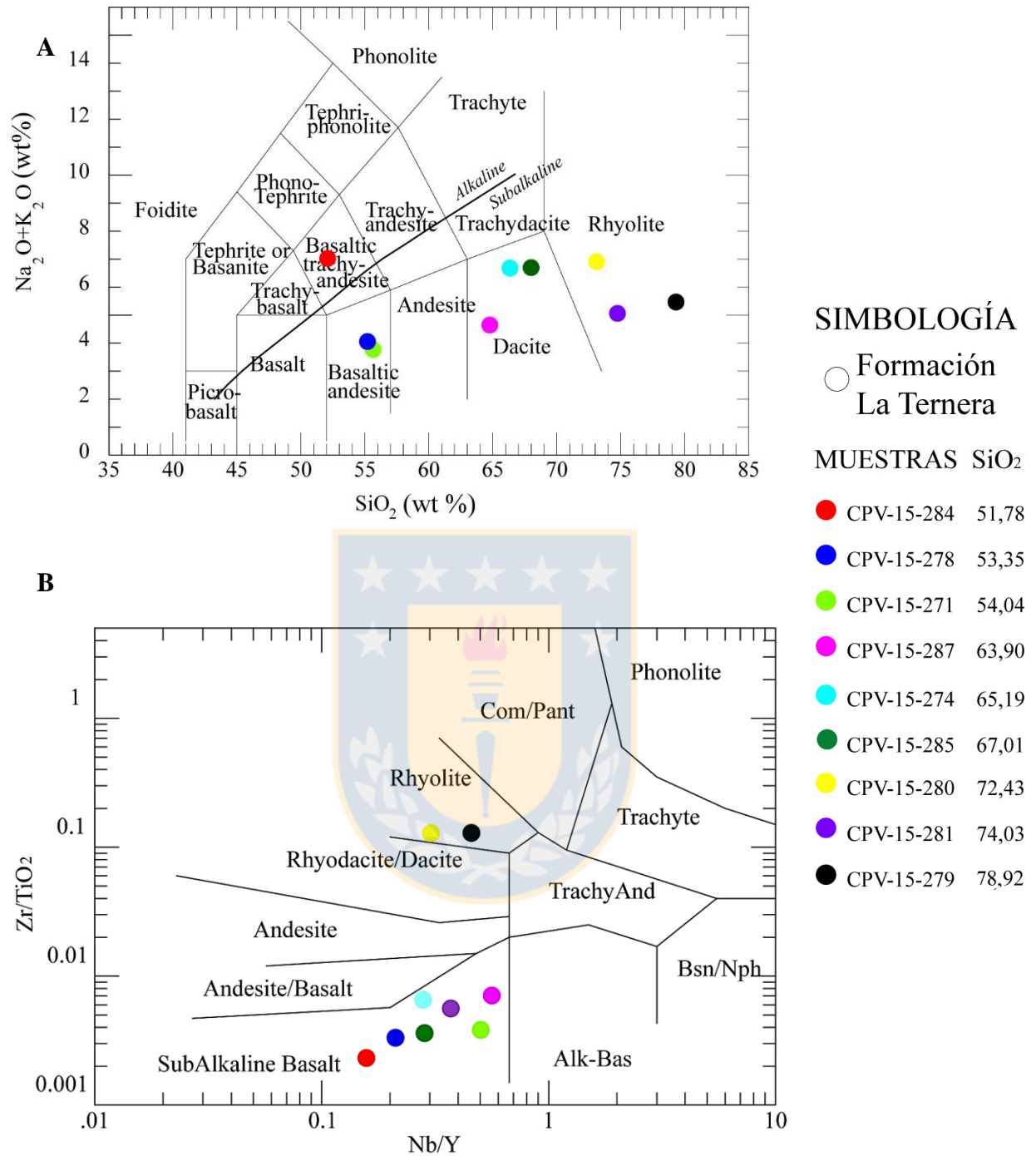
En general, según lo observado para los 3 grupos de rocas, los principales minerales de alteración son, calcita, intercrecimiento de cuarzo-feldespato, cuarzo, clorita y arcillas, los cuales serán de vital importancia, para la correcta interpretación de los diagramas geoquímicos que se expondrán a continuación.

### **5.1.2 Clasificación y alteración según geoquímica**

Como una forma de cuantificar geoquímicamente la alteración, las rocas en estudio se clasifican según el Diagrama TAS (Le Bas et al. 1986) (Fig. 5.1.A), pues este considera elementos móviles, susceptibles a procesos hidrotermales (este diagrama discrimina las rocas volcánicas según el contenido de sílice y álcalis, para lo cual se debe normalizar en base anhidra el  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) y se comparan con la clasificación del diagrama  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$  vs  $\text{Nb}/\text{Y}$  (Winchester & Floyd, 1977) (5.1.B), el cual utiliza elementos inmóviles a procesos de alteración y metamorfismo, además de sensibles a la diferenciación magmática.

La muestra CPV-15-284 es la única que cae dentro del campo de las rocas alcalinas. Petrográficamente fue definida como un basalto y geoquímicamente (Fig. 5.1.A) como una traquiandesita basáltica, sin embargo, la proximidad a la línea de Irvine y Baragar (1971) y la presencia de relleno de cavidades (amígdalas), indicaría que el basalto presenta adición de sílice y álcalis. Ahora según la figura 5.1.B existe coincidencia entre la geoquímica y la petrografía.

Las muestras CPV-15-271 y CPV-15-278 caen en el campo de andesita basáltica, la primera definida por petrografía como un basalto (lo que coincide con el diagrama  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$  vs  $\text{Nb}/\text{Y}$ ), podría clasificar como andesita basáltica según TAS, debido a la adición de sílice, por procesos de alteración posteriores. Por su parte, en la segunda se condice la clasificación petrográfica con el diagrama TAS, sin embargo, según el diagrama  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$  vs  $\text{Nb}/\text{Y}$  corresponde a un basalto.



**Fig. 5.1 A:** Diagrama de clasificación para rocas volcánicas: TAS (Total Alkalis vs Silica) de Le Bas et al. (1986), con línea divisoria entre serie alcalina y subalcalina (Irvine y Baragar, 1971). **B:** Diagrama de clasificación para rocas volcánicas cuyas variables corresponden a Zr/TiO<sub>2</sub> vs Nb/Y, Diagrama de Winchester & Floyd (1977). Generados por el *software* Iqpet.

Según TAS, las muestras CPV-15-274, CPV-15-285 y CPV-15-287, son clasificadas como dacitas. La única muestra que se corresponde con la petrografía es la CPV-15-287, mientras que la CPV-15-274, definida en primera instancia como andesita, arroja dacita debido a la presencia de cuarzo de alteración, lo que aumentaría el contenido de sílice. CPV-15-285, descrita como toba vítrea, tendría una composición basáltica según el diagrama Zr/TiO<sub>2</sub> vs Nb/Y y la clasificación del diagrama TAS estaría afectada por la presencia de vidrio volcánico desvitrificado, lo cual aumenta el contenido de SiO<sub>2</sub> (wt%)

En lo que respecta a CPV-15-279 y CPV-15-280, existe coincidencia entre ambos diagramas (Fig. 5.1.A y 5.1.B). Petrográficamente, ambas muestras fueron definidas como tobas, la primera vítrea y la segunda cristalina. Sobre la base de la correspondencia geoquímica entre los diagramas mostrados, es plausible afirmar que ambas tobas presentan una composición riolítica.

Respecto a la muestra CPV-15-281, es la que presenta mayor incongruencia entre las clasificaciones del diagrama TAS y el Zr/TiO<sub>2</sub> vs Nb/Y, arrojando el primero una riolita, mientras que el segundo, un basalto. Petrográficamente, fue definida como una toba vítrea y en vista que el diagrama de la figura 5.1.B, utiliza elementos resistentes a procesos de removilización, la composición de esta sería basáltica y la clasificación en el diagrama TAS, se encontraría sujeta a la adición de sílice, el cual fue reconocido en la muestra, como vetillas de cuarzo hidrotermal.

## 5.2 ELEMENTOS MAYORES

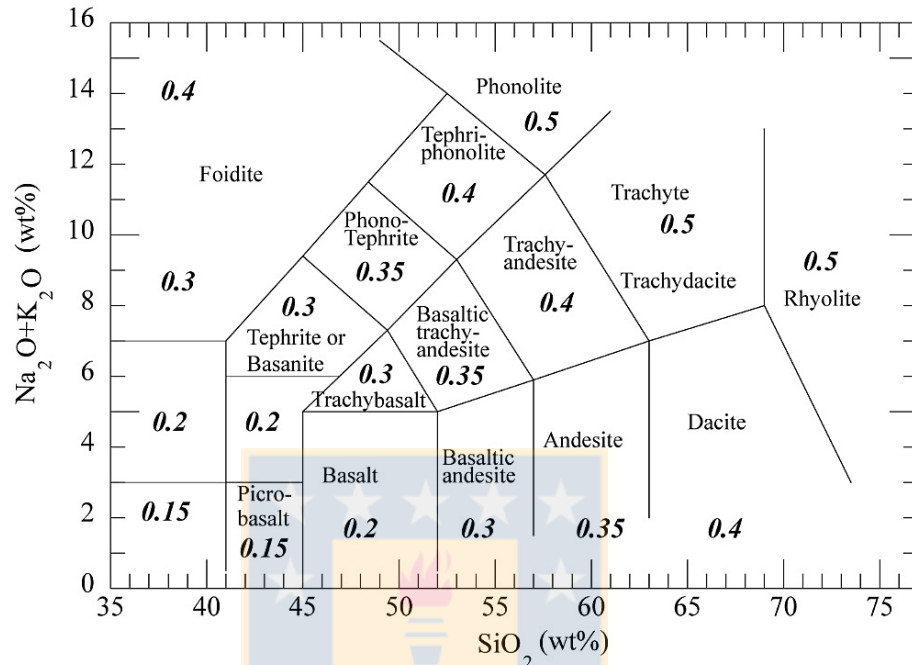
Como ya se mencionó, los elementos mayores fueron medidos mediante FUS – ICP (Fusion – Inductively Coupled Plasma) y luego normalizados sobre una base anhidra. En el Excel utilizado como base de datos, se obtuvo los valores de FeO ajustado y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ajustado (Ecuación 5.1 y 5.2, respectivamente), con el motivo de obtener el FeO total (Ecuación 5.3).

$$\text{FeO}_{\text{Ajustado}} = (\text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{Total}} / (1 + R)) \quad \text{Ecuación 5.1}$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{Ajustado}} = \text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{Total}} - (\text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{Total}} / (1 + R)) \quad \text{Ecuación 5.2}$$

$$\text{FeO}_{\text{Total}} = (0,899809 \times \text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{Ajustado}}) + \text{FeO}_{\text{Ajustado}} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

El  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ Total corresponde al Fe medido en el análisis químico, mientras que R, representa la razón entre  $\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{FeO}$ , cuyo valor es específico para cada tipo de roca y se asigna según la clasificación dada por el diagrama TAS (Fig. 5.2).



**Fig. 5.2** Valores de la razón R ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{FeO}$ ) propuestos por Middlemost (1989), para rocas volcánicas de acuerdo con su clasificación en el diagrama TAS. Modificado de Rollinson (1993).

Los valores usados para las muestras en estudio (Tabla 5.1), fueron escogidos de acuerdo al análisis sobre la alteración antes realizado, la clasificación petrográfica y en el caso de las tobas, la composición entregada por el diagrama de Winchester & Floyd (1977).

**Tabla 5.1** Valores de R para las muestras según su clasificación

Muestra	Clasificación	R ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{FeO}$ )
CPV-15-271	Basalto	0.20
CPV-15-274	Andesita	0.35
CPV-15-278	Andesita basáltica	0.30
CPV-15-279	Toba vítrea riolítica	0.50
CPV-15-280	Toba cristalina riolítica	0.50
CPV-15-281	Toba vítrea basáltica	0.20
CPV-15-284	Basalto	0.20
CPV-15-285	Toba vítrea “basáltica”	0.20
CPV-15-287	Dacita	0.40

## 5.2.1 Diagramas de clasificación

### 5.2.1.1 Diagramas TAS (Total alkalis vs Silica) y Zr/TiO<sub>2</sub> vs Nb/Y

En el apartado 5.1.2, se presentaron los diagramas TAS y Zr/TiO<sub>2</sub> vs Nb/Y, para clasificar las 9 muestras en estudio, ahora como una forma de no redundar en estos, se expone una tabla comparativa (Tabla 5.2), que resume las clasificaciones petrográficas y geoquímicas.

**Tabla 5.2** Tabla comparativa para la clasificación de las 9 muestras, correspondientes a rocas volcánicas y volcanoclásticas.

Muestra	Petrografía	TAS	Zr/TiO <sub>2</sub> vs Nb/Y
CPV-15-271	Basalto	Andesita basáltica	Basalto
CPV-15-274	Andesita	Dacita	Basalto
CPV-15-278	Andesita basáltica	Andesita basáltica	Basalto
CPV-15-279	Toba vítrea	Riolita	Riolita
CPV-15-280	Toba cristalina	Riolita	Riolita
CPV-15-281	Toba vítrea	Riolita	Basalto
CPV-15-284	Basalto	Traquiandesita basáltica	Basalto
CPV-15-285	Toba vítrea	Dacita	Basalto
CPV-15-287	Dacita	Dacita	Basalto

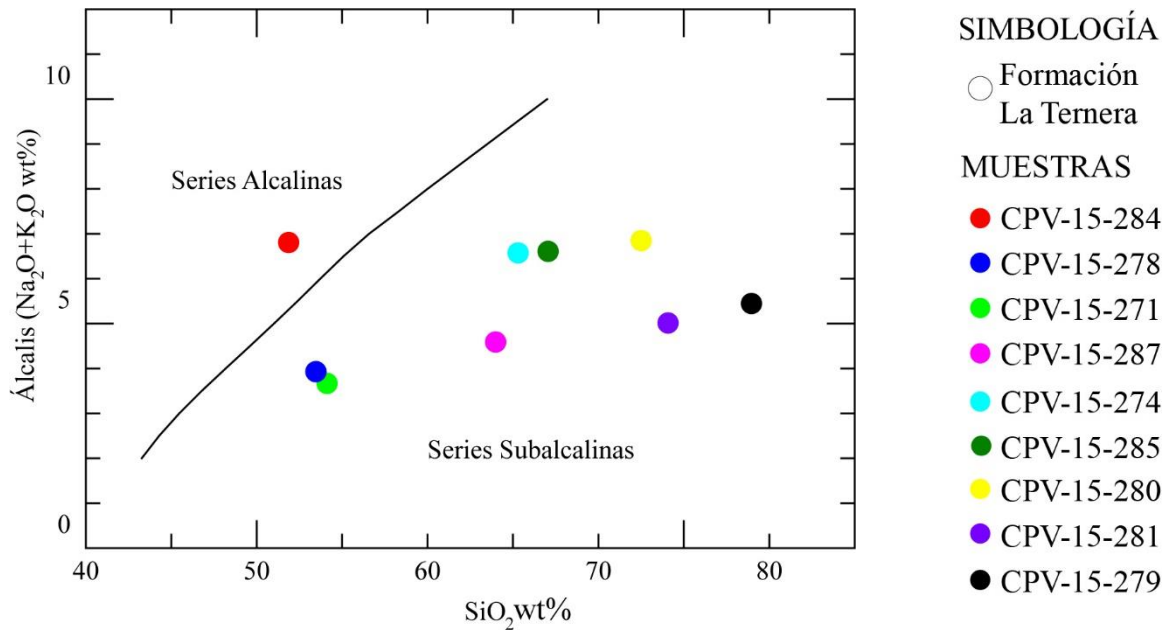
### 5.2.1.2 Diagramas Sílice vs Álcalis, y AFM para series subalcalinas y K<sub>2</sub>O vs SiO<sub>2</sub>

El diagrama Sílice vs Álcalis (Irvine y Baragar, 1971), considera los mismos óxidos que el diagrama TAS (NaO+K<sub>2</sub>O vs SiO<sub>2</sub>, estos normalizados sobre una base anhidra) y su construcción tiene como objetivo, discernir si las muestras en estudio caen en el campo de las series alcalinas o series subalcalinas.

Dentro de las series subalcalinas coexisten 2 series geoquímicas, como lo son la serie toleítica y la serie calcoalcalina, ambas generalmente características de ambientes geotectónicos diferentes.

En la figura 5.3 se observa que de un total de 9 muestras, 8 caen en el campo de las series subalcalinas, siendo la muestra CPV-15-284, la única que se encuentra dentro del campo de las series subalcalinas, sin embargo como se vio en el apartado 5.1.2, la muestra al estar afectada por alteración, arroja una posición diferente a la que presentaría si su estado fuese inalterado, por lo que bajo esta premisa podemos considerar a todas las muestras, pertenecientes al campo de las series subalcalinas.



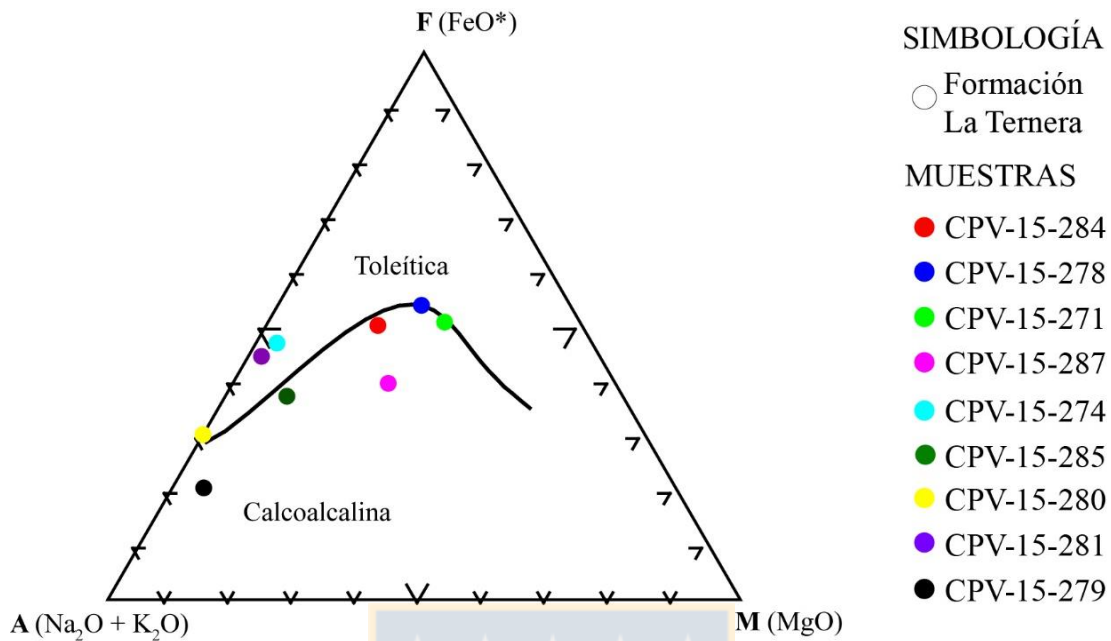


**Fig. 5.3** Diagrama Sílice vs álcalis (Irvine y Baragar, 1971), con las 9 muestras coloreadas según su respectivo código. Realizado en el *software* Igpert.

Una vez que las rocas fueron caracterizadas dentro de la serie subalcalina, es menester discriminar entre la serie calcoalcalina y la toleítica, para esto se construye el diagrama AFM (Irvine y Baragar, 1971) (Fig. 5.4), el cual a través de los contenidos de álcalis (A), FeO\* (F) y MgO (M) (normalizados en base anhidra y luego nuevamente normalizados al 100% que corresponde a A + F + M para graficar los puntos), clasifica las rocas en una serie u otra.

En la serie calcoalcalina, las rocas no presentan un notorio enriquecimiento en FeO\*(F) a diferencia de la serie toleítica, esto ocurre porque en la primera se genera cristalización temprana de la fase mineral titanomagnetita, hecho que en la segunda no ocurre y que es característico de magmas de zonas de subducción, por lo que este diagrama nos podría arrojar los primeros indicios respecto al ambiente tectónico en el que se habrían formado las rocas de la Formación La Ternera. Es importante destacar que los valores de FeO\* (F) y también de álcalis (A), producto de la alteración, pueden verse afectados, no obstante, el diagrama de igual forma constituye una buena herramienta de caracterización de las rocas en estudio.

En la figura 5.4, 4 muestras caen en el campo de la serie calcoalcalina, 3 en la línea divisoria entre ambas muestras y 2 clasifican como toleíticas. No podemos interpretar el diagrama sin antes considerar el efecto de la alteración en este. Tomando en cuenta que la mayoría de las muestras

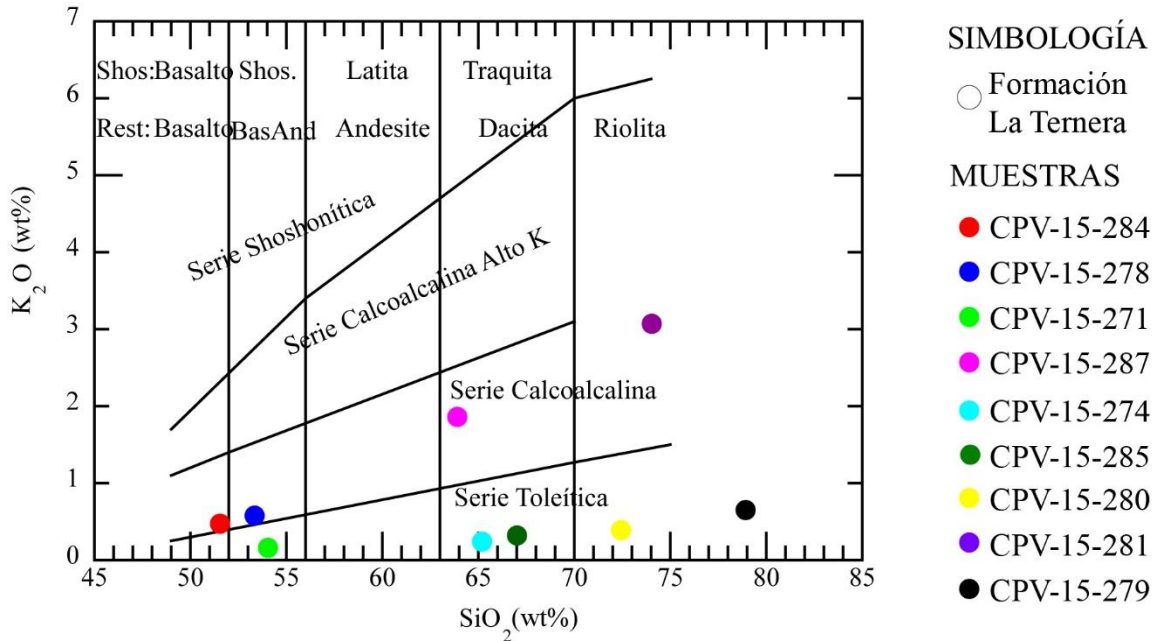


**Fig. 5.4** Diagrama AFM (Irvine y Baragar, 1971) para clasificación de series subalcalinas, donde  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  corresponde a **A**,  $\text{FeO}^*$  a **F** y  $\text{MgO}$  a **M**. Generado en el *Software* Igppt.

presentan un grado moderado a perversivo de alteración en los feldespatos, lo que removiliza el Potasio (K) y por ende hace disminuir los valores de este elemento en las muestras, además de la identificación de procesos hidrotermales (reconocimiento de vetillas y mineralogía hidrotermal), los cuales pueden adicionar (Fe); se puede concluir que la mayoría de las muestras caerían en el campo de la serie calcoalcalina.

Como una forma de complementar el análisis hecho para el diagrama AFM, se procede a construir el diagrama  $\text{K}_2\text{O}$  vs  $\text{SiO}_2$  (Peccerillo & Taylor, 1976) (Fig. 5.5). El objetivo de este diagrama es similar al diagrama anterior, la única variante es que la serie calcoalcalina se puede subdividir en dos campos dependiendo de la abundancia de K que exista en esta.

De la figura 5.5 se puede desprender que 4 muestras caen dentro del campo de la serie calcoalcalina mientras las restantes en el de la serie toleítica, sin embargo, como una de las variables de este



**Fig. 5.5** Diagrama  $K_2O$  vs  $SiO_2$ , para la subdivisión de rocas subalcalinas (Peccerillo & Taylor, 1976). Realizado en el *Software Igp*.

diagrama es el  $K_2O$  (wt%) y como ya se mencionó anteriormente, existe pérdida de K (potasio) debido a la alteración de los feldespatos, es plausible concluir que la gran mayoría de las muestras caerían en el campo de la serie calcoalcalina, de la misma forma que lo hacen en el diagrama AFM, si no estuviesen afectadas por alteración.

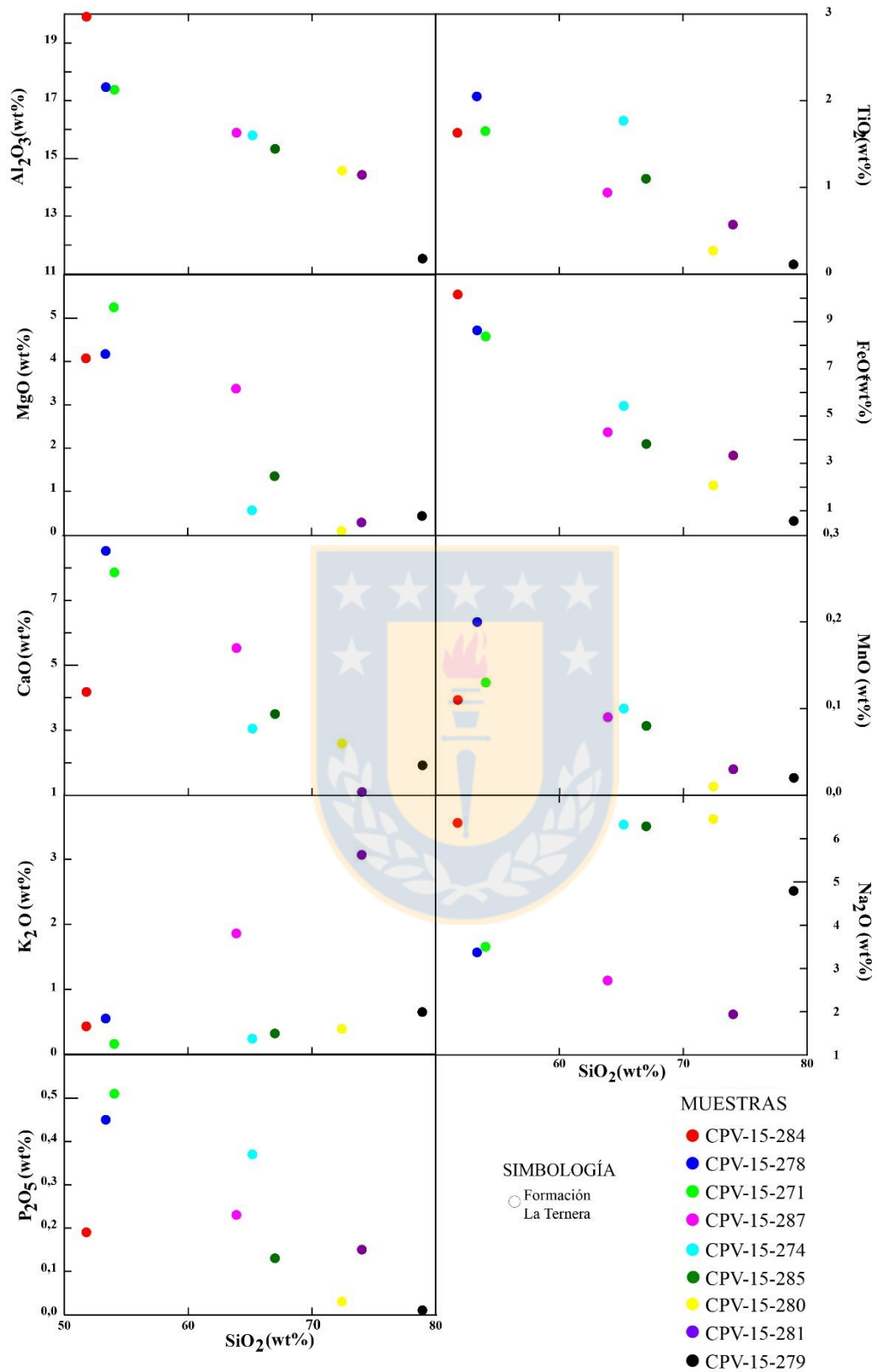
### 5.2.2 Diagramas de variación de elementos mayores

Estos diagramas muestran de forma concisa variaciones geoquímicas que se pueden dar en un grupo de rocas que se encuentran relacionadas, por lo que constituyen una herramienta útil para la determinación de procesos geológicos que generan dichas variaciones.

#### 5.2.2.1 Diagrama Harker

Este tipo de diagrama busca mostrar el comportamiento de los elementos mayores frente a procesos de evolución magmática, en los cuales el eje x corresponderá al  $SiO_2$  puesto que este óxido incrementa con la evolución magmática y se utiliza como índice de diferenciación.

De la figura 5.6 se puede inferir que los elementos como el  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $MgO$ ,  $FeO^*$ ,  $CaO$ ,  $MnO$  y  $P_2O_5$ , presentan una pendiente negativa respecto a su relación con el  $SiO_2$ .



**Fig. 5.6** Diagramas Harker (variación de elementos mayores vs SiO<sub>2</sub>).

En el caso del  $K_2O$ , se presenta una bimodalidad, pues se observan dos pendientes, una más positiva que la otra. La tendencia menos positiva podría explicarse por la pérdida de K que presentan las muestras (como ya se mencionó en los diagramas AFM y  $K_2O$  vs  $SiO_2$ ) producto de la alteración de los feldespatos, por lo tanto, CPV-15-271, CPV-15-274, CPV-15-279, CPV-15-280, CPV-15-285 Y CPV-15, se comportarían de acuerdo a la pendiente más positiva. En lo que concierne al  $Na_2O$ , no se pudo apreciar una tendencia clara con el aumento en la concentración de sílice.

En general todos los óxidos analizados presentan un comportamiento lineal frente al aumento de  $SiO_2$ , lo que podría deberse a algún proceso magmático, siendo el más común la cristalización fraccionada, considerando que las muestras pertenecen a la misma formación y por ende son cogenéticas.

### 5.3 ELEMENTOS TRAZA

Los elementos traza fueron medidos mediante 3 técnicas analíticas: TD – MS (Thermal Desorption – Mass Spectrometry), FUS – ICP (Fusion – Inductively Coupled Plasma) y FUS – MS (Fusion – Mass Spectrometry), sin embargo los datos considerados son los arrojados por los dos últimos métodos mencionados, a raíz de que son los que presentan un límite de detección más específico y por ende entregan resultados más veraces.

#### 5.3.1 Diagramas de variación de elementos trazas

A continuación, se presentan diversos diagramas, donde se exponen diferentes razones entre elementos traza vs  $SiO_2$  (wt%), con el fin de cuantificar como varía el contenido de estos elementos, con la diferenciación y la profundidad respecto al Moho.

##### 5.3.1.1 Diagrama $Eu/Eu^*$ vs $SiO_2$ (wt%)

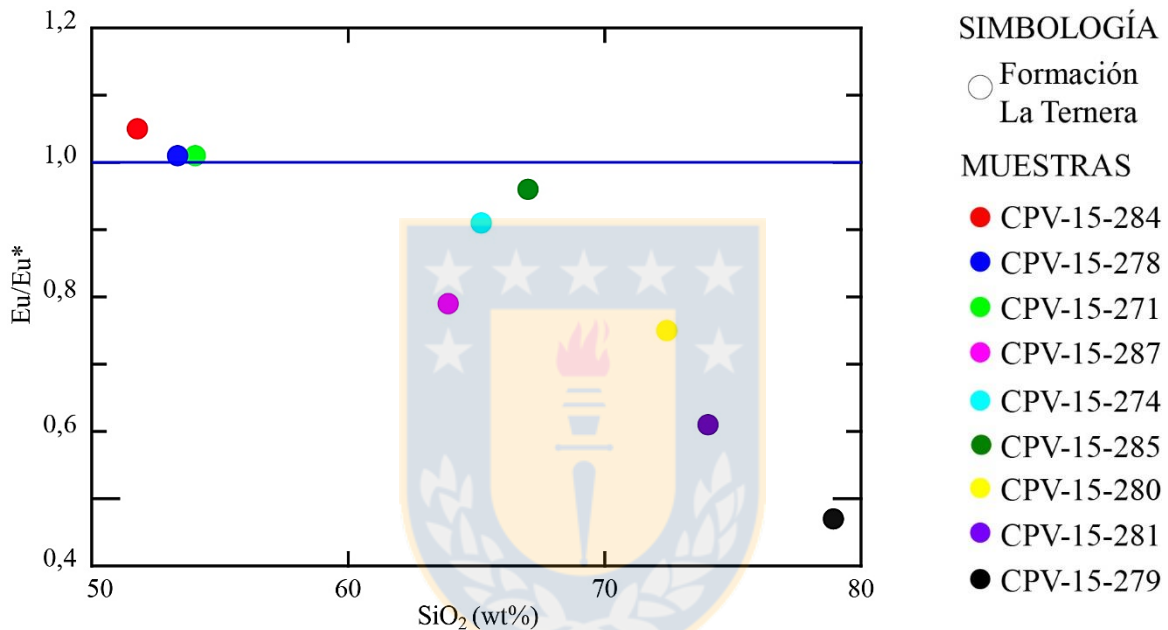
El Eu es una tierra rara que al igual que todas las REE, presenta una valencia +3, sin embargo, cuando presenta valencia +2, se vuelve compatible con fases cristalinas feldespáticas, específicamente con la plagioclasa. Esta compatibilidad se ve reflejada en anomalías de Eu, las que se pueden cuantificar con la concentración esperada de Eu ( $Eu^*$ ), a partir de las concentraciones de Sm y Gd (REE que se encuentran adyacentes al Eu en la tabla periódica y por ende poseen un comportamiento geoquímico muy similar) mediante la ecuación 5.4.

$$Eu^* = Eu_N / \sqrt{(Sm_N \times Gd_N)}$$

Ecuación 5.4

Los valores mayores a 1 indican una anomalía positiva mientras que los menores a 1, una anomalía negativa (Rollinson, 1993).

En la Figura 5.7 se puede ver que, de las 9 muestras 6 presentan valores inferiores a 1 y, por ende, una anomalía negativa de Eu, mientras que las restantes poseen anomalías levemente positivas. También es posible observar que las anomalías se van haciendo cada vez más negativas con el aumento del contenido en sílice, por lo que se puede inferir que el contenido de Eu que forma parte de las fases cristalinas feldespáticas crece con la diferenciación.



**Fig. 5.7** Diagrama Eu/Eu\* vs SiO<sub>2</sub> (wt%). Generado en el *Software* Igppt.

5.3.1.2 Diagramas La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> vs SiO<sub>2</sub> (wt%) y Sr/Y vs SiO<sub>2</sub> (wt%) (Ambos modificados de Profeta y otros, 2015)

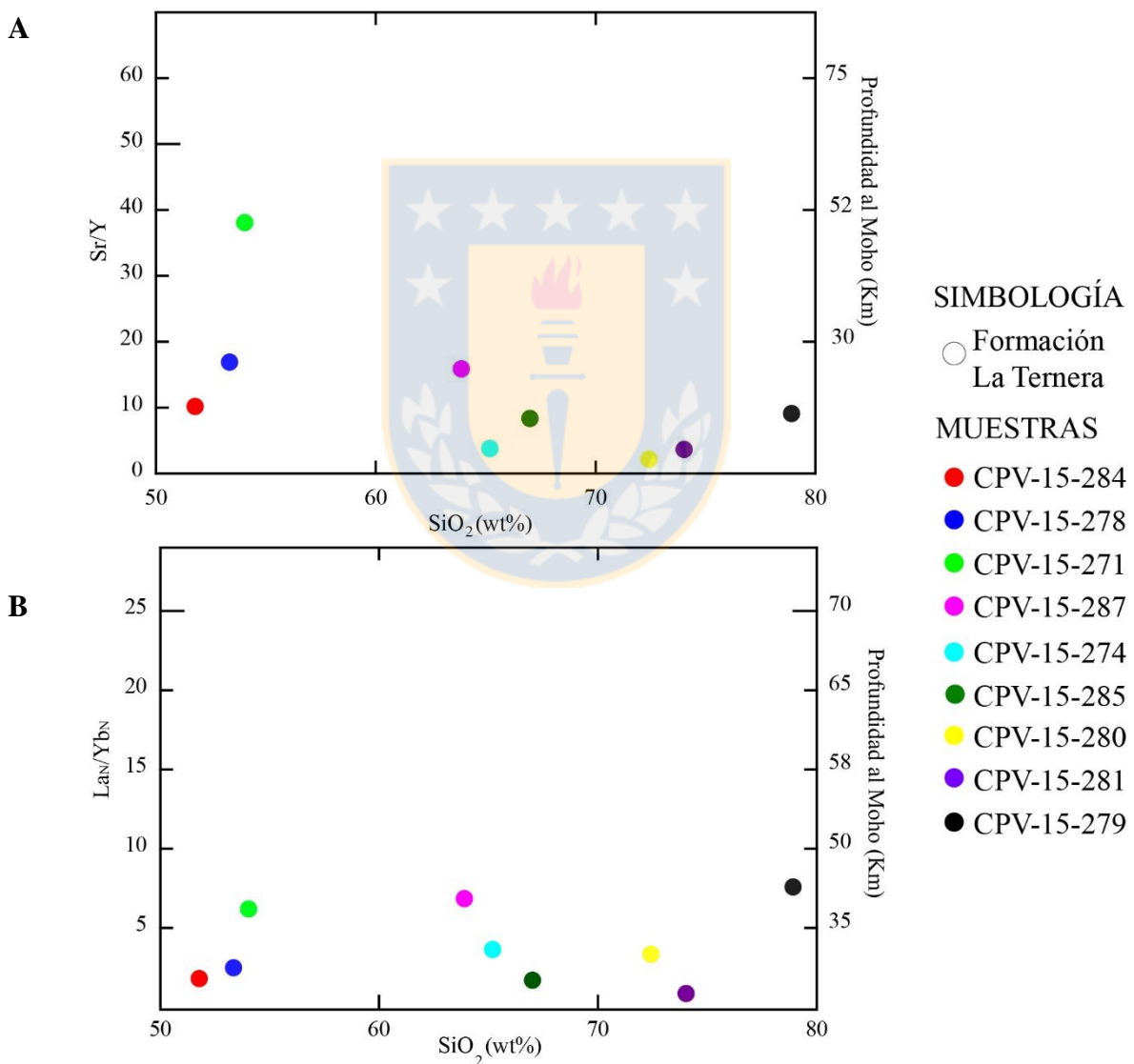
Ambas razones funcionan como trazadores del espesor cortical, para rocas de composición intermedia (55-68 wt% SiO<sub>2</sub>). En el caso de la razón La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub>, esta mide el fraccionamiento de LREE vs HREE (Tierras raras livianas y pesadas, respectivamente) y a través de dicho fraccionamiento, entrega valores aproximados de espesor cortical gracias al comportamiento, incompatible de las LREE vs al compatible de las HREE.

La razón Sr/Y, sirve como trazador del espesor cortical, gracias a la variación que sufren sus coeficientes de partición con los cambios de presión. El Sr se vuelve más compatible a presiones



menores mientras que el Y, lo hace a presiones mayores. Estos comportamientos permiten utilizar esta razón como un geobarómetro, que refleja el espesor cortical de la corteza en la cual se producen los procesos magmáticos formadores de las rocas en estudio.

En la figura 5.8.A y 5.8.B se puede observar que no existen tendencias claras entre las razones presentadas y el aumento en el contenido de  $\text{SiO}_2$  (wt%), sin embargo, en lo que respecta a los espesores corticales, se puede concluir a partir de la posición de la mayoría de las muestras en el diagrama, que la formación de las rocas en estudio habría ocurrido en una corteza con espesor inferior a 35 km.



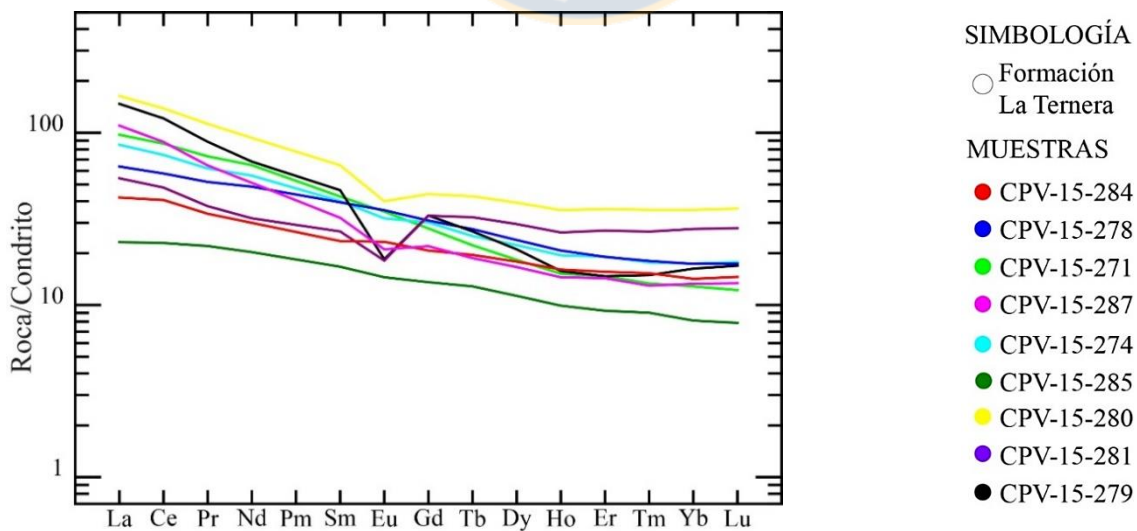
**Fig. 5.8 A:** Diagrama Sr/Y vs  $\text{SiO}_2$  (wt%) **B:** Diagrama  $\text{La}_N/\text{Yb}_N$  vs  $\text{SiO}_2$  (wt%). Ambos con los espesores corticales según Profeta y otros, 2015. Diagramas generados en el *Software* Iqpet.

### 5.3.2 Diagrama de tierras raras (REE) normalizado al condrito

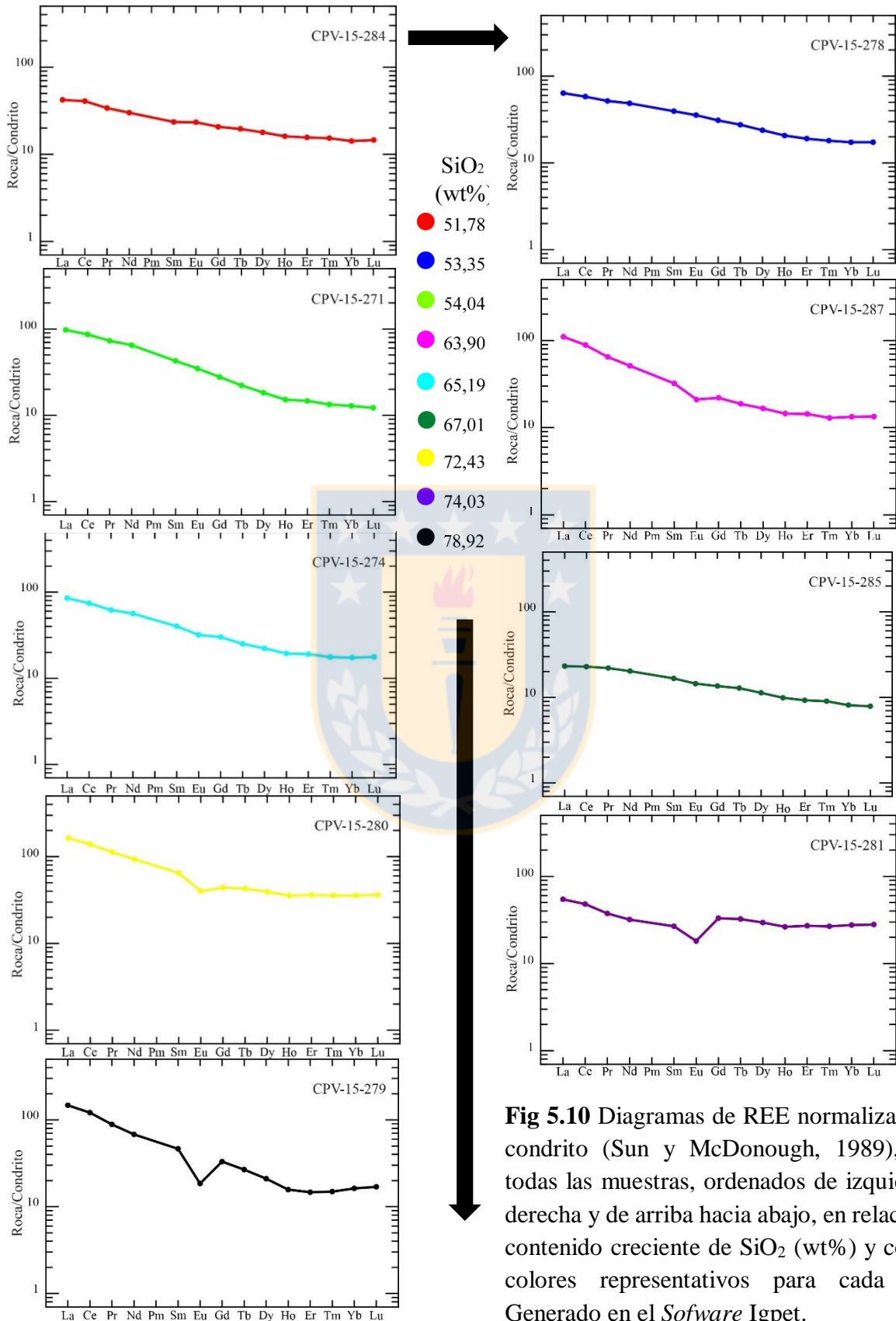
Las REE constituyen un grupo de elementos químicos de vital importancia al momento de inferir la evolución petrológica de las rocas, pues a pesar de tener una naturaleza incompatible y ser inmóviles en fase fluida, dentro del mismo grupo, la disminución del radio atómico con el aumento del número atómico, vuelven a algunas tierras raras más incompatibles que otras y por ende es posible reconocer un fraccionamiento diferenciado entre ellas.

El patrón de fraccionamiento de LREE (Tierras raras livianas) y HREE (Tierras raras pesadas) es diferente dependiendo de si las rocas provienen de la corteza continental o del manto. En el primer caso el patrón se encuentra enriquecido en LREE respecto de las HREE y además puede presentar anomalía negativa de Eu. En el caso de rocas mantélicas como lo son los MORB, el patrón es opuesto y las HREE presentan enriquecimiento frente a las LREE.

En la figura 5.10 se puede observar que todas las rocas presentan un patrón enriquecido en LREE vs HREE y además que algunas de ellas, presentan anomalía negativa de Eu mientras que otras no. Para ver de mejor forma el comportamiento de las muestras, se realizan los diagramas de REE normalizados al condrito para cada una de estas y se ordenan según el contenido creciente de  $\text{SiO}_2$  (wt%). De la figura 5.10 se puede desprender que la anomalía negativa de Eu se vuelve más pronunciada con el aumento del contenido en sílice, lo que se condice con lo observado en la figura 5.7.



**Fig. 5.9** Diagrama REE normalizado al condrito (Sun y McDonough, 1989), en el cual se incluyen todas las muestras.



**Fig 5.10** Diagramas de REE normalizados al condrito (Sun y McDonough, 1989), para todas las muestras, ordenados de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, en relación al contenido creciente de SiO<sub>2</sub> (wt%) y con los colores representativos para cada roca. Generado en el *Software* Igp<sub>et</sub>.

### 5.3.3 Diagrama multielemento

El análisis de elementos traza se realiza a partir de la comparación respecto a valores conocidos (composición química manto primitivo y MORB), con el fin de comprender la evolución magmática de las rocas en estudio y con ello, el fraccionamiento de determinados minerales que las componen. Los diagramas multielemento toman importancia en este análisis, pues son un medio para visualizar ciertos patrones típicos, de rocas generadas en determinados ambientes geotectónicos.

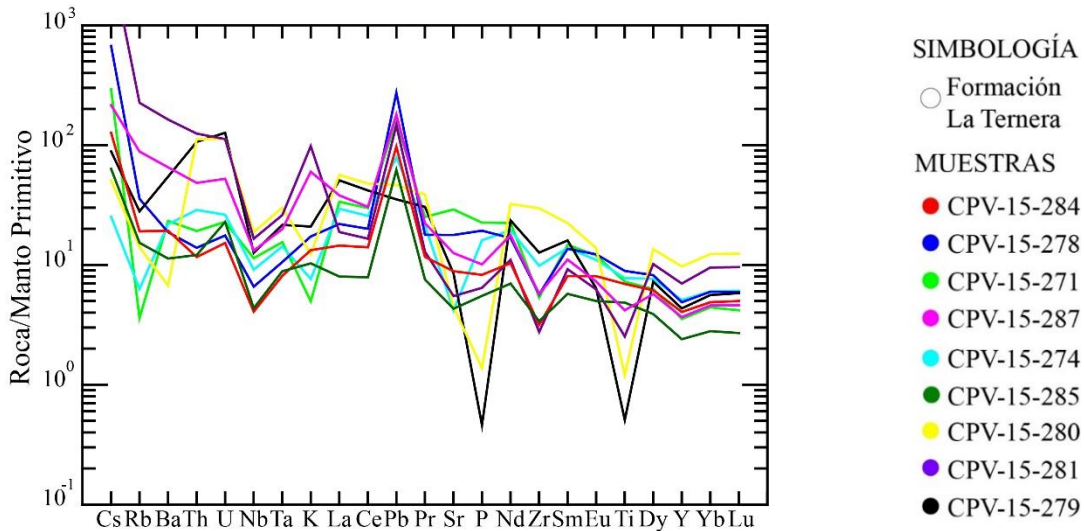
#### 5.3.3.1 Diagrama multielemento normalizado al manto primitivo

Para la construcción de este diagrama, los elementos se han normalizados al manto primitivo según los valores dados por Sun y McDonough (1989) (Tabla 5.3). En el caso del K, P y Ti, se calcularon las concentraciones en ppm a partir de la concentración (% en peso) de los óxidos, multiplicando dicha concentración por la proporción del elemento dentro del óxido y luego multiplicando por 10000.

**Tabla 5.3** Concentraciones de elementos traza para el manto primitivo, propuestas por Sun y McDonough (1989)

Elemento	Concentración (ppm)	Elemento	Concentración (ppm)	Elemento	Concentración (ppm)
Cs	0.0074	La	0.687	Sm	0.444
Rb	0.6350	Ce	1.775	Eu	0.168
Ba	0.9890	Pb	0.071	Ti	1300
Th	0.0850	Pr	0.276	Dy	0.737
U	0.0210	Sr	21.10	Y	4.550
Nb	0.7130	P	95.00	Yb	0.493
Ta	0.0410	Nd	1.354	Lu	0.074
K	250.00	Zr	11.20		

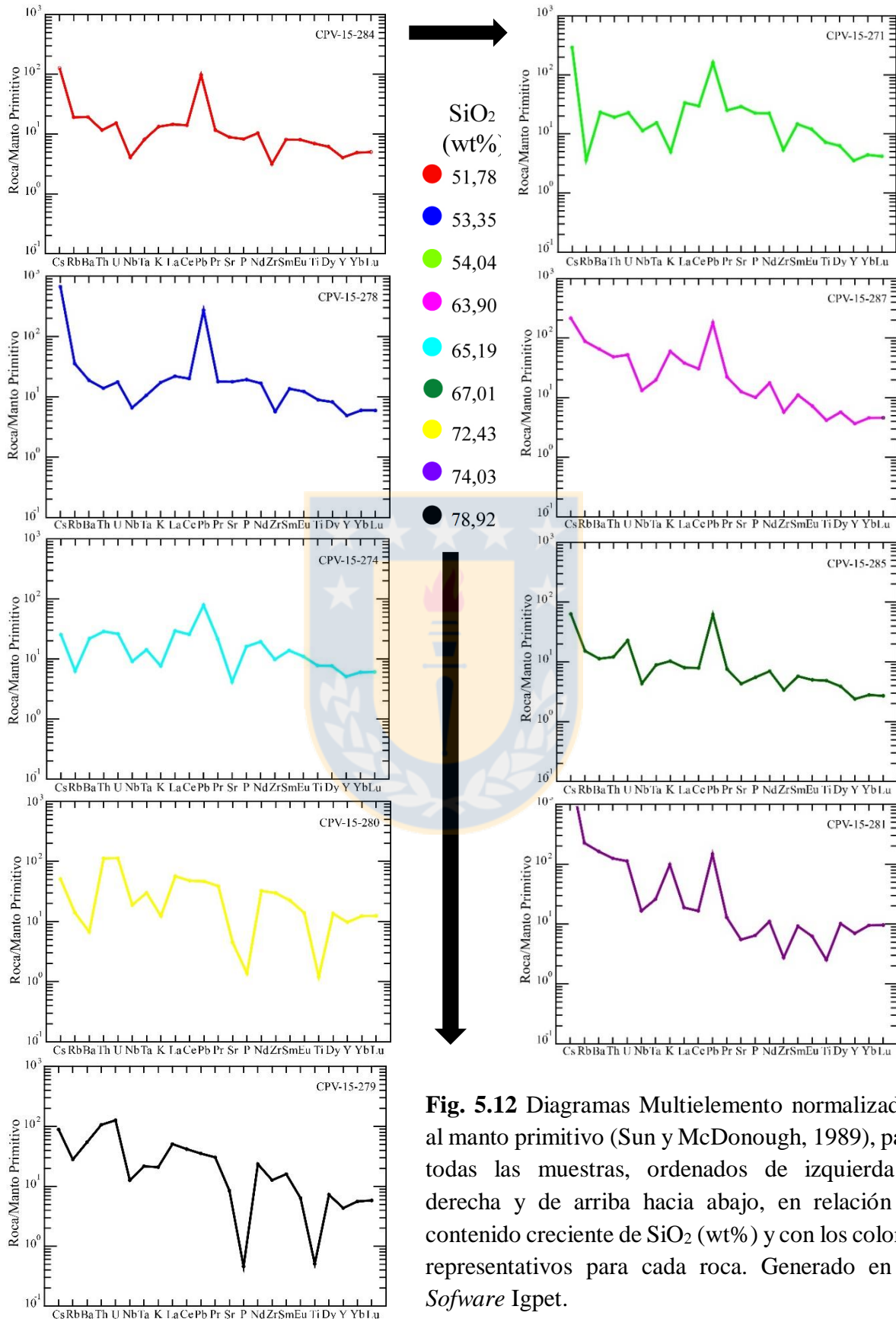
En la figura 5.11 se puede observar un patrón claro donde los elementos incompatibles (hacia la izquierda), se encuentran enriquecidos frente a los compatibles (hacia la derecha) (muy similar al comportamiento que mostraban las REE) el cual corresponde a un patrón típico de rocas provenientes de la corteza continental. Además se reconocen anomalías positivas de K y Pb, asociadas a un enriquecimiento de estos elementos, y anomalías negativas de Nb, Ta, Rb, Sr, P y Ti.



**Fig. 5.11** Diagrama Multielemento, normalizado al manto primitivo (Sun y McDonough, 1989), en el cual se incluyen todas las muestras.

Las anomalías negativas se encuentran asociadas a la cristalización de fases minerales, compatibles con los elementos que presentan dichas anomalías. En el caso del Rb y Sr, las depresiones en el diagrama se deben a la cristalización de feldespatos calcosódicos y potásicos respectivamente. La anomalía observada de P se relaciona con la cristalización de apatito, mientras que la de Ti al fraccionamiento de ilmenita o rutilo.

En relación a la figura 5.12, en la cual se presentan los diagramas multielemento para todas las muestras, ordenados de menor a mayor contenido en  $\text{SiO}_2$  (wt%), se puede concluir que las anomalías de Nb y Ta, se mantienen constantes en todas las muestras y por ende estas, se producirían por procesos de fraccionamiento en la fuente. En el caso del Rb, no se observa una relación entre la aparición de la anomalía (o del aumento de esta), con el incremento en el contenido de sílice, al contrario de lo que ocurre con el Sr y el P, cuyas anomalías comienzan a observarse a partir de la muestra CPV-15-287 ( $\text{SiO}_2 = 63.90$  wt%) y se vuelven más pronunciadas en muestras más diferenciadas. Finalmente, para el Ti se observa que su anomalía es notoria a partir de la muestra CPV-15-279 ( $\text{SiO}_2 = 72.43$  wt %) y se remarca aún más en las muestras con mayor concentración de sílice.





### 5.3.4 Diagramas de discriminación tectónica

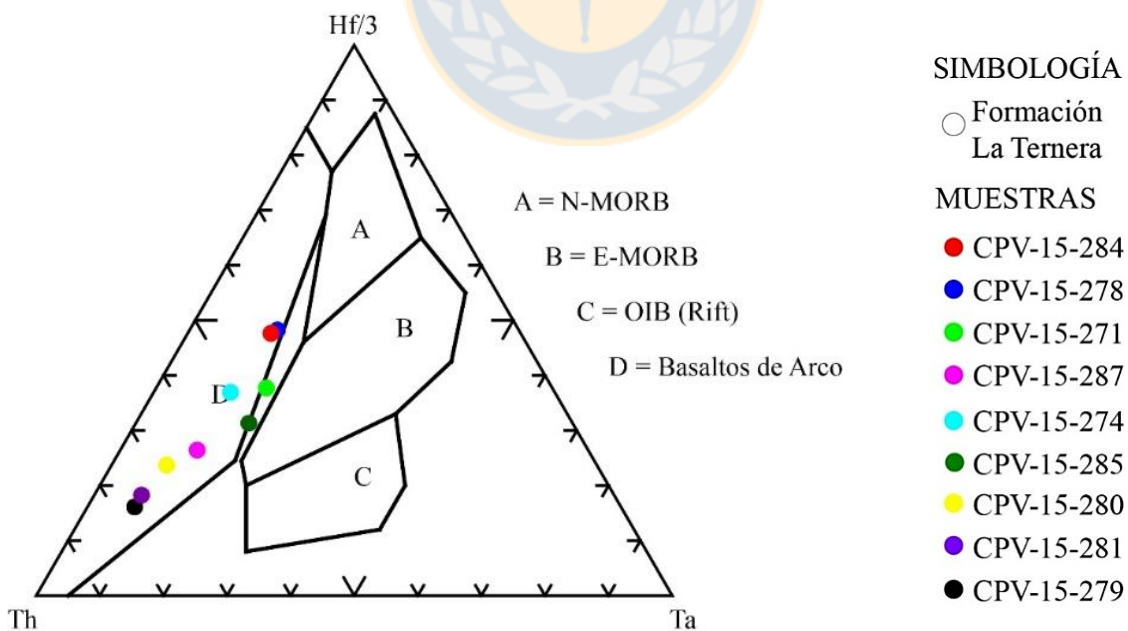
Este tipo de diagramas como bien dice su nombre, sirven para discriminar entre diferentes ambientes tectonomagmáticos, mediante el análisis de determinados elementos traza, que son sensibles a procesos petrológicos específicos de un ambiente u otro.

#### 5.3.4.1 Diagrama Th – Hf/3 – Ta para rocas basálticas

La utilización de estos tres elementos se debe a que, según Wood (1980) estos no son susceptibles a procesos de contaminación cortical, por lo que la construcción del diagrama sirve para discriminar el ambiente magmático en el que se habrían formado las rocas de composición basáltica.

En el caso de las muestras en estudio, según petrografía solo dos muestras corresponden a basaltos, teniendo las otras, composiciones más diferenciadas, sin embargo, según Wood y otros (1979) la utilización del diagrama puede extrapolarse a muestras de composiciones más félsicas.

En la figura 5.13, todas las muestras presentan un patrón empobrecido en Ta, que se mueve desde zonas enriquecidas en Th a zonas enriquecidas en Hf. De las 9 rocas en estudio 7 caen en el campo de basaltos de arco, mientras que las restantes se encuentran muy próximas a este.

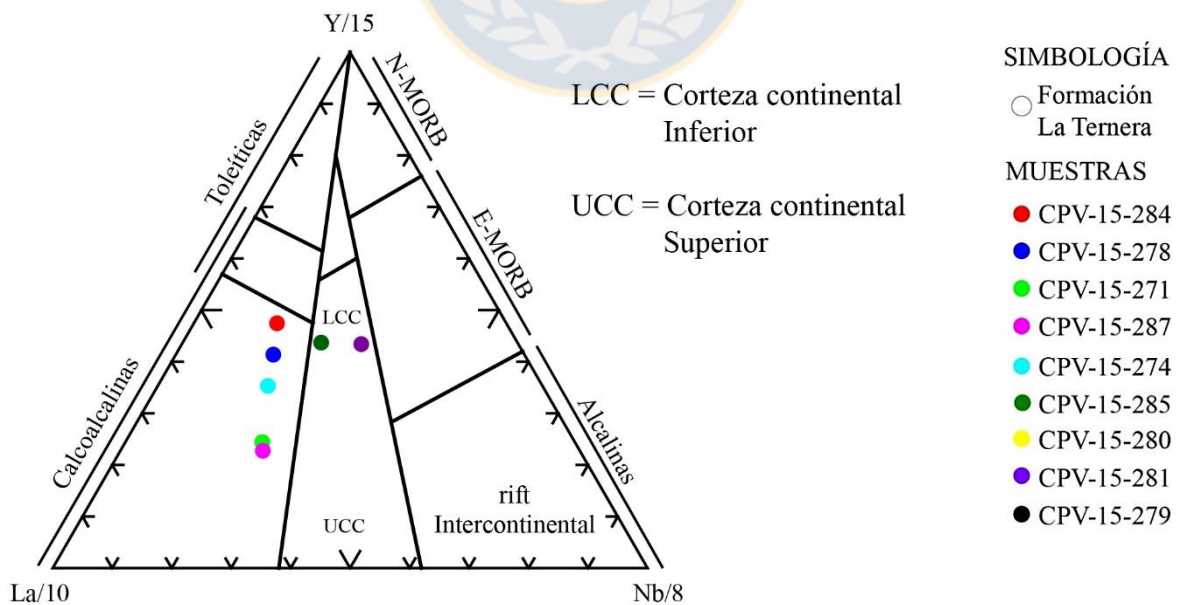


**Fig. 5.13** Diagrama de discriminación tectónica Th – Hf/3 – Ta para rocas basálticas (Wood, 1980).

### 5.3.4.2 Diagrama La/10 – Y/15 – Nb/8 para rocas basálticas.

Cabanis y Lecolle (1989), idean un diagrama de discriminación tectónica donde el segmento La-Y discierne entre magmas calcoalcalinos o toleíticos, que se originan en zonas orogénicas compresivas, en bordes de placa destructivos. Por otro lado, el segmento Y-Nb, discrimina magmas generados en zonas distensivas, intraplacas y anorogénicas. Finalmente, se observa un dominio intermedio que representa a magmas generados en zonas compresivas o distensivas, intracontinentales, tardi o post-orogénicas.

De las muestras en estudio sólo dos corresponden a basaltos, sin embargo considerando el diagrama de Winchester & Floyd (1977) (Fig. 5.1.B) y la coincidencia de elementos entre ambos diagramas (ambos utilizan Y y Nb), podemos considerar a 7 de las 9 muestras con composición basáltica (las dos restantes CPV-15-280 y CPV-15-279, poseen composición riolítica, por lo que no serán utilizadas); todo esto sólo como una forma de darle representatividad al diagrama en cuestión. Sobre la premisa antes planteada, se grafican las 7 muestras, siendo las más representativas CPV-15-271 y CPV-15-284 (basaltos definidos por petrografía); ambas caen en el campo calcoalcalino de zonas orogénicas compresivas. De las demás muestras sólo la CPV-15-285 Y CPV-15-281, se encuentran dentro del dominio intermedio, específicamente en la zona de corteza continental inferior, cayendo todas las restantes en el campo calcoalcalino al igual que los basaltos.



**Fig. 5.14** Diagrama de discriminación tectónica La/10 – Y/15 – Nb/8 para rocas basálticas (Cabanis y Lecolle, 1989).

## **5.4 FORMACIÓN LA TERNERA Y OTRAS UNIDADES TRIÁSICAS**

En el presente subcapítulo se procede a realizar una comparación entre la Formación La Ternera de edad 220 Ma (Espinoza y otros, en prep.) y 3 formaciones de edad similar, como lo son la Formación Cerro Guanaco, la Formación Quebrada del Salitre y la Formación La Totora; la primera de edad 213 – 200 Ma (González y otros, 2015), la segunda con una edad de 232,9 Ma (Cornejo y otros, 2009), sin embargo según fauna fósil registrada en el mismo trabajo, podría existir una continuidad en las litofacies hasta el límite Triásico – Jurásico. Mientras que, la tercera posee una edad de 217 Ma (Salazar, 2013).

### **5.4.1 Comparación petrográfica entre Formación La Ternera y Formación Cerro Guanaco.**

#### **5.4.1.1 Basaltos**

Según el análisis petrográfico realizado para ambas formaciones (Anexo I y Anexo II (muestras memoria Celis, 2018)), estas presentan basaltos de olivino y ortopiroxeno. Para los basaltos de La Ternera, se reconocen texturas porfídicas, pilotaxíticas e intergranulares mientras que para Cerro Guanaco, vitrofídicas y pilotaxíticas.

En lo que respecta a la mineralogía, esta es bastante similar entre ambas formaciones. Contenidos variables de plagioclasa, principalmente euhedrales con alteración a arcillas y calcita. El olivino y ortopiroxeno, se presentan con formas anhedrales y alterados a iddingsita en el caso de La Ternera y a talco en Cerro Guanaco. La diferencia más notoria entre los basaltos de ambas formaciones corresponde al, contenido de vidrio volcánico; en los basaltos de la formación en estudio el contenido es nulo, mientras que, en Cerro Guanaco, este llega a 40 – 43 % y se presenta desvitrificado y alterado a calcita. El porcentaje de opacos es bajo para las dos formaciones y de forma anhedral.

#### **5.4.1.2 Andesitas**

Por el lado de la Formación La Ternera, esta presenta andesitas y andesitas basálticas mientras que la Formación Cerro Guanaco, andesitas, andesitas de anfíbol y andesitas de biotita. Texturalmente la formación en estudio posee andesitas porfídicas, glomeroporfídicas, pilotaxíticas e intersertales; en cambio Cerro Guanaco presenta mayormente texturas vitrofídicas y afaníticas, localmente pilotaxíticas y glomeroporfídicas.

Mineralógicamente, ambas formaciones presentan contenidos variables de plagioclasa euhedral a subhedral (más euhedral para La Ternera y subhedral para Cerro Guanaco), alterada a arcillas y calcita, anfíbol y biotita, euhedrales a subhedrales (cada una, >5% para Cerro Guanaco y <5% para La Ternera), alteradas a clorita y epidota. En relación con el vidrio volcánico, todas las andesitas de Cerro Guanaco lo presentan en un porcentaje variable de 42 – 60 %, mientras que sólo una andesita de La Ternera presenta vidrio igual a un 19 %. La diferencia más notoria entre ambas formaciones corresponde a la presencia de olivino que posee la Formación La Ternera en sus andesitas basálticas, mineral que se encuentra ausente en las andesitas de Cerro Guanaco. Por su parte esta última presenta contenidos mínimos de cuarzo, hecho que en la Ternera no ocurre.

#### 5.4.1.3 Lapillitas tobáceas

La Formación La Ternera presenta lapillitas tobáceas (Fig. 5.17.A) mientras que Cerro Guanaco además de tener este tipo de roca (Fig. 5.17.B), también registra lapillitas. Respecto a las primeras, la unidad en estudio muestra una fábrica matriz soportada y textura fragmental, por su parte Cerro Guanaco, una fábrica clasto soportada y textura fragmental.

En relación a los componentes de las lapillitas tobáceas, La Ternera no presenta cristales, sólo líticos de escoria y andesita, además de vidrio masivo, moderadamente desvitrificado y alterado a calcita. Cerro Guanaco, sí presenta cristales de plagioclasa, cuarzo y opacos (la primera fracturada, el cuarzo subanguloso y los opacos angulosos), además de líticos volcánicos ácidos y andesíticos, y al igual que La Ternera vidrio masivo desvitrificado y alterado a calcita.

Como comentario final respecto a la comparación petrográfica hecha para las formaciones mencionadas, se puede decir sobre la base de las muestras recopiladas, que la Formación La Ternera presenta además de las litologías descritas, dacitas, tobas cristalinas, tobas líticas, tobas vítreas y areniscas, éstas últimas le otorgan una componente sedimentaria a la formación, a diferencia de la Formación Cerro Guanaco, para la cual sólo se registraron rocas volcánicas y volcanoclásticas.

#### **5.4.2 Comparación geoquímica entre las formaciones, La Ternera, Cerro Guanaco, Quebrada del Salitre y La Totorá.**

A continuación, se procede a realizar una comparación desde un punto de vista geoquímico entre las formaciones ya mencionadas. Para esto se escogieron 2 diagramas, los cuales corresponden al

REE normalizado al condrito y al Multielemento normalizado al manto primitivo (ambos de Sun y McDonough, 1989).

#### 5.4.2.1 Diagrama REE normalizado al condrito

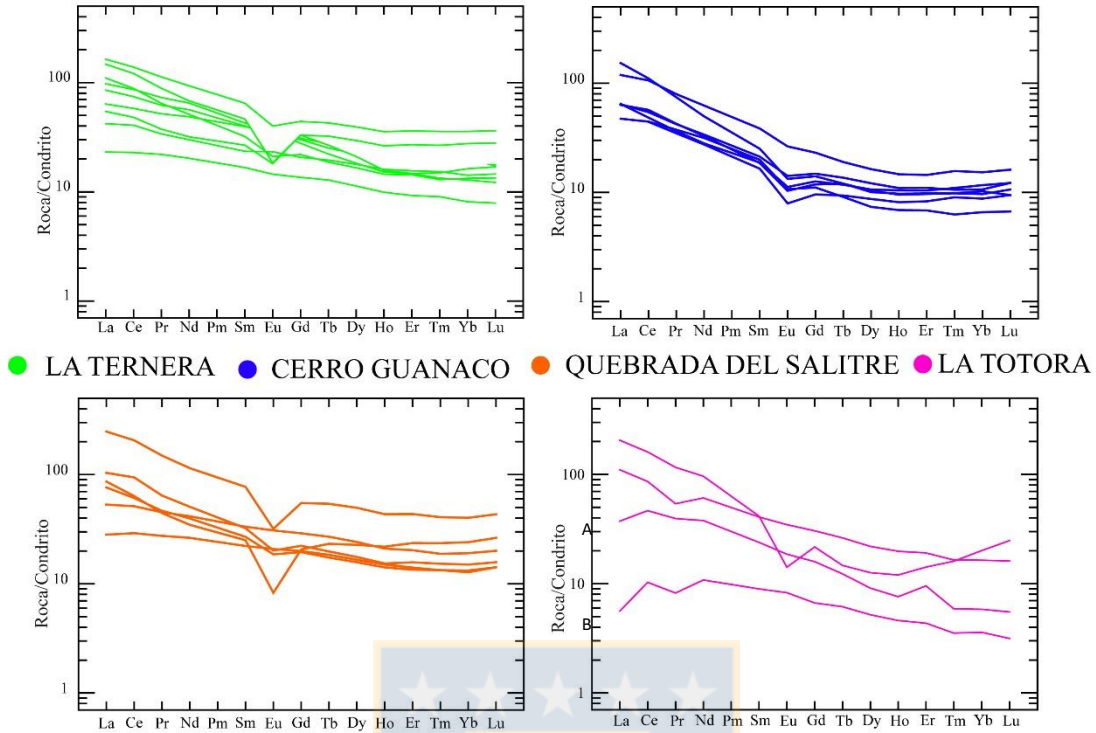
Según se observa en la figura 5.15, las formaciones La Ternera, Cerro Guanaco y Quebrada del Salitre presentan el patrón típico (pendiente negativa) de magmas provenientes de la corteza continental, donde las LREE se encuentran enriquecidas frente a las HREE, además en los 3 diagramas de estas formaciones se pueden notar anomalías negativas de Eu, las que reflejan un fraccionamiento de plagioclasa. Con respecto a esto último, es posible observar que, para la Formación Cerro Guanaco, todas las muestras presentan anomalías negativas de Eu, en mayor o menor medida; lo que no ocurre en las dos restantes. Específicamente para la Formación La Ternera, se observan patrones sin anomalía o incluso anomalías levemente positivas para el elemento en discusión, mientras que, para Quebrada del Salitre, 4 muestras presentan un patrón deprimido en el Eu y las otras dos restantes sin anomalía. En relación a la Formación La Tatora, al igual que las anteriores presenta un patrón de rocas continentales y anomalía de Eu para 1 de las muestras, sin embargo, a diferencia de las otras formaciones se identificó anomalías de La y Pr para las muestras con menor contenido en SiO<sub>2</sub> (wt%) (Fig. 5.15, Formación La Tatora, patrones A y B).

#### 5.4.2.2 Diagrama Multielemento normalizado al manto primitivo

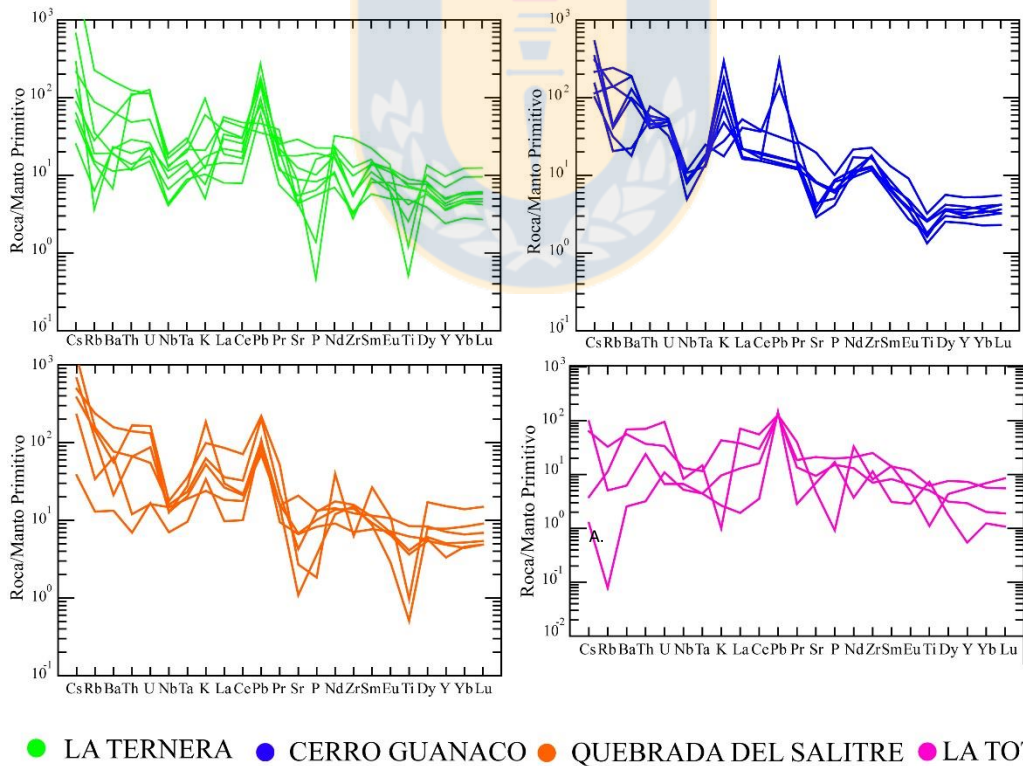
De la figura 5.16, se desprende que los 4 diagramas presentan una tendencia característica (pendiente negativa) de rocas provenientes de corteza continental, en la cual los elementos incompatibles (hacia la izquierda) se encuentran enriquecidos frente a los compatibles (hacia la derecha).

Como se ve en la figura 5.16, todos los diagramas presentan anomalías tanto positivas como negativas de algunos elementos como el K, Rb, Nb, Ta, Pb, Sr, P y Ti, las cuales corresponden a las que más se destacan. En relación con el K, Cerro Guanaco y Quebrada del Salitre, muestran marcadas anomalías positivas de este elemento, mientras que, en el caso de La Ternera se dan anomalías negativas y positivas. Para el Rb, las 4 formaciones tienen un comportamiento similar, dominando las anomalías negativas en las rocas de composición más básica. El Nb y el Ta, se comportan de la misma forma para las 4 formaciones, mostrando anomalías muy negativas. En lo



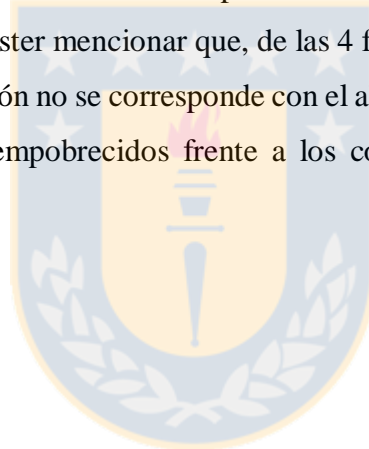


**Fig. 5.15** Diagrama comparativo de REE normalizado al condrito, formaciones triásicas.



**Fig. 5.16** Diagrama comparativo Multielemento normalizado al manto primitivo para las formaciones triásicas.

que atañe al Pb, Quebrada del Salitre, La Ternera y La Totora, muestran un comportamiento muy parecido, donde la anomalía de este elemento es marcadamente positiva en la mayoría de las muestras, a diferencia de Cerro Guanaco, en la cual sólo dos presentan dicha anomalía y las restantes, se presentan sin anomalía positiva ni negativa. Respecto al P, se reconoce una anomalía negativa para todas las muestras de Cerro Guanaco a diferencia de Quebrada del Salitre, en la cual se dan anomalías positivas y negativas, de la misma forma ocurre en la Formación La Totora y La Ternera, teniendo esta última marcadas anomalías negativas de P. Finalmente el Ti, muestra anomalías negativas para todas las muestras de Cerro Guanaco, lo mismo ocurre con Quebrada del Salitre, la única diferencia es que esta última presenta marcadas depresiones en el Ti. En relación con el comportamiento de La Ternera asociado al Ti, la mayoría de sus muestras son anómalamente negativas, con un par muy negativo y sólo 1 presenta una anomalía levemente positiva. Por último, en relación con el Ti la Formación La Totora presenta anomalías negativas y positivas de este elemento. Finalmente, es menester mencionar que, de las 4 formaciones, La Totora es la única que presenta una muestra cuyo patrón no se corresponde con el ahora observado, es decir los elementos incompatibles se encuentran empobrecidos frente a los compatibles (Fig. 5.16, Formación La Totora, Patrón A).



## 6 DISCUSIÓN

A continuación, se presentan las interpretaciones geoquímicas y petrográficas obtenidas a partir de los capítulos 4 y 5; las que estarán enfocadas en 3 ejes principales, la determinación del ambiente geotectónico, espesor cortical y la comparación con otras unidades triásicas.

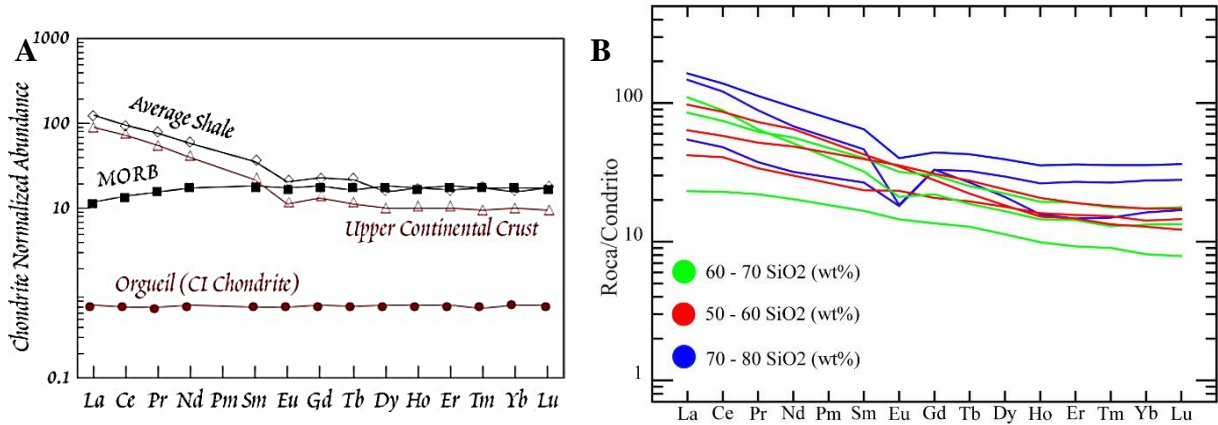
### 6.1 AMBIENTE GEOTÉCTÓNICO

Petrográficamente, la formación en estudio presentó diversas litologías, desde basaltos a dacitas, tobas basálticas a riolíticas y areniscas; dominando las composiciones básicas a intermedias y texturas mayormente porfídicas acompañadas de una componente pilotaxítica, para las rocas volcánicas, texturas fragmentales y fabrica matriz soportada para las volcanoclásticas y finalmente texturas clásticas y fabrica clasto soportada para las rocas sedimentarias.

Según la figura 5.3 la mayoría de las muestras corresponden a rocas subalcalinas, a partir de la línea divisoria entre rocas alcalinas y subalcalinas, propuestas por Irvine y Baragar (1971); y todas ellas clasifican como rocas calcoalcalinas a partir del diagrama AFM, de los mismos autores (Fig. 5.4) considerando la pérdida de álcalis, producto de la alteración de los feldespatos.

En relación con los diagramas de variación (Diagramas Harker), elementos como el Al, Ti, Mg, Fe, Ca, Mn y P, muestran una tendencia (pendiente negativa) con el aumento del SiO<sub>2</sub> (wt%), por ende, se puede relacionar este comportamiento con la diferenciación, lo que indica que la cristalización fraccionada es un proceso que participa en la evolución magmática de La Formación La Ternera. En el caso del K y Na, el primero presenta tendencias positivas con el aumento del SiO<sub>2</sub> (wt%) (esto debido a su naturaleza incompatible y muy móvil) mientras que en relación al Na, no se observa un comportamiento claro. Las tendencias negativas de elementos como el Mg y Fe se deben al fraccionamiento de ferromagnesianos. La cristalización de plagioclasa explica la disminución del Ca y Al con el aumento del SiO<sub>2</sub> (wt%) y, por último, el fraccionamiento de ilmenita y apatito es el responsable del patrón negativo de Ti y P respectivamente.

Las REE muestran un patrón generalizado para todas las muestras, donde las LREE se encuentran enriquecidas frente a las HREE, característica propia de rocas de la corteza continental. En la figura 6.1 se observa la similitud que existe entre el patrón para composiciones promedio de rocas corticales (White, 2011) y los patrones obtenidos para las rocas en estudio. En relación con la anomalía de Eu, esta no se presenta en todas las muestras, sino que más bien aparece en una etapa

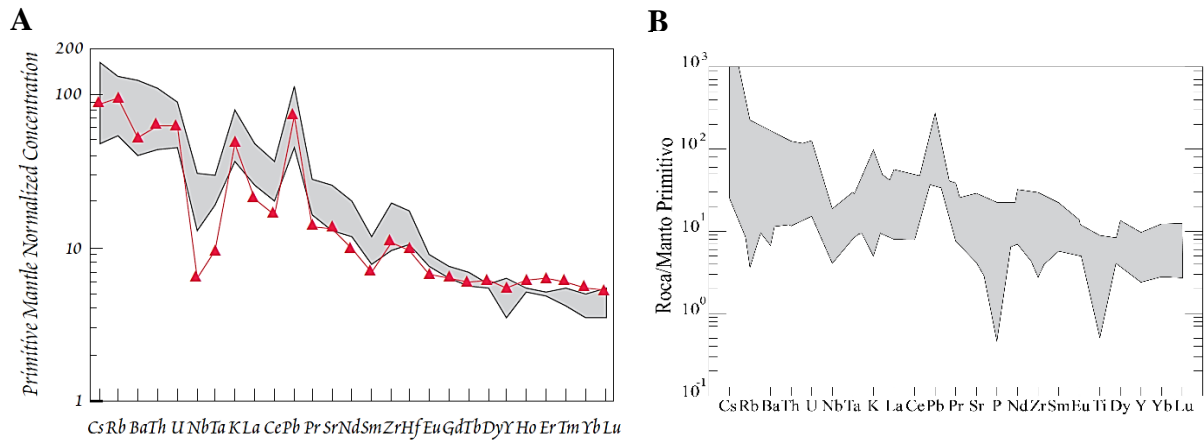


**Fig. 6.1** A: Diagrama REE normalizado al condrito para **A**: composiciones promedio de rocas corticales y MORB (White, 2011) **B**: rocas de la Formación la Ternera.

determinada durante la diferenciación ( $\text{SiO}_2$  63 – 64 (wt%)) y a partir de ahí, se vuelve más negativa a porcentajes mayores de sílice, como queda en evidencia en la figura 5.7 y 5.10. Considerando lo anterior, las condiciones de fugacidad de oxígeno fueron altas, puesto que el Eu no ingresó a la plagioclasa en las primeras etapas de cristalización, y por lo tanto no se produjo un descenso de este elemento en el magma.

El diagrama multielemento normalizado al manto primitivo, muestra un enriquecimiento de elementos LILE con respecto a los HFSE, patrón típico de rocas de la corteza continental (señal calcoalcalina, característica de márgenes convergentes). En la figura 6.2, se puede observar la similitud que existe entre el patrón dado por las composiciones promedio de rocas corticales (Fig. 6.2.A (gris)) y los patrones de las rocas de La Formación la Ternera (Fig. 6.2.B). Ahora, la semejanza entre las rocas corticales y las del Arco de Banda (Fig. 6.2.A), sugiere que el principal proceso formador de corteza es el magmatismo en zonas de subducción (White, 2011). Considerando las sentencias anteriores, es plausible decir que las rocas de La Formación la Ternera podrían haberse generado en un ambiente geotectónico dominado por la subducción.

Con respecto a las depresiones observadas en el diagrama multielemento (Fig. 5.11), destacan las anomalías negativas de Nb – Ta, K, Rb, Sr, P y Ti; y la anomalía positiva de Pb (la que se observa en prácticamente todas las muestras). De las anomalías negativas, la más importante corresponde a las del Nb – Ta, pues corresponde a un rasgo geoquímico característico de rocas generadas en un ambiente geotectónico de subducción (Pearce, 1983), además como se observa en la figura 5.12,



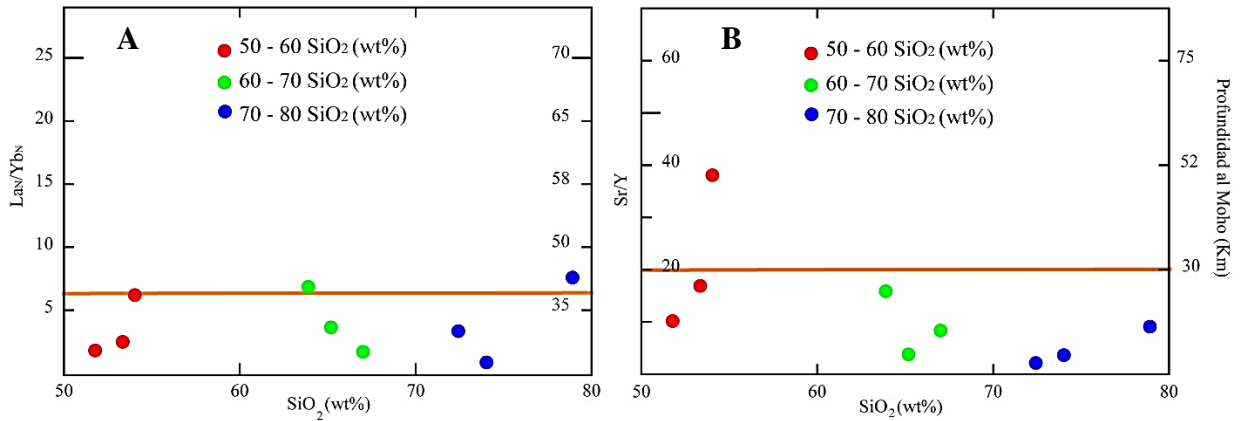
**Fig. 6.2** Diagrama multielemento normalizado al manto primitivo para **A**: composiciones promedio de rocas corticales (gris) (White, 2011) y andesitas del arco de Banda (rojo) **B**: rocas en estudio.

la anomalía se presenta en todas las muestras y no sufre mayores cambios producto de la diferenciación, por lo que es posible afirmar que, se originaría debido a procesos de fraccionamiento en la fuente del magma que dio origen a las rocas en estudio.

Una vez establecida la naturaleza cortical y continental de las rocas de La Formación la Ternera, es importante ahondar sobre las características de la corteza en la cual se formaron. Según Profeta y otros (2015), razones bajas de Sr/Y y La/Yb reflejan un arco delgado, en el cual no existe fraccionamiento de granate, por lo que las HREE (representadas por el Yb) no disminuyen en el residuo y a presiones menores (<1GPa) predomina la cristalización de plagioclasa (Sr se vuelve más compatible e Y más incompatible). En la figura 6.3 se observa que, para las rocas en estudio, ambas razones son bajas y que la mayoría de las muestras reflejan un espesor cortical entre 30 – 35 km.

Sobre la base de lo antes expuesto, hasta ahora todo indica que La Formación la Ternera se habría extruido en un corteza adelgazada y dominada por un ambiente de subducción. Como una forma de reafirmar la idea anterior, se presentan los diagramas de discriminación tectónica de Cabanis y Lecolle (1989) y Wood (1980). En el primero (Fig. 6.4.A) la mayoría de las muestras caen en el campo de rocas orogénicas calcoalcalinas, lo que se condice con lo antes expuesto en la presente discusión, mientras que dos muestras se presentan en el campo LCC, lo que podría estar relacionado al espesor cortical explicado en el párrafo anterior.

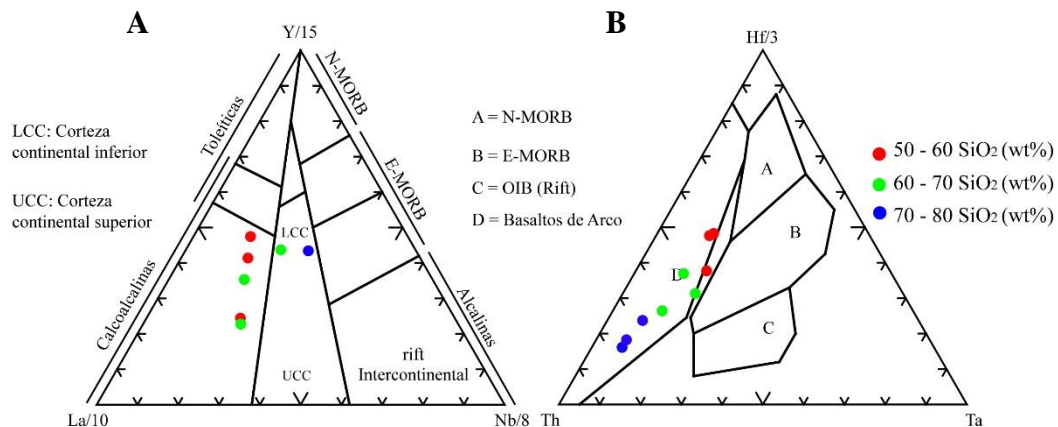




**Fig. 6.3** Razones **A:**  $La_N/Yb_N$  y **B:**  $Sr/Y$ ; para rocas de La Formación la Ternerá. Las líneas marrones indican el espesor cortical aproximado según la mayoría de las muestras.

En el segundo diagrama (Fig. 6.4.B), gran parte de las muestras caen en el campo D (Basaltos de arco). Si bien no todas las muestras corresponden a basaltos, Wood (1980) plantea que el diagrama puede ser utilizado para rocas de composiciones más ácidas. A partir de lo observado en la figura, las muestras corresponderían a rocas de arco, lo que va en la misma línea con la figura 6.4.A.

Finalmente, en relación con el ambiente tectónico, según los patrones observados para las REE y en los diagramas multielemento; diagramas de discriminación tectónica y los mostrados para determinar espesor cortical, las rocas de La Formación La Ternerá se habrían originado en una corteza de espesor 30 – 35 km, dominada por una tectónica de subducción.



**Fig. 6.4** Diagramas de discriminación tectónica **A:**  $La/10 - Y/15 - Nb/8$  (Cabani y Lecolle, 1989) **B:**  $Th - Hf/3 - Ta$  (Wood, 1980).

## 6.2 FORMACIÓN LA TERNERA Y OTRAS UNIDADES TRIÁSICAS

A continuación, se procede a realizar un análisis respecto a las similitudes y diferencias petrográficas y tectónicas, que presenta La Formación la Ternera con otras dos formaciones triásicas como lo son, Cerro Guanaco (muestras memoria Celis, 2018) y Quebrada del Salitre.

### 6.2.1 Petrografía Formación La Ternera y Formación Cerro Guanaco

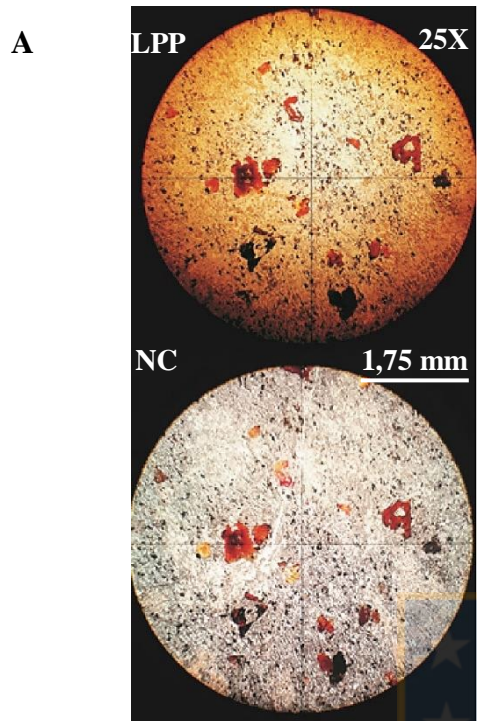
A grandes rasgos, Cerro Guanaco se caracteriza como una sucesión de rocas volcánicas y volcanosedimentarias (Gonzales y otros, 2015), mientras que La Ternera, además de presentar estos dos componentes litológicos, también presenta un miembro inferior sedimentario (el superior corresponde a litologías volcánicas y piroclásticas) (Sepúlveda y Naranjo, 1982).

En relación con las rocas volcánicas, se describieron basaltos y andesitas para ambas formaciones. Los basaltos (Fig. 6.5) presentan olivino y ortopiroxeno, con contenidos variables entre las unidades (si es  $>5\%$  se le otorga al basalto, el nombre del mineral), además de presencia variable de plagioclasa para las dos secuencias. La diferencia más notoria para esta litología corresponde al vidrio volcánico observado en Cerro Guanaco e inexistente para La Ternera y además diferencias texturales; porfídicas e intergranulares para la formación en estudio y vitrofídica en Cerro Guanaco.

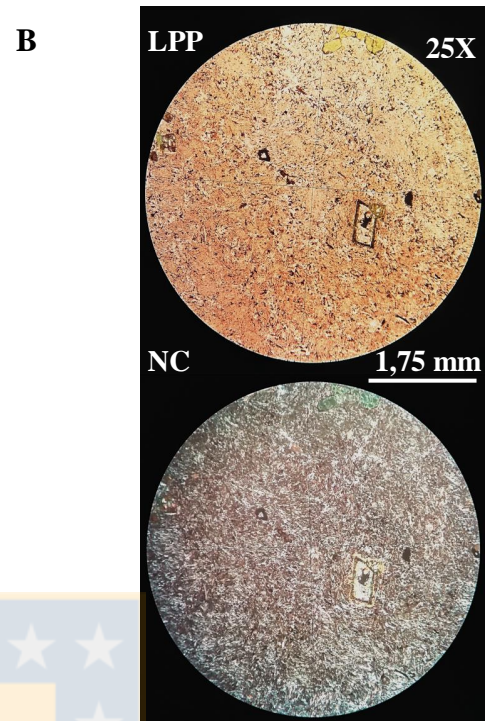
Respecto a las andesitas (Fig 6.6), la formación en estudio posee andesitas y andesitas basálticas, esta última litología no fue descrita para Cerro Guanaco, el que presenta andesitas de anfíbol y biotita, minerales que fueron observados en ambas unidades, sin embargo, en un porcentaje  $>5\%$  para esta última. La presencia de plagioclasa es común para ambas secuencias a diferencia del vidrio volcánico, el que está mucho más presente en las andesitas de Cerro Guanaco (42 – 60 %) que en las de La Ternera (~19% y no en todas las muestras). Texturalmente, esta última se caracteriza por andesitas porfídicas y glomeroporfídicas; en cambio Cerro Guanaco presenta mayormente texturas vitrofídicas y afaníticas.

En relación con la componente volcanosedimentaria, la única litología en común que presentan las formaciones corresponde a lapillita tobácea (Fig. 6.7), con textura fragmental para ambas secuencias y una fábrica clasto soportada en Cerro Guanaco mientras que, para La Ternera, matriz soportada. Composicionalmente, esta última sólo presenta líticos de andesítica, escoria y vidrio volcánico. Cerro Guanaco, posee líticos volcánicos ácidos y andesíticos, vidrio volcánico, cristales

## Formación La Ternera

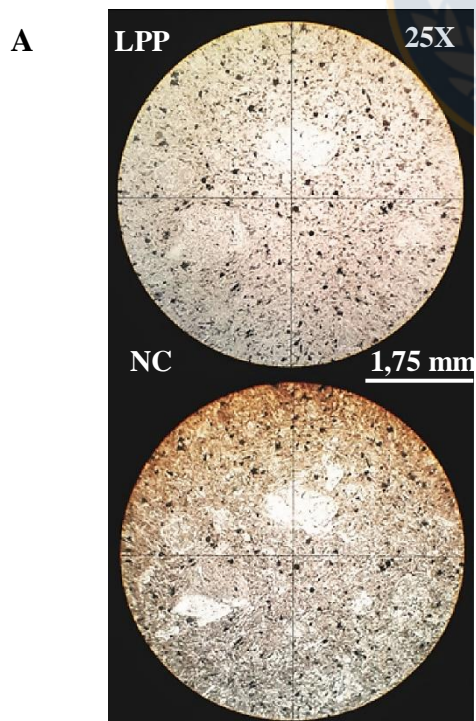


## Formación Cerro Guanaco

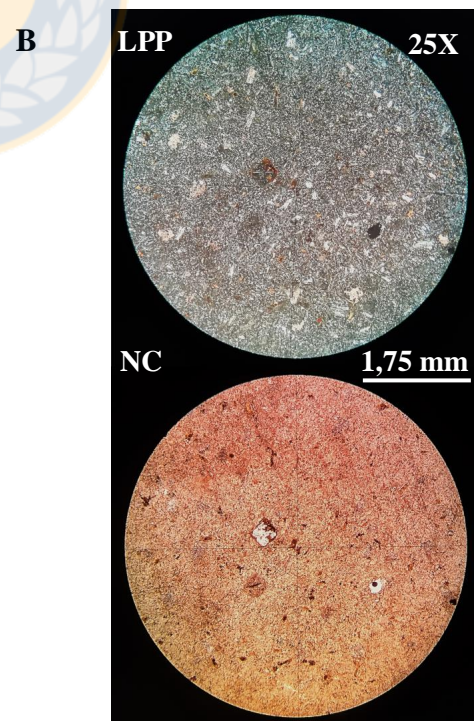


**Fig. 6.5** **A:** Basalto de olivino y ortopiroxeno (CPV-15-271, Anexo I). **B:** Basalto de olivino y ortopiroxeno (CPV-14-164, Anexo II).

## Formación La Ternera



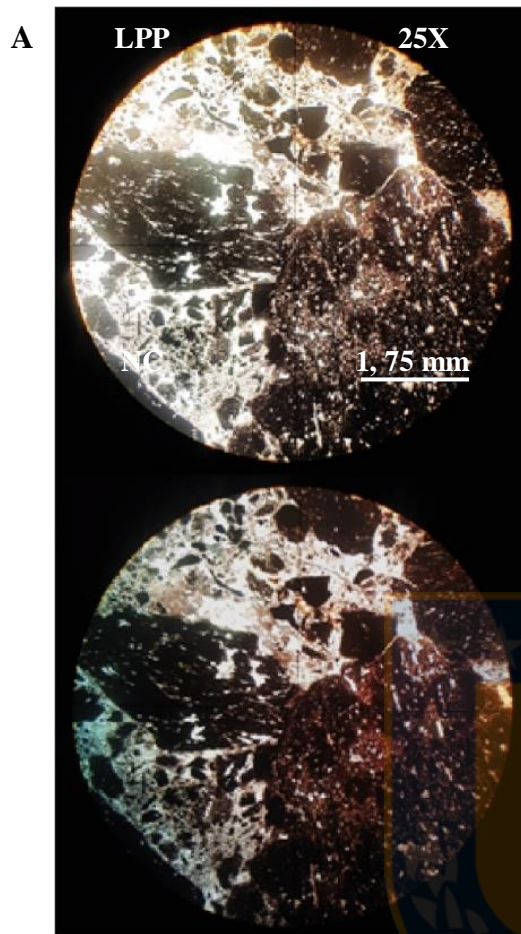
## Formación Cerro Guanaco



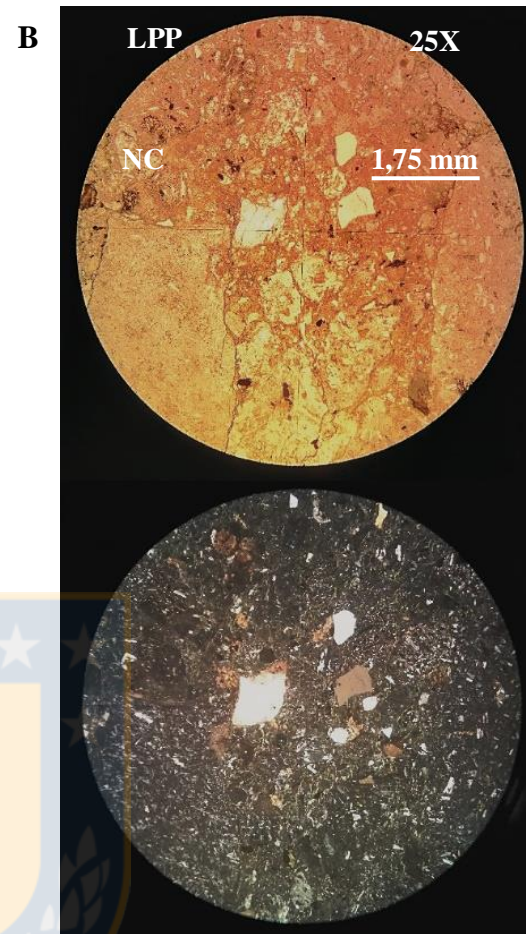
**Fig. 6.6** **A:** Andesita (CPV-15-277, Anexo I) **B:** Andesita (CPV-14-167, Anexo II).



### Formación La Ternera



### Formación Cerro Guanaco



**Fig. 6.7** **A:** Lapillita tobácea (CPV-15-273, Anexo I) **B:** Lapillita tobácea (CPV-14-157, Anexo II).

de plagioclasa, cuarzo y opacos, esto último hace la diferencia entre ambas formaciones para la litología en análisis.

A continuación, se presenta una tabla comparativa entre la petrografía de la Formación La Ternera y la Formación Cerro Guanaco.

#### 6.2.2 Ambiente geotectónico Formación Cerro Guanaco, Quebrada del Salitre y La Totorá

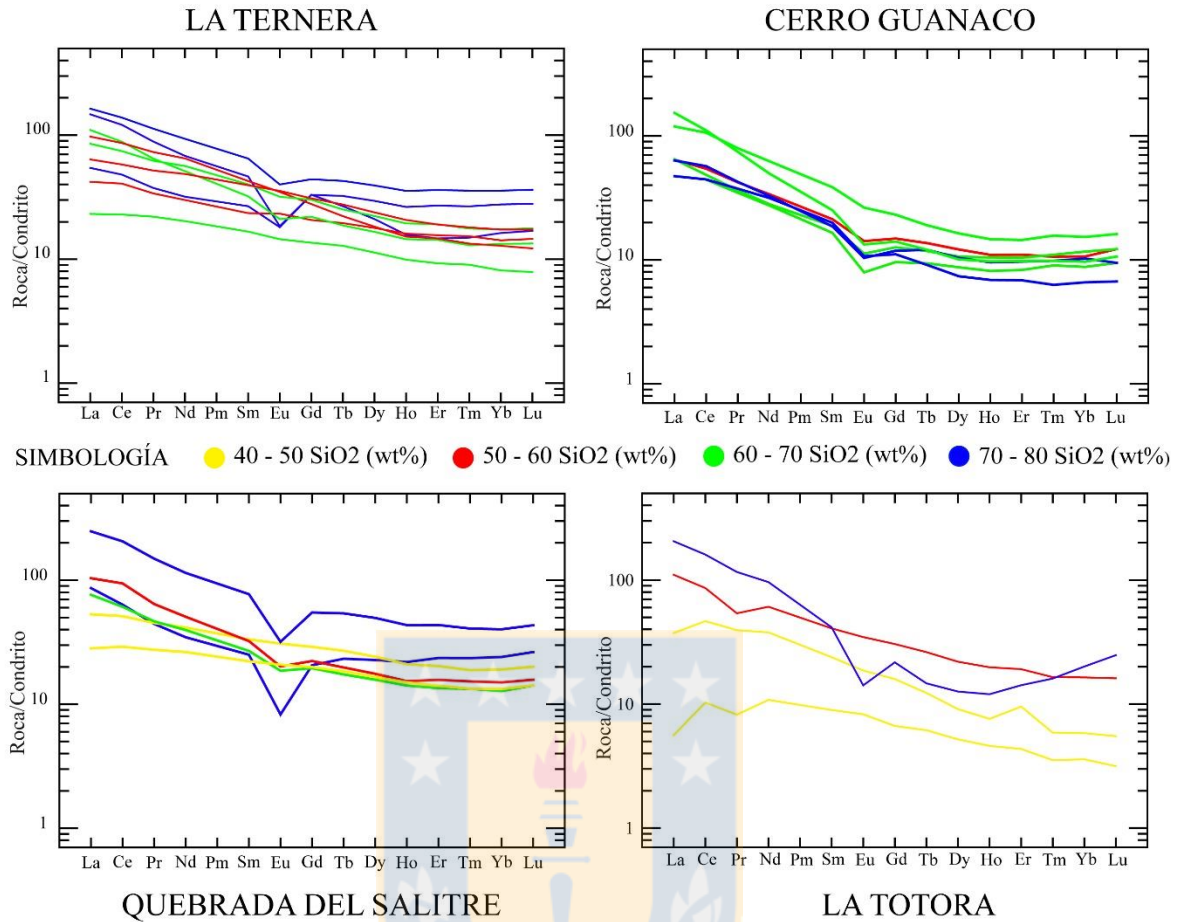
A partir de la comparación geoquímica realizada en el capítulo anterior, entre La Formación la Ternera y las otras 3 formaciones triásicas, (Análisis químico: Cerro Guanaco, extraído de la memoria Celis, 2018; La Totorá, memoria Valin, 2014; Quebrada del Salitre, informe final Tópicos avanzados de Geología Larrère y Yévenes, 2017) se procede a analizar su ambiente tectónico.

**Tabla 6.1:** Comparación petrográfica entre las unidades señaladas.

<b>COMPARACIÓN PETROGRÁFICA</b>		
<b>Criterios</b>	<b>Formación La Ternera</b>	<b>Formación Cerro Guanaco</b>
<b>Rocas</b>	<b>Volcánicas, Volcanoclásticas y Sedimentarias</b>	<b>Volcánicas y Volcanoclásticas</b>
<b>Litologías</b>	Basalto, Andesitas Basáltica, Andesita, Dacita, Lapillita Tobácea, Toba Vítreo, Toba Cristalina, Toba Lítica y Areniscas.	Basalto, Andesita, Lapillita y Lapillita Tobácea.
<b>Texturas</b>	Porfídica, Glomeroporfídica, Intergralunar, Intersertal, Pilotaxítica, Vitrofídica, Felsofídica, Fragmental, Vitroclástica y Clástica.	Afanítica, Vitrofídica, Glomeroporfídica, Fragmental.
<b>Minerales Principales</b>	Plagioclasa, Olivino, Ortopiroxeno y cantidades menores de anfíbol y cuarzo.	Plagioclasa, biotita, anfíbol y cantidades menores de cuarzo.
<b>Vidrio</b>	<b>Rocas Volcánicas</b>	
	Desvitrificación moderada a fuerte.	Desvitrificación fuerte.
	<b>Rocas Volcanoclásticas</b>	
	Del tipo masivo, fino, polvo vítreo, esquirlas, fiammes; con desvitrificación moderada a fuerte y alteración menor a calcita.	Del tipo masivo y fuertemente desvitrificado y alteración menor a calcita.
<b>Líticos en rocas volcanoclásticas</b>	Volcánicos andesíticos, dacíticos y riolíticos. Líticos de escoria y pómez. Líticos sedimentarios e intrusivos.	Volcánicos andesíticos y ácidos.
<b>Minerales de Alteración</b>	Epidota, iddingsita, clorita, arcillas, cuarzo, calcita, anfíbol, sericita, zeolitas y opacos.	Arcillas, talco, clorita, calcita, epidota, biotita, cuarzo y opacos.

El diagrama de REE (Fig. 6.8) muestra que Cerro Guanaco, Quebrada del Salitre y La Titora, presentan un enriquecimiento de LREE versus HREE, por lo que al igual que la formación en estudio, las rocas de estas dos unidades tendrían un origen cortical y continental. La anomalía de Eu se observa para las 4 formaciones, no obstante, su aparición se da a diferentes rangos de SiO<sub>2</sub>





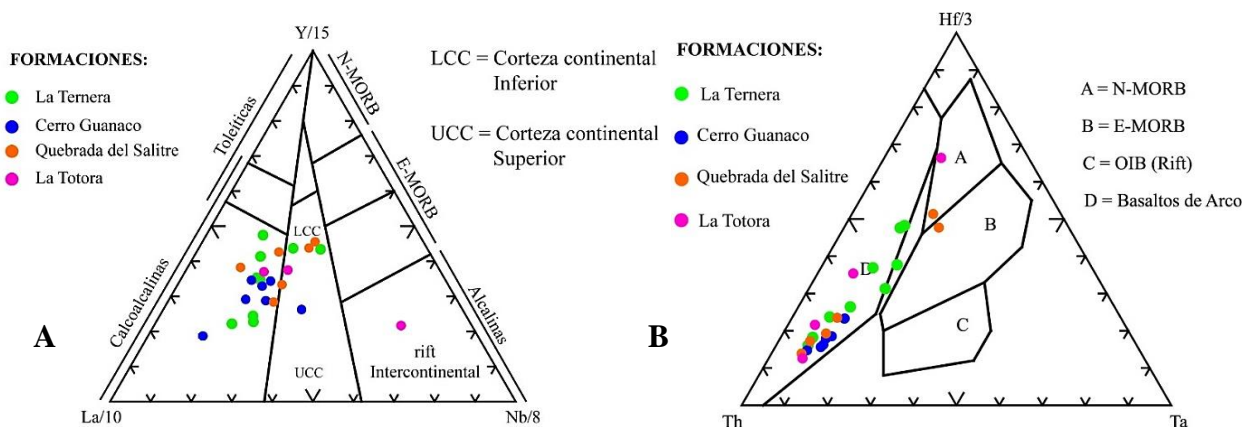
**Fig. 6.8** Diagrama comparativo de REE normalizado al Condrito, para las formaciones triásicas con los rangos de SiO<sub>2</sub> (wt%) para las muestras.

(wt%), lo que indica que la fugacidad de oxígeno y la naturaleza oxidada o reducida del magma, son distintas para cada una de las formaciones. Como ya se mencionó anteriormente para la Formación La Ternera las condiciones de fugacidad de oxígeno fueron altas, puesto que el Eu no ingresó a la plagioclasa en las primeras etapas de cristalización, sino a partir de rangos de SiO<sub>2</sub> (wt%) de 60 – 70, por ende, el magma posee condiciones más bien oxidantes. Para el caso de Cerro Guanaco como se puede observar en la figura 6.8, todas las muestras presentan anomalías de Eu, desde contenidos de SiO<sub>2</sub> (wt%) 50 hasta 80, lo que implica que, para esta formación, la fugacidad de oxígeno fue baja y el elemento tuvo un descenso en el magma desde etapas de cristalización tempranas. La anomalía de Eu para Quebrada del Salitre comienza a expresarse en etapas tempranas de cristalización (50 % SiO<sub>2</sub> (wt)), por lo que el comportamiento del elemento en cuestión se puede considerar análogo a lo que ocurre en Cerro Guanaco. Finalmente, para La

Totora, la anomalía de Eu se expresa sólo en la muestra más diferenciada, por lo que es plausible asemejar el comportamiento de este elemento a lo que ocurre en La Ternera, sin embargo, la cantidad de muestras vuelve complejo realizar dicha analogía.

Los diagramas de discriminación tectónica realizados para las formaciones Cerro Guanaco Quebrada del Salitre y La Totora muestran que para el caso del diagrama Th – Hf/3 – Ta (Fig. 6.9.A), la primera posee todas sus muestras en el campo de rocas de arco mientras que, en la segunda, la mayoría clasifica como basaltos de arco, no obstante, dos caen en el campo MORB. Por último, para La Totora, 3 de sus 4 muestras caen en el campo de rocas de arco y una en el de MORB.

Considerando la figura 6.9.B, la mayoría de las muestras de La Formación Cerro Guanaco, caen en el campo calcoalcalino de rocas orogénicas para el diagrama La/10 – Y/15 – Nb/8, por su parte Quebrada del Salitre, también posee la mayoría de sus muestras en dicho campo, sin embargo, dos de ellas caen en al área intermedia específicamente en la corteza continental inferior, hecho que presenta bastante similitud con los observado en La Formación La Ternera, para el mismo diagrama. Finalmente, para La Totora se observa un comportamiento disperso y no concluyente respecto a su ambiente tectónico pues de las 3 muestras todas caen en campos diferentes: calcoalcalino de rocas orogénicas, intermedio con corteza continental inferior y rift intercontinental.

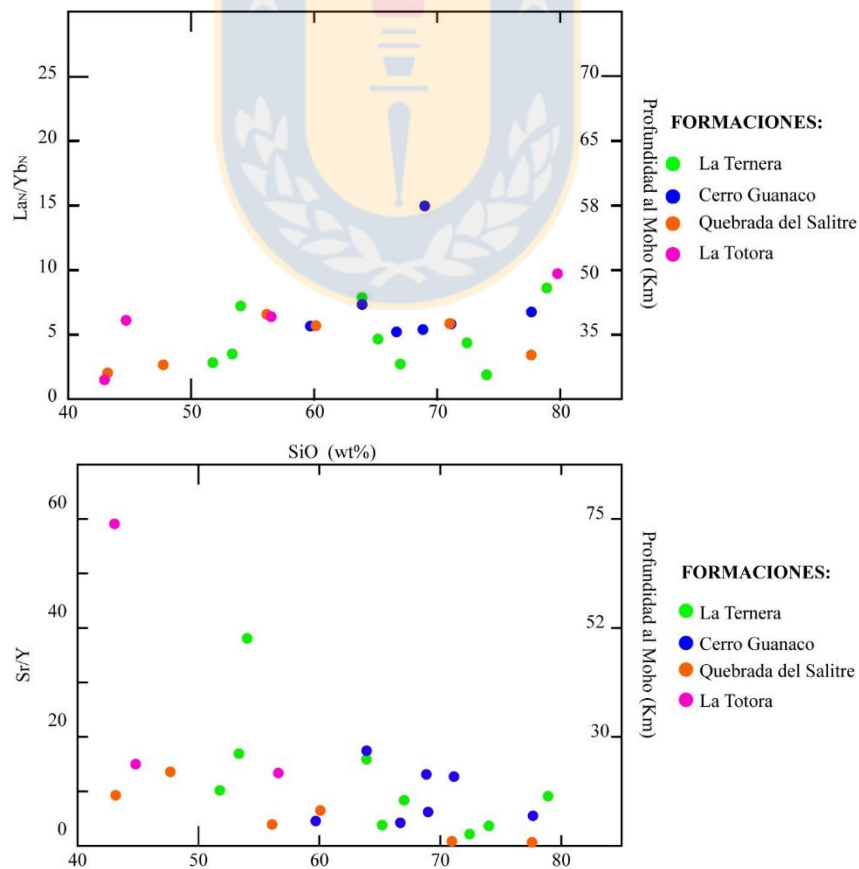


**Fig. 6.9** Diagramas de discriminación tectónica **A:** La/10 – Y/15 – Nb/8 (Cabani y Lecolle, 1989) **B:** Th – Hf/3 – Ta (Wood, 1980), para las formaciones triásicas.

De la misma forma que se analizó el espesor cortical de La Formación la Ternera, se procede a hacerlo para las otras dos formaciones triásicas. En el caso de La Formación Cerro Guanaco, según la figura 6.10.A el espesor cortical variaría aproximadamente entre los 35 – 40 km mientras que, según la ubicación de las muestras en la figura 6.10.B, el grosor de la corteza sería inferior a los 30 km. A partir de lo mencionado, se estima un espesor cortical para Cerro Guanaco entre 30 – 35 km.

En relación con Quebrada del Salitre, según se observa en la figura 6.10.A, el valor del espesor cortical se encontraría entre los 35 – 40 km, no obstante, a partir del diagrama Sr/Y (Fig. 6.10.B), para la misma formación se estima un grosor de la corteza menor a 30 km. Considerando ambas figuras, es posible estimar un espesor cortical final entre 30 – 35.

Finalmente, para la Formación La Totora según la posición de las muestras en la figura 6.10.A se estima un espesor cortical de 40 – 50 km, mientras que, considerando la figura 6.10.B, el espesor podría ascender a los 30 km, por ende, considerando ambas sentencias es posible calcular un espesor de 30 – 40 km para dicha formación.



**Fig. 6.10** Razones **A:**  $La_N/Yb_N$  y **B:**  $Sr/Y$ ; para rocas de las formaciones triásicas

## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 CONCLUSIONES

Sobre la base de los resultados e interpretaciones realizadas a partir de estos, se concluye que:

1. Petrográficamente La Formación la Ternera, presenta una componente volcánica, volcanoclástica y sedimentaria.
2. Las litologías volcánicas y volcanoclásticas presentan composiciones predominantemente básicas a intermedias y texturas porfídicas y fragmentales respectivamente.
3. Las rocas corresponden a la serie subcalina según el diagrama de Irvine y Baragar (1971) y a la serie calcoalina sobre la base del contenido en álcalis, FeO\* y MgO (diagrama AFM).
4. Las muestras son cogenéticas y su evolución magmática se encuentra sujeta a procesos de diferenciación y cristalización fraccionada.
5. El magma que dio lugar a las rocas de La Formación la Ternera posee una señal cortical, a partir de los patrones observados para las REE y los diagramas multielemento.
6. La anomalía negativa de Eu se acentúa con la diferenciación y refleja condiciones de alta fugacidad de oxígeno en el magma durante la cristalización de plagioclasa.
7. La anomalía de Nb-Ta se presenta en todas las etapas de diferenciación de las muestras, esto refleja procesos de fraccionamiento en la fuente del magma.
8. La Formación la Ternera se extruyó en una corteza adelgazada cuyo espesor varía entre 30 – 35 km.
9. A partir de la geoquímica de elementos mayores y elementos traza, además de los diagramas de discriminación tectónica, La Formación la Ternera se originó en un ambiente geotectónico de subducción.
10. Petrográficamente La Formación Cerro Guanaco y La Ternera presentan rocas volcánicas y volcanoclásticas. En relación con las volcánicas, en ambas formaciones dominan los basaltos y andesitas, no obstante, en Cerro Guanaco predominan las texturas afanitas y vitrofídicas mientras que, en La Ternera las porfídicas y pilotaxíticas.

11. Las rocas de La Formación Cerro Guanaco, Quebrada del Salitre y La Totora derivan de corteza continental, según los patrones observados para las REE y diagramas multielemento.
12. Las formaciones Cerro Guanaco, Quebrada del Salitre se extruyeron en una corteza adelgazada cuyo espesor varía entre 30 – 35 km, mientras que La Totora en una corteza de 30 – 40 km.
13. El ambiente tectónico en el que se emplazaron las formaciones Cerro Guanaco y Quebrada del Salitre corresponde a un margen continental activo dominado por la subducción, al igual que para La Formación la Ternera. En el caso de la Formación La Totora los datos apuntan a la misma conclusión, sin embargo, no son del todo decisivos.

## 7.2 RECOMENDACIONES

El estudio geoquímico realizado en el reciente trabajo se basó en el comportamiento de elementos mayores y elementos traza, sin embargo, carece de vasta información respecto a datos isotópicos. A raíz de lo anterior se sugieren las siguientes recomendaciones:

1. Mediciones de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  con el fin de trazar fuentes tanto corticales como mantélicas, pues el Rb al ser un elemento altamente incompatible se concentra en el fundido que da origen a la corteza continental, la que con el tiempo se enriquece en  $^{87}\text{Sr}$  respecto al manto, el cual se deprime en este elemento (White, 2011).
2. Mediciones de  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ . En el sistema Sm-Nd, el Sm es más compatible que Nd, por eso la razón del hijo es mayor en el manto que en la corteza formada, esto permite conocer la señal isotópica de la fuente mágmatica ya que sus concentraciones no se verán afectadas por procesos hidrotermales (Rollinson, 1993).
3. Datos isotópicos de Pb para tener una mejor caracterización de la fuente magmática de la formación en estudio.
4. Para un futuro estudio geoquímico de la Formación la Ternera, se recomienda aumentar el número de muestras y trabajar con rocas menos alteradas.



## 8 REFERENCIAS

- ANTONIOLETTI, R. 1972. Los Climas del Norte Chico. Características Climáticas del Norte Chico. Antonioletti, R.; Schneider, H.; Zarate, E. & Borcosque, J. *Instituto de Investigaciones de Recursos Naturales*: 1 – 19. Santiago.
- BELL C. M. & SUÁREZ, M. 1992. Triassic rift-related sedimentary basins in northern Chile (24°-29°S). *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. **6**, N°. **1**, p. 109-121.
- BELL C. M. & SUÁREZ, M. 1995. Triassic alluvial braidplain and braided river deposits of the La Ternera Formation, Atacama region, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*; Vol. **8**, Issue 1: 1-8.
- BLANCO, N. 1996. Sedimentología y ambientes depositacionales de la Formación La Ternera, Triásico superior de la Precordillera andina de Copiapó. Región de Atacama, Chile. *Memoria Departamento de Ciencias de la Tierra*. Universidad de Concepción, Concepción.
- BÖRGEL, R. 1983. Geografía de Chile. Geomorfología. Instituto Geográfico Militar. Tomo **II**: 182 pp. Santiago.
- BRÜGGEN, J. 1950. Fundamentos de la geología de Chile. Instituto Geográfico Militar, 374 p. Santiago.
- CABANIS, B. & LECOLLE, M. 1989. Le diagramme La/10 – Y/15 – Nb/8: un outil pour la discrimination des séries volcaniques et la mise en évidence des processus de mélange et/ou de contamination crustale. *C. R. Académie de sciences*. Paris. t. 309, Serie **II**, p. 2023 – 2029.
- CELIS, C. 2018. Petrografía y Geoquímica de las rocas volcánicas y volcanoclásticas del Triásico Superior de la Cordillera de la Costa y la Cordillera de Domeyko entre las coordenadas 23°50' – 26°10' S, Chile. *Memoria, Departamento de Ciencias de la Tierra*. Universidad de Concepción, Concepción.
- CHARRIER, R.; PINTO, L. & RODRÍGUEZ, M. 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. *The Geology of Chile*. (Moreno, T. & Gibbons, W., editors). The Geological Society: 21 – 114. London.

- CIOCCA, I. 2018. Análisis de la evolución geotectónica del margen suroccidental de Gondwana (19° - 40° S) del Carbonífero al Jurásico desde un punto de vista geoquímico. *Memoria, Departamento Ciencias de la Tierra*. Universidad de Concepción. Concepción.
- CORNEJO, P.; MPODOZIS, C.; RIVERA, O. & MATTHEWS S. 2009. Carta exploradora, Regiones de Antofagasta y Atacama. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile*, Serie Geología Básica **119**: 100 p. 1 mapa escala 1:100000.
- ESPINOZA, M.; OLIVEROS, V.; VASQUEZ, P.; GIAMBIAGI, L.; MORGAN, L.; GONZÁLEZ, R.; SOLARI, L. & BECHIS, F. En prep. Paleozoic to Mesozoic inheritance in the western Central Andes (Domeyko Range, Chile): Structural and  $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$  thermochronological approach. *Tectonics*.
- FISHER, R. 1966. Rocks composed of volcanic fragments. *Earth Science Reviews. International Magazine for Geo-Scientists*. Amsterdam. Vol. **1**: 287 – 298.
- FOLK, R. 1968. Petrology of Sedimentary Rocks: Austin. University of Texas Publication: 170 pp.
- GONZÁLEZ, R.; WILKE, H.; MENZIES, M.; ESPINOZA, F.; RIQUELME, R. & HERRERA, C. 2015. Carta Sierra de Varas, Región de Antofagasta. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile*, Serie Geología Básica **178**. 1 mapa escala 1:100000.
- GONZÁLEZ, J. 2015. Petrografía y geoquímica del Triásico Superior de la Alta Cordillera (28°45' – 30°02'S), Región de Coquimbo, Chile. *Memoria, Departamento Ciencias de la Tierra*. Universidad de Concepción. Concepción.
- IRIARTE, S., ARÉVALO, C., MPODOZIS, C. & RIVERA, O. 1996. Mapa Geológico de la Hoja Carrera Pinto, Región de Atacama. *Servicio Nacional de Geología y Minería*, Santiago, Mapas Geológicos N° **3**, escala 1.100.000.
- IRIARTE, S., ARÉVALO, C. & MPODOZIS, C. 1999. Mapa Geológico de la Hoja La Guardia, Región de Atacama. *Servicio Nacional de Geología y Minería*, Santiago, Mapas Geológicos N° **13**, escala 1.100.000.
- IRVINE, T. & BARAGAR, W. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian journal of Earth Sciences*. Vol. **8**: 523 – 548.

- KLEIMAN, L. & JAPAS, M. 2009. The Choiyoi volcanic province at 34°S – 36°S (San Rafael, Mendoza, Argentina): Implications for the Late Palaeozoic evolution of the southwestern margin of Gondwana. *Tectonophysics*. Vol. **473**: 283 – 299.
- LARRÉRE, C. & YÉVENES, E. 2017. Unidades ígneas entre el Lopingiano y el Triásico Superior entre 24° - 30° lat. S y petrogénesis del volcanismo de la formación Quebrada del Salitre, Triásico Superior, Chile. *Informe Final Tópicos Avanzados de Geología, Departamento de Ciencias de la Tierra*. Universidad de Concepción. Concepción.
- 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*, vol. 27, part 3: 745 – 750.
- LLAMBÍAS, E.; QUENARDELLE, S. & MONTENEGRO, T. 2003. The Choiyoi Group from central Argentina: a subalkaline transitional to alkaline association in the cratón adjacent to the active margin of the Gondwana continent. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **16**: 243 – 257.
- LUCASSEN, F.; FRANZ, G.; THIRLWALL, M. & MEZGER, K. 1999. Crustal Recycling of Metamorphic Basement: Late Palaeozoic Granitoids of Northern Chile (~22°S). Implications for the Composition of the Andean Crust. *Journal of Petrology*. Vol. **40**: 1.527 – 1.551.
- MARTÍNEZ, A. 2004. Secuencias volcánicas permo-triásicas de los cordones del Portillo y del Plata, Cordillera Frontal, Mendoza: su Interpretación Tectónica. *Tesis Doctoral*. Universidad de Buenos Aires (Inédito): 274 pp. Buenos Aires.
- MPODOZIS, C. & RAMOS, V. 1989. The Andes of Chile and Argentina, in: G. Ericksen, M. Cañas Pinochet & J. Reinemud (eds.). *Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources*. Circumpacific Council for Energy and Mineral Resources. *Earth Sciences Series*. Vol. **11**: 59 – 90.
- MPODOZIS, C. & KAY, S. M. 1992. Late Paleozoic to Triassic evolution of the Gondwana margin: Evidence from Chilean Frontal Cordilleran batholiths (28°S to 31°S). *Geological Society of America Bulletin*. Vol. **104**: 999 – 1014.

- MPODOZIS, C., IRIARTE, S., GARDEWEG, M. & VALENZUELA, M. 2012. Carta Laguna del Negro Francisco Región de Atacama. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica N° 145*: 41 p. 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- NASI, C.; MOSCOSO, R. & MAKSAEV, V. 1990. Hoja Guanta, Región de Coquimbo. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, N° 67*: 140 pp. Santiago.
- NICHOLS, G. 1999. *Sedimentology and Stratigraphy*. Wiley-Blackwell: 419 pp. Hoboken.
- PEARCE, J. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth, C. & Norry, M. (eds.), *Continental basalts and mantle xenoliths*. Shiva, Nantwich. 230 – 249 pp.
- PECCERILLO, R. & TAYLOR, S. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contribution to Mineralogy and Petrology*. Vol. **58**: 63 – 81.
- PROFETA, L.; DUCEA, M. N.; CHAPMAN, J. B; PATERSON, S. R.; GONZALES, S. M H.; KIRSCH, M.; PETRESCU, L. & DECELLES, P. G. 2015. Quantifying crustal thickness over time in magmatic arcs. *Scientific Reports*. vol. **5**.
- RAMOS, V. 1988. Late Proterozoic – Early Paleozoic of South America – a Collisional History. *Episodes*. Vol. **11**: 168 – 174.
- ROLLINSON, H. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Routledge Taylor & Francis Group: 352 pp. Oxon & New York.
- SALAZAR, E.; COLOMA, F. & CREIXELL, C. 2013. Geología del área El Tránsito – Lagunillas, Región de Atacama. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, N°149*: 117 pp. Santiago.
- SCHMID, R. 1981. Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: Recommendations of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. *Geology. The Geological Society of America*. Boulder, Co. Vol. **9**: 41 – 43.

- SEPÚLVEDA, P. & NARANJO, J.A. 1982. Geología de la Hoja Carrera Pinto. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile*, N°. **53**, 62 p. Escala 1:100.000.
- SOFFIA, J. M., 1989. Estratigrafía y geología estructural del área del río Jorquera, Región de Copiapó. *Tesis, Departamento de Geología*, Universidad de Chile, Santiago, 159 p.
- STRECKEISEN, A. 1978. IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks, Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites and melilitic rocks. Recommendations and suggestions. *Neues Jahrbuch für Mineralogie*. Vol. **134**: 1 – 14. Stuttgart.
- SUN, S. & McDONOUGH, W. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, Special Publications*. Vol. **42**: 313 – 345. London.
- TOMLINSON, A., CORNEJO, P. & MPODOZIS, C. 1999. Hoja Potrerillos, Región de Atacama, *Servicio Nacional de Geología y Minería*, N° **14**, 33 p. Mapas Geológicos 1:100.000. Santiago.
- VALIN, X. 2014. Geoquímica de las unidades del Triásico a Jurásico Inferior en el norte de Chile (28°00'-29°30'S): implicancias para el inicio de la subducción. *Memoria de Título, Departamento de Ciencias de la Tierra*, Universidad de Concepción, Concepción. 104p.
- WHITE, W. 2011. Radiogenic Isotope Geochemistry I: The Mantle. *Isotope Geochemistry*. Cornell University: 384 pp. Nueva York.
- WINCHESTER, J. & FLOYD, P. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*. Vol. **20**: 325 – 343.
- WOOD, D. A., JORON, J-L. & TREUIL, M. 1979. A re-appraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings. *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. **45**: 326 – 336.
- WOOD, D. A. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. **50**: 11 – 30.





**ANEXO I**

*Descripción Petrográfica*

*La Ternera*

## ÍNDICE DE DESCRIPCIONES

<b>Código Muestra</b>	<b>Página</b>
<b>Rocas Volcánicas</b> .....	3
CPV-15-271 .....	4
CPV-15-274 .....	5
CPV-15-275 .....	6
CPV-15-277 .....	7
CPV-15-278 .....	8
CPV-15-284 .....	9
CPV-15-287 .....	10
<b>Rocas Volcanoclásticas</b> .....	11
CPV-15-273 .....	12
CPV-15-276 .....	13
CPV-15-279 .....	14
CPV-15-280 .....	15
CPV-15-281 .....	16
CPV-15-283 .....	17
CPV-15-285 .....	18
<b>Rocas Sedimentarias</b> .....	19
CPV-15-272 .....	20
CPV-15-282 .....	21



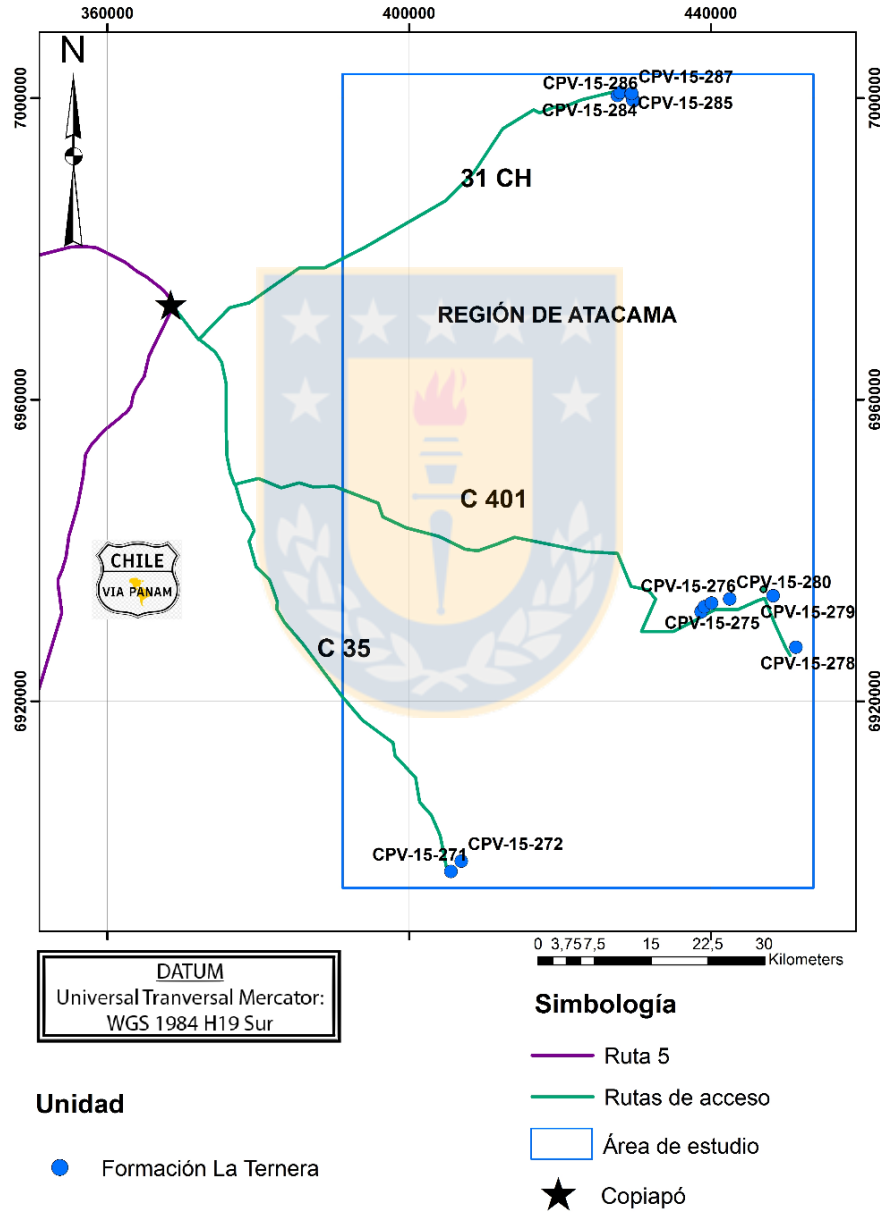
## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
A.1 Mapa de ubicación de los cortes transparentes descritos.....	1

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
A.1 Código, coordenadas, unidad y clasificación de la muestra.....	2

En el presente anexo, se encuentran las descripciones de 16 cortes transparentes, organizados en fichas donde se entrega información respecto a su ubicación en coordenadas UTM (Sistema WGS-84, Huso 19H), localidad más cercana, unidad a la cual corresponde cada roca y las características petrográficas más relevantes. Como una forma de poder observar más fácilmente la distribución espacial de las muestras dentro del área de estudio, se presenta un mapa con las ubicaciones de estas (Fig. A.1) y a modo de resumen se entrega una tabla, con las clasificaciones petrográficas para cada una de estas muestras (Tabla. A.1).



**Fig. A.1:** Se observa la ubicación de las muestras seleccionadas para cortes transparentes.

**Tabla A.1:** Se presenta el código, ubicación y clasificación petrográfica de las muestras.

<b>Unidad: Formación La Ternera</b>			
<b>Muestra</b>	<b>E</b>	<b>N</b>	<b>Clasificación</b>
CPV-15-271	405.540	6.897.409	Basalto de olivino y ortopiroxeno
CPV-15-272	406.908	6.898.788	Arenisca
CPV-15-273	438.702	6.931.886	Lapillita tobácea
CPV-15-274	438.698	6.931.859	Andesita
CPV-15-275	439.126	6.932.537	Andesita basáltica
CPV-15-276	440.075	6.933.017	Toba Lítica
CPV-15-277	446.962	6.934.834	Andesita
CPV-15-278	451.252	6.927.171	Andesita Basáltica
CPV-15-279	448.251	6.933.987	Toba vítrea
CPV-15-280	442.475	6.933.547	Toba cristalina
CPV-15-281	427.604	7.000.335	Toba vítrea
CPV-15-282	427.981	7.000.734	Arenisca
CPV-15-283	429.784	6.999.689	Toba cristalina
CPV-15-284	429.399	7.000.568	Basalto de Olivino
CPV-15-285	429.399	7.000.568	Toba vítrea
CPV-15-287	429.509	7.000.612	Dacita





**MUESTRA CPV-15-271**

<b>Ubicación</b>	405.540 E / 6.897.409 N
<b>Localidad</b>	Río Pulido
<b>Unidad</b>	Formación La Ternera
<b>Clasificación</b>	Basalto de Olivino y Ortopiroxeno (Streckeisen, 1978)
<b>Textura</b>	Porfídica pilotaxítica intergranular
<b>Observaciones</b>	La roca es altamente porfídica, con fenocristales de olivino y una masa fundamental esencialmente de plagioclasas con textura pilotaxítica y en menor medida ortopiroxenos presentes entre las plagioclasas, lo que deja en evidencia una textura intergranular. Los fenocristales de olivino se presentan fuertemente oxidados (Iddingsita), teniendo los fenocristales de este mineral un color anaranjado, mientras que los olivinos presentes en la masa fundamental, un color prácticamente negro.

**Composición**

**Fenocristales**

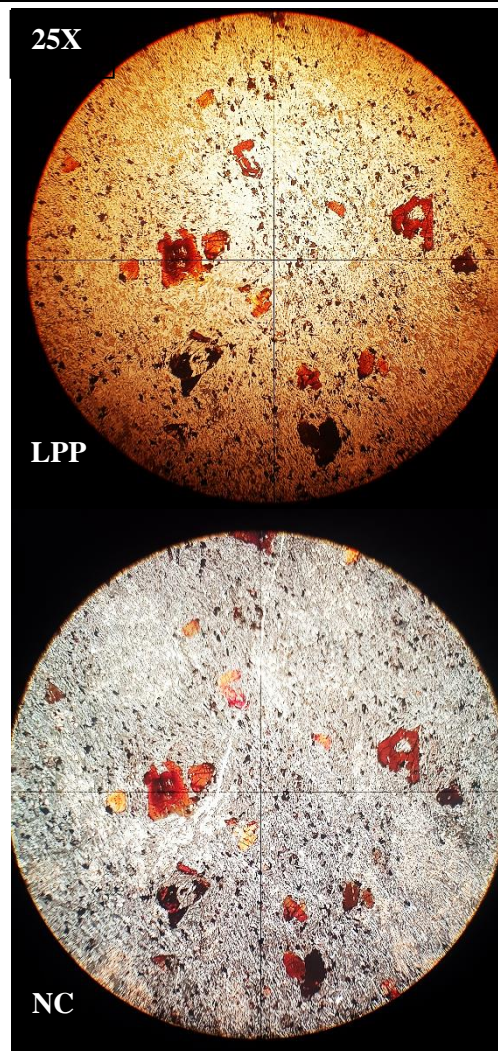
Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Olivino	13 *	Anhedral a subhedral, con presencia de fractura característica y fuertemente oxidados.	0,4 – 1,2

**Masa Fundamental**

Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	34	Euhedral, en gran abundancia, levemente alterada a arcilla. Los cristales se presentan notoriamente orientados.	0,12 – 0,2
Ortopiroxeno	18	Anhedral, presente entre los microlitos de plagioclasa. Fuertemente fracturados.	0,075 – 0,15
Olivino	5*	Anhedral, en masa fundamente se presentan prácticamente de color negro.	0,06
Opacos	10	Anhedrales, presentes entre los microlitos de plagioclasa, se distribuyen uniformemente en todo el corte.	0,06 – 0,12

**Minerales de alteración**

Minerales	%	Observaciones
Epidota	5	En masa fundamental como alteración de las plagioclasas.
Iddingsita	*	Óxidos e hidróxidos de Fe.
Clorita	8	En masa fundamental como alteración local de ortopiroxenos.
Arcillas	7	En masa fundamental alterando a plagioclasas.



**MUESTRA CPV-15-274**

<b>Ubicación</b>	438.698 E / 6.931.859 N
<b>Localidad</b>	La Guardia
<b>Unidad</b>	Formación La Ternera
<b>Clasificación</b>	Andesita (Streckeisen, 1978)
<b>Textura</b>	Levemente porfídica, localmente pilotaxítica.
<b>Observaciones</b>	Lava levemente porfídica (podría considerarse afanítica), con una masa fundamental localmente pilotaxítica. Alteración diferencial de plagioclasas, la masa fundamental se presenta alterada a calcita mientras que los fenocristales alterados a arcillas.

**Composición**

**Fenocristales**

Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	5	Euhedral, cristales levemente alterados a arcilla. La escasa presencia de estos cristales supone una textura levemente porfídica.	0,35 – 0,5

**Masa Fundamental**

Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	44	Euhedral a subhedral, en ciertas zonas presentan una fuerte alteración a calcita mientras que en otras se mantienen sin alteración. Presentan una textura moderadamente pilotaxítica.	0,03 – 0,05
Opacos	15	Anhedral, uniformemente distribuidos por toda la masa fundamental y entre los cristales de plagioclasa.	0,04

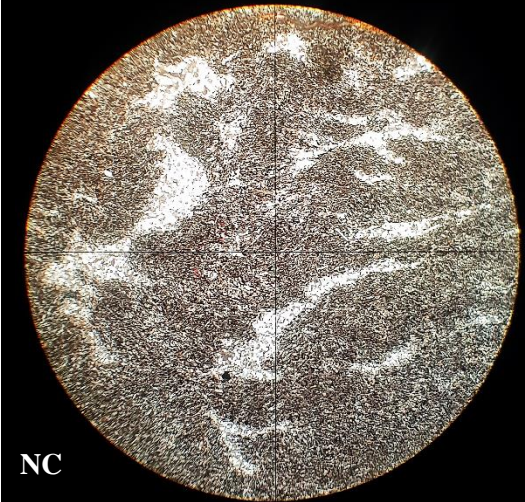
**Minerales de alteración**

Minerales	%	Observaciones
Cuarzo	20	Alteración de la masa fundamental en agregados cristalinos irregulares.
Calcita	7	Alteración de cristales de plagioclasa de la masa fundamental.
Opacos	7	Presencia de opacos asociados a vetillas
Arcillas	2	Alteración de cristales de plagioclasa pertenecientes a los fenocristales.

25X



LPP



NC



**MUESTRA CPV-15-275**

<b>Ubicación</b>	439.126 E / 6.932.537 N
<b>Localidad</b>	La Guardia
<b>Unidad</b>	Formación La Ternera
<b>Clasificación</b>	Andesita basáltica (Streckeisen, 1978)
<b>Textura</b>	Porfídica localmente pilotaxítica e intersertal
<b>Observaciones</b>	La roca presenta escasos fenocristales, sin embargo, se evidencia una textura porfídica en una masa fundamental que presenta microlitos de plagioclasa localmente orientados y en otras un armazón de plagioclasa rodeando vidrio volcánico, lo que supone una textura intersertal. La roca en general presenta una alteración moderada a carbonatos (calcita).

**Composición**

**Fenocristales**

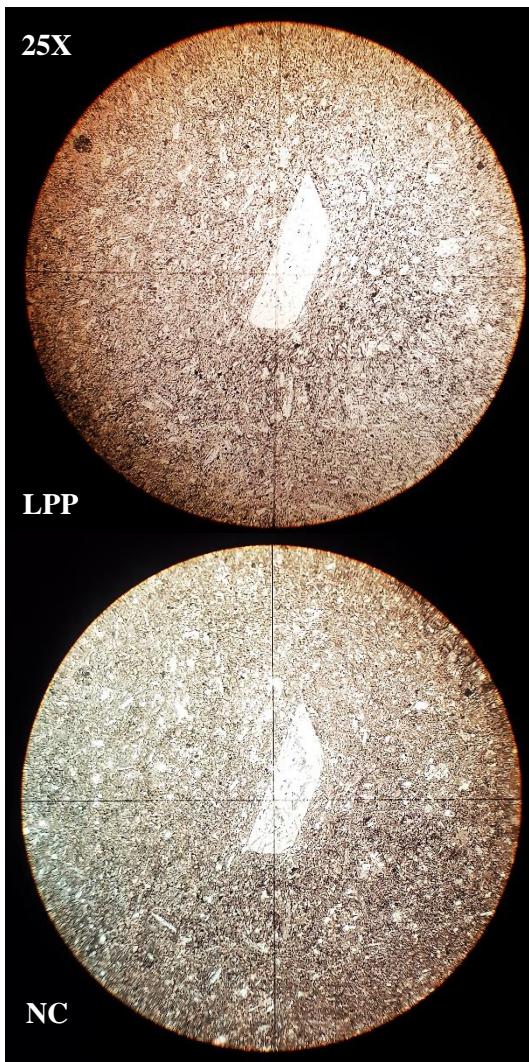
Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Olivino	2	Anhedral, fuertemente oxidados, de color anaranjado en algunas partes del cristal y en otras a punto de verse totalmente negros.	0,3
Plagioclasa	3	Euhedral, levemente alterada a calcita.	0,9 – 2

**Masa Fundamental**

Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	56	Subhedral a anhedral, con alteración moderada a calcita y una textura pilotaxítica muy local.	0,08- 0,16
Vidrio	19*	Amorfo, se presenta moderadamente desvitrificado, entre los microlitos de plagioclasa.	Muy variable
Opacos	9	Anhedral, distribución uniforme en toda la masa fundamental.	0,05 – 0,07

**Minerales de alteración**

Minerales	%	Observaciones
Calcita	11	Alteración de plagioclasas tanto de la masa fundamental como de los fenocristales.
Cuarzo-feldespatos	*	Alteración de vidrio volcánico como intercrecimiento de cuarzo-feldespatos.



**MUESTRA CPV-15-277**

<b>Ubicación</b>	446.962 E / 6.934.834 N
<b>Localidad</b>	La Guardia
<b>Unidad</b>	Formación La Ternera
<b>Clasificación</b>	Andesita (Streckeisen, 1978)
<b>Textura</b>	Glomeroporfídica localmente pilotaxítica
<b>Observaciones</b>	La roca presenta una textura dominante, glomeroporfídica, donde los fenocristales de plagioclasa se encuentran en agregados. La masa fundamental es rica en plagioclasas y presenta minerales de alteración como clorita, epidota y calcita, esta última asociada a venillas de la misma composición que cortan a la roca. En la masa fundamental, localmente se puede observar una textura pilotaxítica en los microlitos de plagioclasa.

**Composición**

**Fenocristales**

Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	10	Subhedral a euhedral, se presenta en cúmulos, con zonación y alterada a sericita.	0,44 – 1,75
Clinopiroxeno	4	Anhedral, fuertemente fracturado, con colores de birrefringencia tanto bajos como altos y localmente uralitizados.	0,45
Anfibol	3	Euhedral, alterado en los bordes a epidota y clorita.	0,6

**Masa Fundamental**

Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	46	Desde anhedrales a euhedrales, alterados a sericita y calcita, localmente orientados.	0,15 – 0,18
Opacos	8	Anhedrales, uniformemente distribuidos en la masa fundamental.	0,04 – 0,087

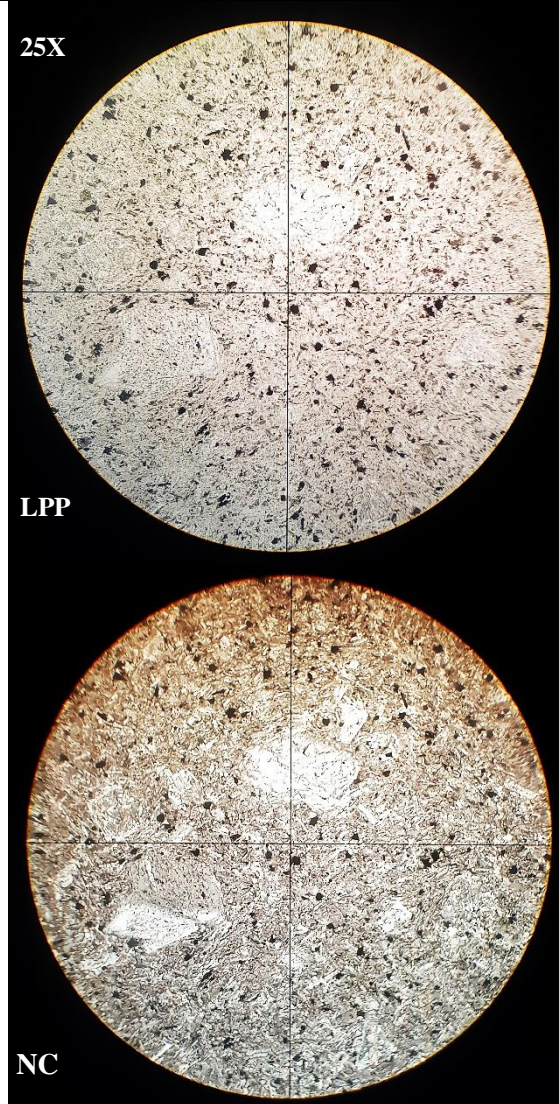
**Minerales de alteración**

Minerales	%	Observaciones
Epidota	4	Altera a plagioclasas principalmente y a anfíboles.
Calcita	13	Se encuentra asociada a venillas de calcita que cortan la roca, además se presenta alterando a plagioclasas tanto en fenocristales como en la masa fundamental.
Clorita	8	Alteración de anfíboles.
Sericita	3	Mineral de alteración de plagioclasas tanto en los fenocristales como en la masa fundamental.
Anfibol	1	Uralitización de clinopiroxenos, la alteración ocurre desde los bordes hacia el centro del cristal.

25X

LPP

NC





**MUESTRA CPV-15-278**

<b>Ubicación</b>	451.252 E / 6.927.171 N
<b>Localidad</b>	Río Turbio
<b>Unidad</b>	Formación La Ternera
<b>Clasificación</b>	Andesita Basáltica (Streckeisen, 1978)
<b>Textura</b>	Porfídica pilotaxítica, probable textura intergranular muy local.
<b>Observaciones</b>	Andesita con fenocristales principalmente correspondientes a plagioclasas. La masa fundamental se presenta en su mayoría compuesta por cristales de plagioclasas orientados y opacos uniformemente distribuidos. Las plagioclasas se presentan alteradas a sericita y calcita.

**Composición**

**Fenocristales**

Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	17	Euhedral, cristales se presentan zonados y con alteración moderada a sericita.	0,5 – 1,7

**Masa Fundamental**

Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	50	Euhedral, cristales dominan en la masa fundamental, presentando una textura moderadamente pilotaxítica. Se observa alteración a calcita.	0,07 – 0,3
Opacos	11	Anhedrales, uniformemente distribuidos por toda la masa fundamental de la roca.	0,03 – 0,05
Indeterminado	4*	Anhedral, completamente alterado a clorita. Probablemente corresponda a un máfico de alta temperatura.	0,2 – 0,3

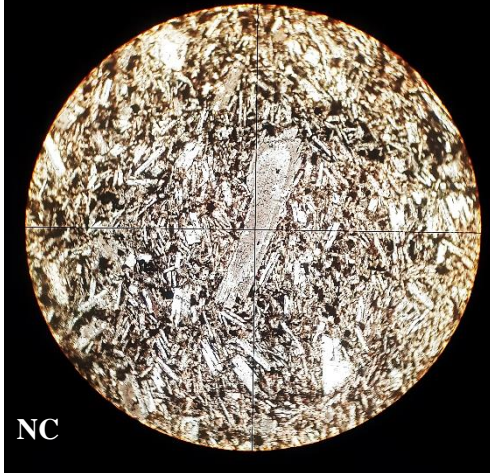
**Minerales de alteración**

Minerales	%	Observaciones
Sericita	5	Fuerte alteración en fenocristales de plagioclasa.
Calcita	8	Alterando uniformemente a las plagioclasas que conforman la masa fundamental
Clorita	*	Se presenta junto a plagioclasas en la masa fundamental, sin embargo, no se puede determinar el mineral original. Lo más probable es que corresponda a algún mineral máfico de alta temperatura que fue completamente alterado a clorita.
Opacos	5	Asociados principalmente a vetillas.

**100X**



**LPP**



**NC**



**MUESTRA CPV-15-284**

<b>Ubicación</b>	429.399 E / 7.000.568 N
<b>Localidad</b>	Quebrada El Carbón
<b>Unidad</b>	Formación La Ternera
<b>Clasificación</b>	Basalto de Olivino (Streckeisen, 1978)
<b>Textura</b>	Porfídica localmente glomeroporfídica, intergranular
<b>Observaciones</b>	La roca presenta una evidente textura porfídica, donde los fenocristales corresponden a plagioclasas levemente alteradas a arcillas y calcita. Localmente los fenocristales se encuentran en agregados. La masa fundamental está compuesta principalmente por plagioclasas que forman armazón alrededor de los olivinos, esto supone una textura intergranular. Finalmente, la roca presenta cavidades rellenas en forma de amígdalas con minerales como clorita, calcita y zeolitas.

**Composición**

**Fenocristales**

Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	20	Euhedral a subhedral, cristales alterados a calcita y arcillas. Localmente presentan una textura glomeroporfídica.	0,88 – 1,75

**Masa Fundamental**

Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	48	Euhedral a subhedral, cristales alterados a arcillas principalmente, no presentan orientación y se encuentran como armazón rodeando a olivinos.	0,18 – 0,3
Olivino	16	Anhedrales a subhedrales, fuertemente alterado a óxidos e hidróxidos de Fe (E) y con fractura típica del mineral.	0,05 – 0,15
Opacos	7	Anhedral, distribuidos uniformemente por toda la masa fundamental, acompañando a olivinos y plagioclasas	0,02 – 0,05

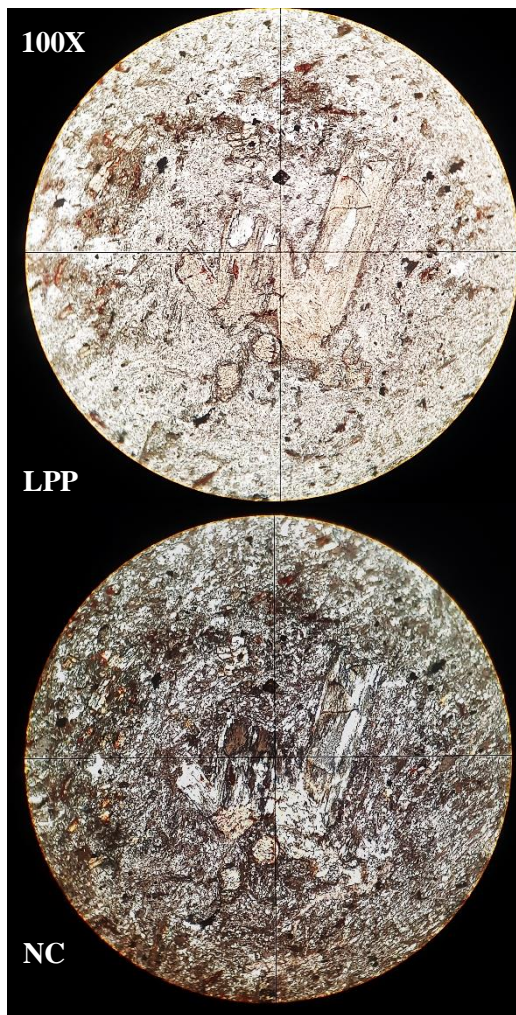
**Minerales de alteración**

Minerales	%	Observaciones
Calcita	2	Alteración incipiente de fenocristales de plagioclasa.
Clorita	1	Rellenando cavidades en forma de amígdalas con otros minerales como zeolitas y calcita.
Zeolitas	1	Relleno de cavidades en forma de amígdalas.
Iddingsita	5	Alteración de óxidos e hidróxidos de Fe en los cristales de olivino.



**MUESTRA CPV-15-287**

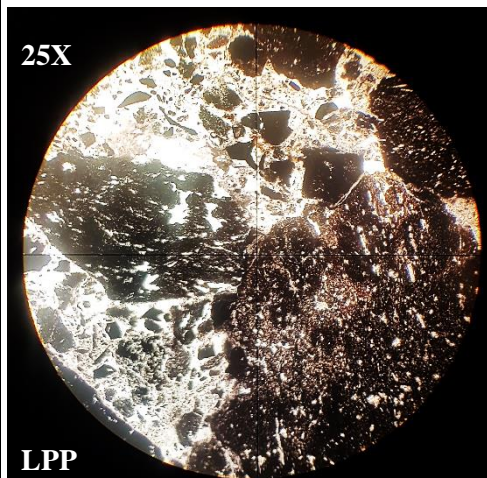
<b>Ubicación</b>	429.509 E / 7.000.612 N		
<b>Localidad</b>	La Puerta		
<b>Unidad</b>	Formación La Ternera		
<b>Clasificación</b>	Dacita (Streckeisen, 1978)		
<b>Textura</b>	Vitrofídica Felsofídica		
<b>Observaciones</b>	La roca presenta un gran contenido de vidrio volcánico desvitrificado, de ahí su textura felsofídica. Los fenocristales presentes son muy escasos y de composición diversa, todos con mayor o menor grado de alteración a epidota, principalmente.		
<b>Composición</b>			
<b>Fenocristales</b>			
Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	3	Euhedral, cristales fuertemente alterados a epidota y arcillas.	0,6 – 0,9
Biotita	3	Euhedral, cristales alterados a clorita y en menor medida epidota.	0,2 – 0,35
Anfibol	4	Anhedrales a subhedrales, con intensa alteración a epidota.	0,4 – 0,65
<b>Masa Fundamental</b>			
Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Vidrio	54*	Masivo, fuertemente desvitrificado en toda la masa fundamental	-
Plagioclasa	17	Pequeños microlitos inmersos en vidrio masivo, se encuentran alterados	0,03 – 0,05
Opacos	9	Anhedrales, uniformemente distribuidos por toda la masa fundamental.	<0,05
<b>Minerales de alteración</b>			
Minerales	%	Observaciones	
Epidota	4	Fuerte alteración de anfíboles y de plagioclasas en general.	
Clorita	2	Alterando a los escasos fenocristales de biotita.	
Arcillas	4	Alteración de plagioclasas de la masa fundamental y fenocristales.	
Cuarzo-feldespatos	*	Intercrecimiento dado por la desvitrificación del vidrio volcánico.	



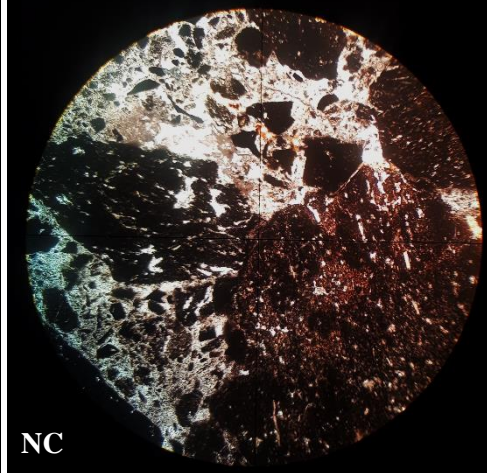




MUESTRA CPV-15-273			
Ubicación	438.702 E / 6.931.886 N		
Localidad	La Guardia		
Unidad	Formación La Ternera		
Clasificación Textural	Lapillita Tobácea (after Fisher, 1966)		
Clasificación Composicional	-		
Fábrica	Matriz-soportado		
Texturas	Fragmental Vitrofídica Felsofídica		
Observaciones	La roca está compuesta principalmente por líticos de escoria y andesita en una matriz de vidrio masivo. Matriz altamente desvitrificada y en sectores con recristalización muy notoria de cuarzo policristalino. Texturalmente la roca corresponde a una lapillita pues hay más de un 25% de partículas >2mm. No se puede clasificar composicionalmente pues no corresponde a una toba.		
Composición			
Cristales			
Mineral	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
-	-	-	-
Líticos			
Tipo	%	Descripción	Tamaño (mm)
Líticos de escoria	33	De color muy oscuro, prácticamente negro con escasos microlitos de plagioclasa.	1,5 – 15,0
Volcánico Andesítico	12	Con textura porfídica, fenocristales en una masa fundamental en parte pilotaxítica y también vitrofídica.	1,75 – 4,5
Vidrio			
Tipo	%	Descripción	
Vidrio Masivo	52*	Se presenta entre los líticos de escoria y líticos andesíticos, conformando la matriz de la roca. Se presenta masivo y no como vidrio compuesto por partículas vítreas.	
Minerales de alteración			
Minerales	%	Observaciones	
Calcita	3	Altera al vidrio masivo y también al vidrio de los líticos de escoria	
Cuarzo-feldespato	*	Intercrecimiento dado por la desvitrificación del vidrio volcánico.	

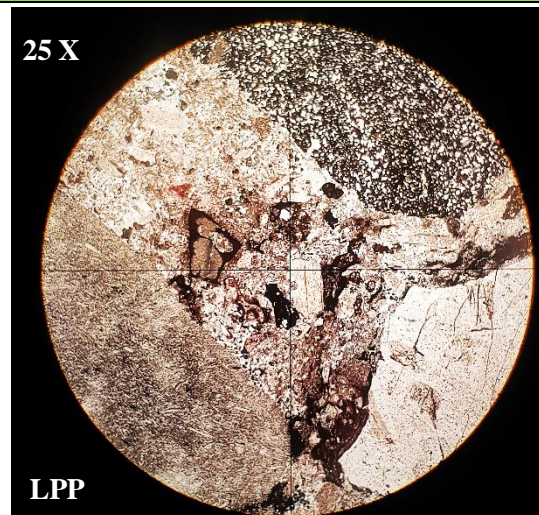


LPP

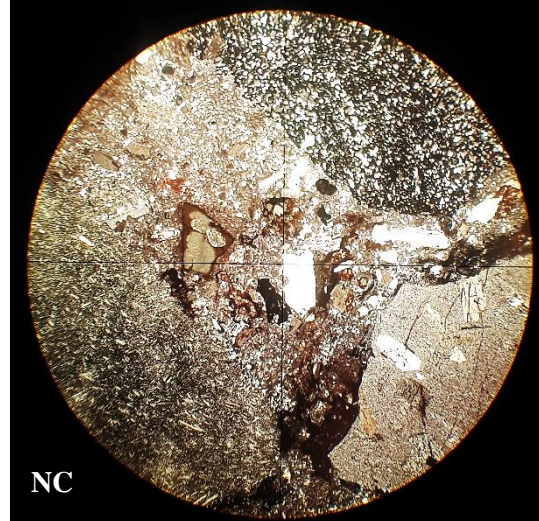


NC

MUESTRA CPV-15-276			
<b>Ubicación 3o</b>	440.075 E / 6.933.017 N		
<b>Localidad</b>	La Guardia		
<b>Unidad</b>	Formación La Ternera		
<b>Clasificación Textural</b>	Toba ( <i>after</i> Fisher, 1966)		
<b>Clasificación Composicional</b>	Toba Lítica ( <i>after</i> Schmid, 1981)		
<b>Fábrica</b>	Grano-soportado		
<b>Textura</b>	Fragmental Vitroclástica		
<b>Observaciones</b>	Toba, rica en líticos de composición andesítica y en menor medida riolítica, en una matriz vítrea, la cual presenta cristales de plagioclasas. Algunos cristales se presentan fracturados, alterados a arcillas y en menor medida a calcita.		
Composición			
Cristales			
Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	25	Subhedrales, moderadamente fracturadas con leve alteración a arcillas.	0,35 – 1,7
Opacos	4	Anhedrales, de color marrón muy oscuro a negro.	0,35 – 1,2
Líticos			
Tipo	%	Descripción	Tamaño (mm)
Andesíticos	24	Con textura porfídica, donde los fenocristales de plagioclasa se encuentran inmersos en una masa fundamental pilotaxítica.	1,0 – 15,0
Riolíticos	8		3,5 – 5,2
Toba Vítrea	1	Compuesto principalmente por vidrio con presencia de esferulitas.	0,35
Vidrio			
Tipo	%	Descripción	
Vidrio fino	27*	Altamente desvitrificado, englobando a los fenocristales de plagioclasa y a líticos.	
Minerales de alteración			
Minerales	%	Observaciones	
Cuarzo-feldespatos	*	Intercrecimiento que resulta de la desvitrificación del vidrio volcánico.	
Arcillas	8	Alteración moderada de fenocristales de plagioclasa.	
Calcita	3	Alteración local de fenocristales de plagioclasa, en luz polarizada plana se observa de un color marrón.	



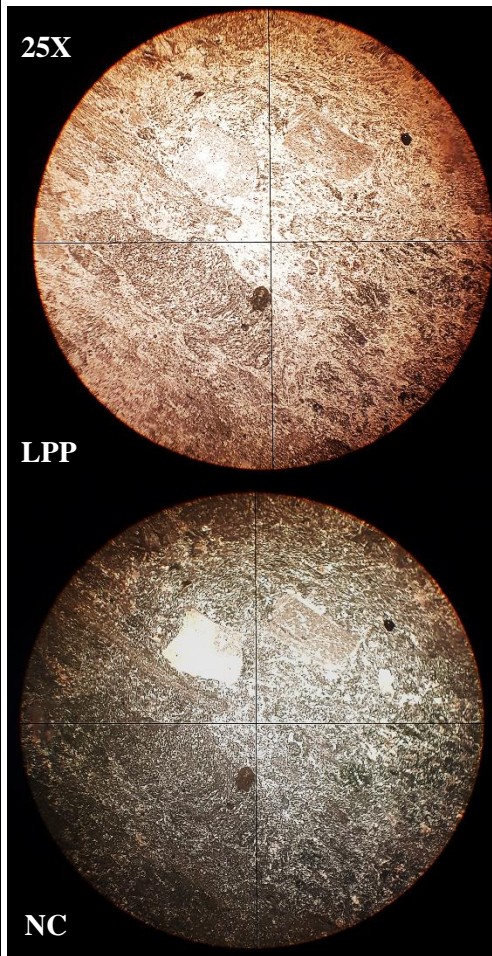
LPP



NC



MUESTRA CPV-15-279			
<b>Ubicación</b>	448.251 E / 6.933.987 N		
<b>Localidad</b>	Río Turbio		
<b>Unidad</b>	Formación La Ternera		
<b>Clasificación Textural</b>	Toba (after Fisher, 1966)		
<b>Clasificación Composicional</b>	Toba vítrea (after Schmid, 1981)		
<b>Fábrica</b>	Matriz-soportado		
<b>Texturas</b>	Vitroclástica Fragmental		
<b>Observaciones</b>	Roca con alto contenido de partículas vítreas, de ahí su textura vitroclástica. Alto porcentaje de esquirlas no soldadas y líticos de escoria, los cuales se presentan alterados a calcita y clorita, respectivamente.		
Composición			
Cristales			
Mineral	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	#6	Euhedrales, con alteración moderada a fuerte de calcita.	0,7 – 1,75
Cuarzo	1	Anhedral, se observan limpios y sin alteración.	0,12
Líticos			
Tipo	%	Descripción	Tamaño (mm)
Intrusivos	5	De composición ácida, ricos en cuarzo y con evidente textura fanerítica equigranular.	1,0 – 5,0
Volcánico Dacítico	2	Con fenocristales de cuarzo en una masa afanítica altamente desvitrificada.	2,5
Líticos de escoria	18	Vidrio volcánico de color oscuro, con basta presencia de vesículas esféricas. Vidrio moderadamente desvitrificado. *	1,7 – 3,5
Vidrio			
Tipo	%	Descripción	
Esquirlas	#40	No se presentan soldadas. Fuerte alteración a calcita.	
Fiammes	8	Compuestas por vidrio de un color más claro que los líticos de escoria, altamente fibrosas y con desvitrificación moderada.*	
Polvo Vítreo	20	Masa fina, observada entre los cristales, líticos y vidrio (esquirlas y fiammes). Presenta mayor desvitrificación con los componentes vítreos antes mencionados.*	
Minerales de alteración			
Minerales	%	Observaciones	
Calcita	#	Alterando principalmente a las esquirlas y plagioclasas.	
Clorita	2	Alteración de líticos de escoria y en partes localizadas, al polvo vítreo.	
Cuarzo-Fesdespato	*	Intercrecimiento de estos minerales dado por la desvitrificación del vidrio.	

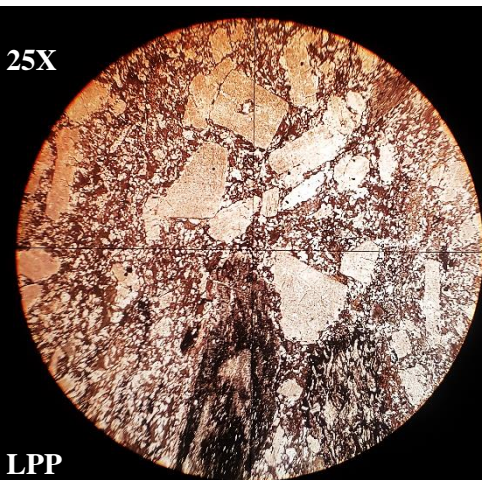




**MUESTRA CPV-15-280**

<b>Ubicación</b>	442.475 E / 6.933.547 N
<b>Localidad</b>	La Guardia
<b>Unidad</b>	Formación La Ternera
<b>Clasificación Textural</b>	Toba ( <i>after</i> Fisher, 1966)
<b>Clasificación Composicional</b>	Toba cristalina ( <i>after</i> Schmid, 1981)
<b>Fábrica</b>	Matriz-soportado
<b>Texturas</b>	Vitroclástica Fragmental
<b>Observaciones</b>	La roca presenta gran abundancia de cristales de plagioclasa con una distribución bimodal de los tamaños. Los cristales más grandes se encuentran fracturados lo que supone una textura fragmental mientras que los más pequeños forman un armazón alrededor de vidrio masivo (textura intersertal. Además, se observa líticos de pómez y escoria en menor porcentaje.

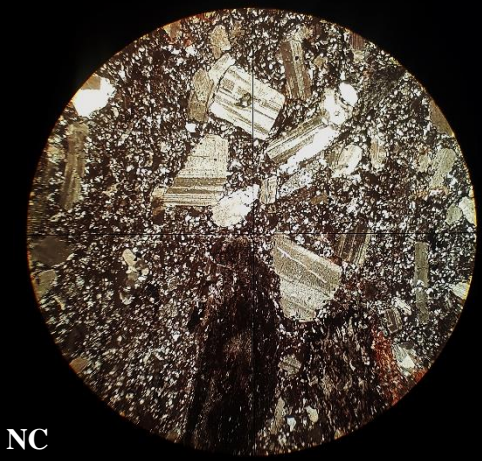
**25X**



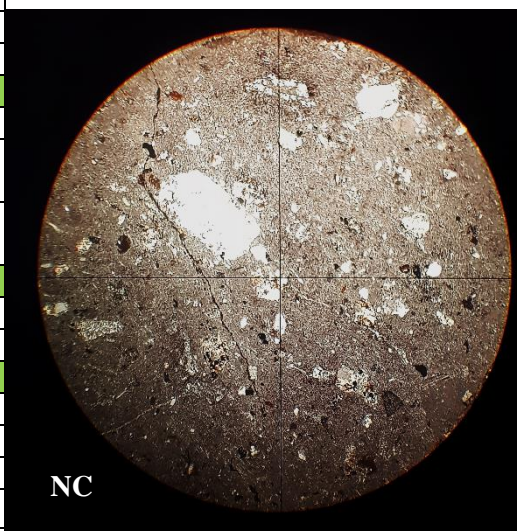
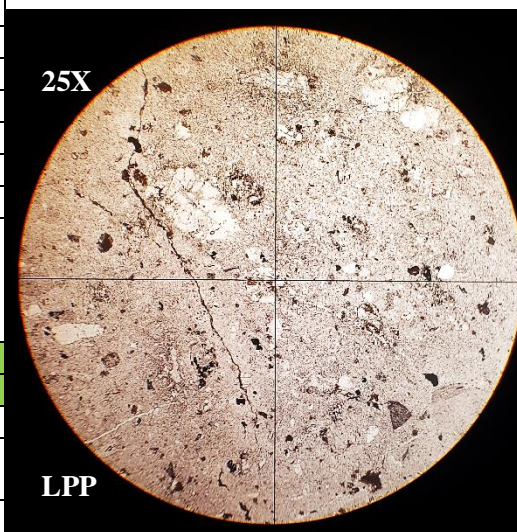
**LPP**

<b>Composición</b>			
<b>Cristales</b>			
Mineral	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	49*	Cristales grandes: Euhedral a subhedral; cristales pequeños: Anhedral. Con alteración moderada alteración a arcillas. Los cristales grandes están fracturados.	0,06 – 1,5
Ortopiroxeno	5	Cristales con alto relieve y presencia de foliación.	0,05 - 1
<b>Líticos</b>			
Tipo	%	Descripción	Tamaño (mm)
Líticos de escoria	2	Color oscuro, presencia de vidrio y microlitos de plagioclasa. Presenta texturas fluidales.	3,0 – 10,0
Líticos de pómez	8	Color claro, presencia de vidrio y microlitos de plagioclasas orientados.	2,0 – 2,5
<b>Vidrio</b>			
Tipo	%	Descripción	
Vidrio	25	De color oscuro, lo que hace pensar en una composición basáltica o andesítica. Se presenta masivo y no como vidrio compuesto por partículas vítreas.	
Fiammes	3	De color más claro que el vidrio masivo. Se presentan elongadas y fibrosas.	
<b>Minerales de alteración</b>			
Minerales	%	Observaciones	
Calcita	8	Alteración de fiammes y vidrio masivo.	
Arcillas	*	Alteración moderada de las plagioclasas.	

**NC**



MUESTRA CPV-15-281			
<b>Ubicación</b>	427.604 E / 7.000.335 N		
<b>Localidad</b>	Intersección Quebrada Paipote con San Andrés		
<b>Unidad</b>	Formación La Ternera		
<b>Clasificación Textural</b>	Toba ( <i>after</i> Fisher, 1966)		
<b>Clasificación Composicional</b>	Toba Vítreo ( <i>after</i> Schmid, 1981)		
<b>Fábrica</b>	Matriz-soportado		
<b>Texturas</b>	Vitroclástica Fragmental		
<b>Observaciones</b>	Toba con presencia de líticos volcánicos (andesíticos) y sedimentarios (arenisca), inmersos en una matriz con textura vitrofídica cuyos fenocristales corresponden principalmente a plagioclasas y anfíboles. Los minerales se presentan alterados y el vidrio muy desvitrificado.		
Composición			
Cristales			
Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasas	15	Euhedrales a subhedrales, localmente fracturadas. Alteradas a arcillas y calcita	0,4 – 1,0
Anfibol	2	Euhedrales, los cristales se encuentran completamente negros y se reconocen por su forma pseudo-rómbica.	0,3
Cuarzo	1	Anhedral, se observa limpio y con extinción ondulosa.	0,35
Opacos	8	Anhedral, poca abundancia	~0,3
Líticos			
Tipo	%	Descripción	Tamaño (mm)
Volcánico (Andesítico)	4	Con textura porfídica y color pardo oscuro.	1,0
Sedimentario (Arenisca)	6	Anguloso, arenisca rica en cuarzo, clasto-soportada de grano muy fino.	1,0 – 2,0
Vidrio			
Tipo	Descripción		
Vidrio fino	46*	Se presenta englobando a líticos y cristales, además de desvitrificado.	
Minerales de alteración			
Minerales	%	Observaciones	
Sericita	5	Se presenta alterando a las plagioclasas	
Calcita	6	Como alteración de plagioclasas	
Cuarzo-feldespato	*	Intercrecimiento que resulta de la desvitrificación de vidrio volcánico	
Cuarzo	7	Vetilla de cuarzo asociada a fluidos hidrotermales posteriores	





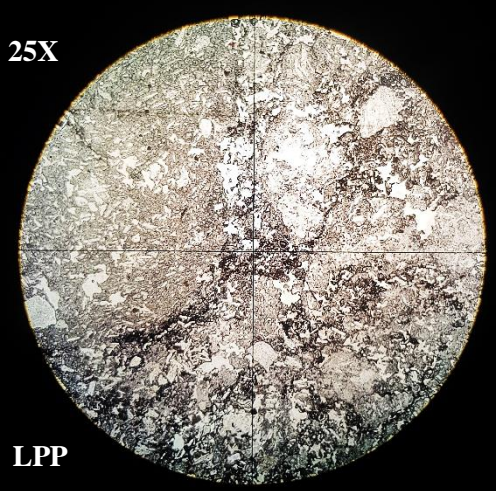
MUESTRA CPV-15-283			
<b>Ubicación</b>	429.784 E /6.999.689 N		
<b>Localidad</b>	Quebrada El Carbón		
<b>Unidad</b>	Formación La Ternera		
<b>Clasificación Textural</b>	Toba ( <i>after</i> Fisher, 1966)		
<b>Clasificación Composicional</b>	Toba cristalina ( <i>after</i> Schmid, 1981)		
<b>Fábrica</b>	Grano-soportado		
<b>Textura</b>	Fragmental Vitroclástica		
<b>Observaciones</b>	Toba con presencia de líticos de composición intermedia a ácida y cristales exclusivamente de plagioclasa. La matriz corresponde a vidrio fino, presente entre cristales y líticos. Plagioclasas alteradas a calcita, vidrio desvitrificado y cuarzo de alteración		
Composición			
Cristales			
Mineral	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	40	Euhedral, fuertemente alterada a calcita y localmente fracturadas	0,35 – 0,9
Líticos			
Tipo	%	Descripción	Tamaño (mm)
Volcánicos	8	De composición intermedia a ácida con una textura pilotaxítica.	3,5 – 4,6
Vidrio			
Tipo	%	Descripción	
Vidrio fino	26	Entre los cristales de plagioclasa, se presenta en algunos sectores alterados a calcita y en otros sectores desvitrificado.	
Minerales de alteración			
Minerales	%	Observaciones	
Calcita	12	Alteración de plagioclasas.	
Cuarzo-feldespatos	10	Intercrecimiento debido a la alteración del vidrio.	
Cuarzo	4	En vetillas, asociado a fluidos hidrotermales posteriores.	

25X

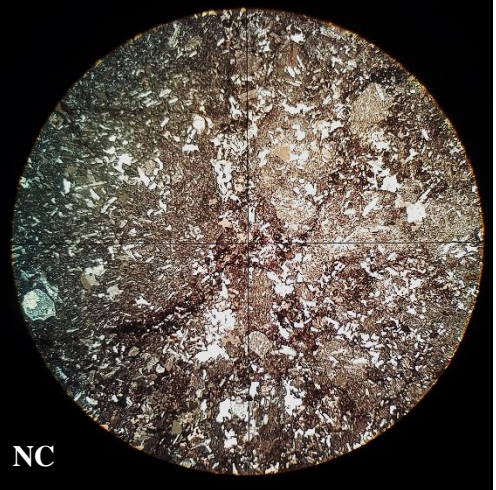
LPP

NC


MUESTRA CPV-15-285			
<b>Ubicación</b>	429.399 E / 7.000.568 N		
<b>Localidad</b>	La Guardia		
<b>Unidad</b>	Formación La Ternera		
<b>Clasificación Textural</b>	Toba ( <i>after</i> Fisher, 1966)		
<b>Clasificación Composicional</b>	Toba Vítreo ( <i>after</i> Schmid, 1981)		
<b>Fábrica</b>	Matriz-soportado		
<b>Texturas</b>	Vitroclástica Fragmental		
<b>Observaciones</b>	La roca presenta, líticos volcánicos intermedios a ácidos en una matriz rica en esquirlas de vidrio y plagioclasas. No se observaron esquirlas soldadas, ni texturas fluidades. Por otro lado, se presentan relleno de cavidades en forma de amígdalas, compuesta por zeolitas principalmente.		
Composición			
Cristales			
Mineral	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	19	Euhedral a subhedral, con alteración moderada a arcillas y en sectores se observan fracturados.	0,15 – 0,2
Opacos	11	Anhedrales, se presentan de forma masiva entre los cristales, esquirlas de vidrio y lítico.	Muy variable
Líticos			
Tipo	%	Descripción	Tamaño (mm)
Volcánico Andesítico	12	Con textura porfídica y locamente pilotaxítica, son ricos en plagioclasas.	1,75 – 5,0
Volcánico Dacítico	4	Se observan de un color más claro, con fenocristales de cuarzo en una masa fundamental afanítica.	0,8
Vidrio			
Tipo	%	Descripción	
Vidrio	40	Se presenta desvitrificado, alterado a calcita. Principalmente en forma de esquirlas.	
Minerales de alteración			
Minerales	%	Observaciones	
Zeolitas	3	Relleno de cavidades en forma de amígdalas.	
Calcita	5	Alterando levemente a plagioclasas y al vidrio volcánico.	
Arcillas	6	Alteración de plagioclasas principalmente y en menor medida del vidrio volcánico.	



25X



LPP

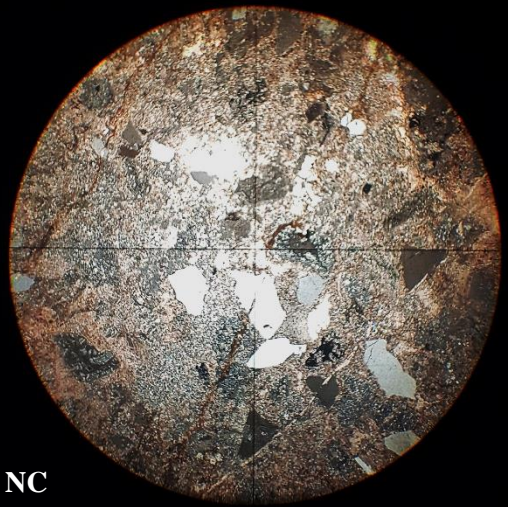
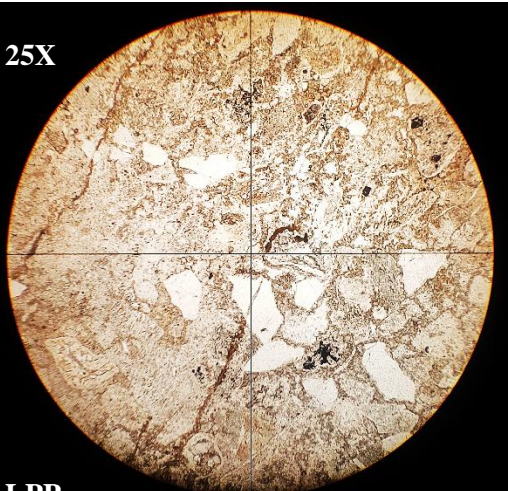


NC

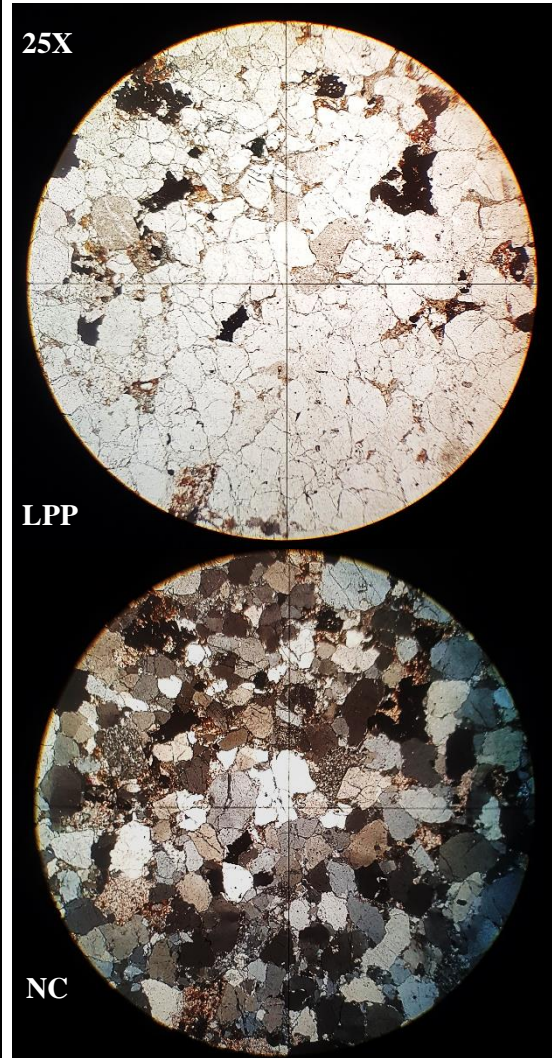




MUESTRA CPV-15-272				
<b>Ubicación</b>	6.897.400 N / 405.515 E			
<b>Localidad</b>	Río Jorquera			
<b>Unidad</b>	Formación La Ternera			
<b>Clasificación Textural</b>	Limo (0%); Arena (100%); Grava (0%): Arenisca (Nichols, 1999)			
<b>Clasificación Composicional</b>	Cuarzo (11%); Feldespato (1%); Líticos (88%): Litarenita volcánica (Folk, 1968)			
<b>Fábrica</b>	Clasto-soportado			
<b>Textura</b>	Clastos: 92%; Matriz: 0%; Cemento: 6%			
<b>Selección</b>	Buena			
<b>Madurez Textural</b>	Buena			
<b>Madurez Composicional</b>	Inmadura			
<b>Tipo de Cemento</b>	Cemento tipo A: Hematita (2%) Silíceo sintaxial (1%) Cemento tipo B: Calcáreo (3%)			
<b>Observaciones</b>	La roca presenta una fuerte alteración a carbonatos, concentrada en los líticos volcánicos, además de venillas de calcita y óxidos de Fe.			
Composición				
Monominerales				
Mineral	%	Esfericidad y redondez		Tamaño / Moda (mm)
Plagioclasa	2	Sub-prismoidal y angular		0,9 / 0,9
Cuarzo	10	Esférico y angular		0,4 - 1,7 / (0,6)
Opacos	4	Esférico y sub-angular		0,1 - 0,9 / 0,5
Líticos				
Tipo	%	Descripción	Esfericidad y redondez	Tamaño / Moda (mm)
Intrusivos	8	Composición intermedia	Subdiscoidal y angular.	1,0 - 1,2 / 1,2
Volcánicos	66*	Volcánicos básicos y volcánicos ácidos.	Sub-prismoidal y angular	0,3 - ,5 / 0,6
Volcanoclásticos	5	Toba cristalina con vidrio de composición básica.	Sub-prismoidal y angular.	0,4 - 0,8 / 0,6
Minerales de alteración				
Minerales	%	Observaciones		
Arcilla	5	Alteración de líticos en general.		
Calcita	*	Alteración concentrada principalmente en los líticos volcánicos ácidos.		



MUESTRA CPV-15-282				
<b>Ubicación</b>	7.000.734 N / 427.981 E			
<b>Localidad</b>	Intersección Quebrada Paipote con San Andrés			
<b>Unidad</b>	Formación La Ternera			
<b>Clasificación Textural</b>	Limo (9%); Arena (91%); Grava (0%): Arenisca (Nichols, 1999)			
<b>Clasificación Composicional</b>	Cuarzo (82%); Feldespato (0%); Líticos (18%): Sublitolarenita (Folk, 1968)			
<b>Fábrica</b>	Clasto-soportado			
<b>Textura</b>	Clastos: 89%; Matriz: 9%; Cemento: 2%			
<b>Selección</b>	Moderada			
<b>Madurez Textural</b>	Madura			
<b>Madurez Composicional</b>	Super-madura			
<b>Tipo de Cemento</b>	Cemento tipo B: arcilloso (2%)			
<b>Observaciones</b>	La roca presenta un porcentaje elevado de cuarzo y una distribución bimodal muy marcada en los tamaños: un tamaño arena gruesa y un tamaño limo.			
Composición				
Monominerales				
Mineral	%	Esfericidad y redondez		Tamaño / Moda (mm)
Cuarzo	75	Esférico y angular		0,09 – 0,9 / (0,6)
Clinopiroxeno	1	Subdiscoidal y angular		0,7 / 0,7
Micas	1	Prismoidal y angular		0,6/0,6
Opacos	6	Esférico y sub-angular		0,1 – 0,9 / (0,5)
Líticos				
Tipo	%	Descripción	Esfericidad y redondez	Tamaño / Moda (mm)
Intrusivos	5	Composición intermedia	Esférico y sub-angular	0,8 – 0,9 / 0,8
Volcánicos	12*	Volcánicos ácidos.	subdiscoidales y sub-angulares	0,5 - 1,7 / (0,6)
Minerales de alteración				
Minerales	%	Observaciones		
Arcilla	*	Alteración de líticos volcánicos		





**ANEXO II**

*Descripción Petrográfica*

*Cerro Guanaco*

## ÍNDICE DE DESCRIPCIONES

<b>Código Muestra</b>	<b>Página</b>
<b>Rocas Volcánicas</b> .....	2
CPV-14-163 .....	3
CPV-14-164 .....	4
CPV-14-166 .....	5
CPV-14-167 .....	6
CPV-14-169A .....	7
CPV-14-171 .....	8
CPV-14-172 .....	9
CPV-14-173 .....	10
CPV-14-174 .....	11
<b>Rocas Volcanoclásticas</b> .....	12
CPV-14-157 .....	13
CPV-14-165 .....	14

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
II.1. Código, coordenadas, unidad y clasificación de la muestra.....	1

En el presente anexo, se encuentran las descripciones de 11 cortes transparentes, organizados en fichas donde se entrega información respecto a su ubicación en coordenadas UTM (Sistema WGS-84, Huso 19H), localidad más cercana, unidad a la cual corresponde cada roca y las características petrográficas más relevantes. A modo de resumen se entrega una tabla, con las clasificaciones petrográficas para cada una de estas muestras (Tabla. II.1).

**Tabla II.1:** Se presenta el código, ubicación y clasificación de las muestras.

<b>Unidad: Cerro Guanaco</b>			
<b>Muestra</b>	<b>E</b>	<b>N</b>	<b>Clasificación</b>
CPV-14-163	486.491	7.248.161	Basalto de Olivino y Ortopiroxeno
CPV-14-164	486.491	7.248.161	Basalto de Ortopiroxeno
CPV-14-166	486.526	7.248.012	Andesita de Hornblenda
CPV-14-167	489.308	7.242.948	Andesita
CPV-14-169A	489.086	7.243.400	Andesita de Biotita
CPV-14-171	488.864	7.243.437	Andesita de Hornblenda
CPV-14-172	488.824	7.243.423	Andesita
CPV-14-173	488.614	7.243.452	Andesita
CPV-14-174	488.503	7.243.570	Andesita de anfíbol
CPV-14-157	475.701	7.225.857	Lapillita Tobácea
CPV-14-165	486.532	7.248.043	Lapillita





**MUESTRA CPV-14-163**

<b>Ubicación</b>	7.248.161 N / 486.491 E
<b>Localidad</b>	Cerro Manchón. N Portezuelo de la Sal
<b>Unidad</b>	Formación Cerro Guanaco
<b>Clasificación</b>	Basalto de Olivino y Ortopiroxeno (Streckeisen, 1978)
<b>Textura</b>	Vitrofidica localmente pilotaxítica
<b>Observaciones</b>	Ferromagnesianos altamente alterados

**Composición**

**Fenocristales**

Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	7*	Euhedral a subhedral, alterada a arcillas y calcita	0.6 – 0.9
Olivino	7	Subhedral y muy alterado a talco y clorita	0.7 – 1.2
Ortopiroxeno	5	Subhedral y muy alterado	0.6 – 1.6

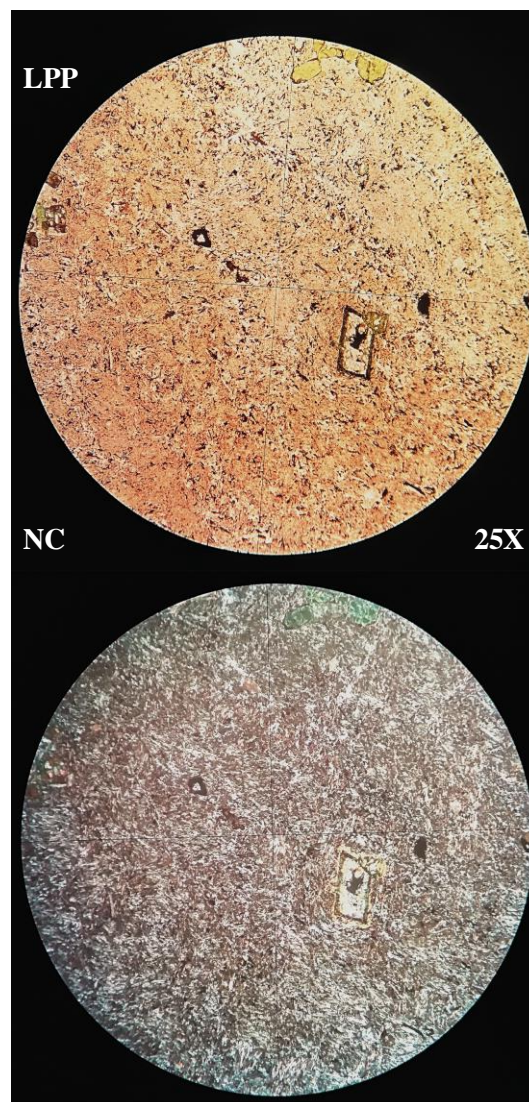
**Masa Fundamental**

Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	33*	Euhedrales a subhedrales, con textura pilotaxítica y alteradas a calcita	<0.06
Vidrio	40	Se presenta desvitrificado	-
Opacos	8	Anhedrales	<0.05

**Minerales de alteración**

Minerales	%	Observaciones
Arcilla	*	Alteración de plagioclasas
Talco	2	Alteración de olivino y ortopiroxeno
Clorita	7	Alteración de olivino y ortopiroxeno
Calcita	7	Altera a fenocristales de plagioclasas y a plagioclasas de la masa fundamental

Opacos	3	Se presentan como vetillas
--------	---	----------------------------



**MUESTRA CPV-14-164**

<b>Ubicación</b>	7.248.161 N / 486.491 E
<b>Localidad</b>	Cerro Manchón. N Portezuelo de la Sal
<b>Unidad</b>	Formación Cerro Guanaco
<b>Clasificación</b>	Basalto de Ortopiroxeno (Streckeisen, 1978)
<b>Textura</b>	Vitrofídica
<b>Observaciones</b>	Ortopiroxenos altamente alterados

**Composición**

**Fenocristales**

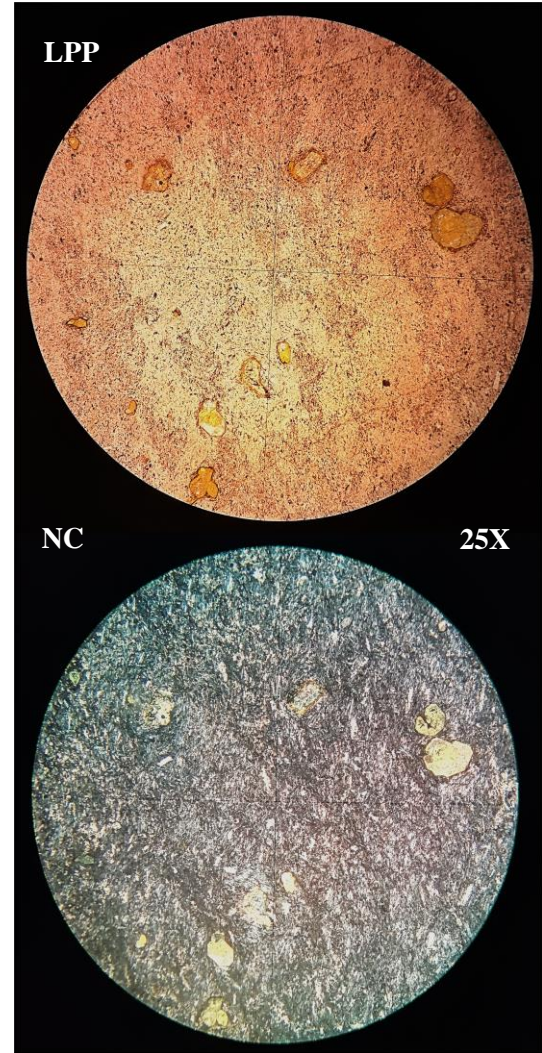
Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	5*	Euhedral a subhedral, alterada a arcillas y calcita	0.2 – 0.5
Ortopiroxeno	14	Euhedral a subhedral y alterado a clorita y talco	0.6 – 2.5
Olivino	3	Anhedral, alterado a talco	0.2 – 0.4
Opacos	3	Anhedral	0.05 – 0.1

**Masa Fundamental**

Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	30*	Euhedral a subhedral, alterada a arcillas y calcita	<0.06
Vidrio	40	Desvitrificado y alterado a calcita	-
Opacos	5	Anhedrales	<0.05

**Minerales de alteración**

Minerales	%	Observaciones
Arcilla	*	Altera a plagioclasas de los fenocristales y masa fundamental
Clorita	3	Alteración de ortopiroxenos
Talco	5	Alteración de cristales de ortopiroxeno y olivino
Calcita	11	Altera al vidrio presente en la masa fundamental





**MUESTRA CPV-14-166**

<b>Ubicación</b>	7.248.012 N / 486.526 E
<b>Localidad</b>	Cerro Manchón. N Portezuelo de la Sal
<b>Unidad</b>	Formación Cerro Guanaco
<b>Clasificación</b>	Andesita de Hornblenda (Streckeisen, 1978)
<b>Textura</b>	Vitrofídica localmente pilotaxítica
<b>Observaciones</b>	Presencia de vetillas de cuarzo, calcita y minerales opacos.

**Composición**

**Fenocristales**

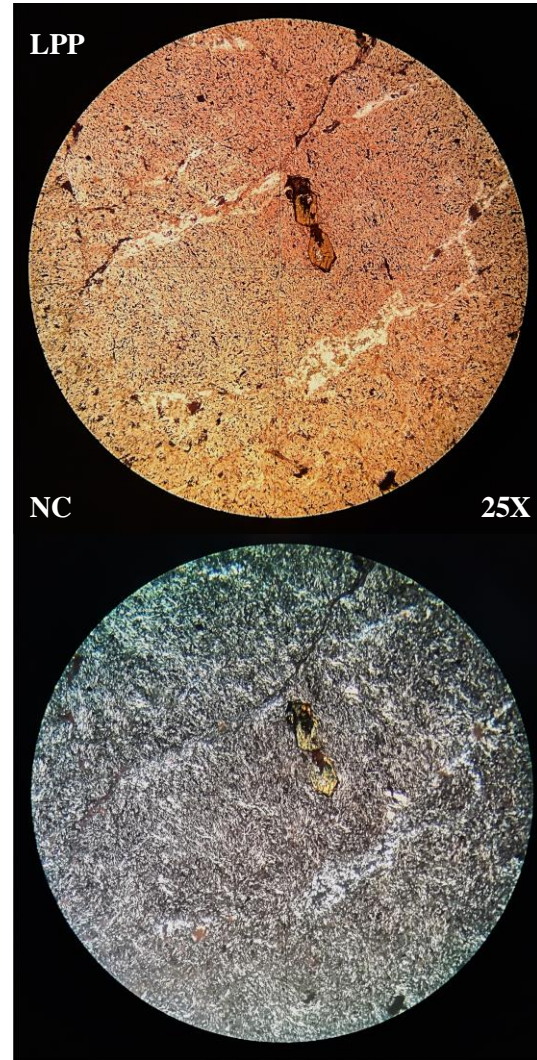
Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	2*	Euhedral a subhedral, alterada a arcilla	0.3 – 0.4
Hornblenda	7	Subhedral, con bordes oxidados (Oxihornblenda)	0.3 – 0.7
Opacos	2	Anhedral	0.05 – 0.1

**Masa Fundamental**

Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	38 *	Euhedral a subhedral, con textura pilotaxítica y alteradas a arcilla y calcita	<0.03
Vidrio	43	Desvitrificado y alterado a calcita	-
Opacos	8	Anhedral	<0.03

**Minerales de alteración**

Minerales	%	Observaciones
Cuarzo	4	En vetillas, de origen hidrotermal
Calcita	4	En vetillas milimétricas
Opacos	2	Presente en vetillas milimétricas
Clorita	5	Alterando a hornblenda
Arcillas	*	Alteración de plagioclasas
Epidota	2	Alterando a hornblenda



**MUESTRA CPV-14-167**

<b>Ubicación</b>	7.242.948 N / 489.308 E
<b>Localidad</b>	Borde Este Cerro Guanaco
<b>Unidad</b>	Formación Cerro Guanaco
<b>Clasificación</b>	Andesita (Streckeisen, 1978)
<b>Textura</b>	Vitrofídica localmente glomeroporfídica
<b>Observaciones</b>	Fenocristales en una masa vítrea y desvitrificada. Presencia de vetillas de cuarzo y calcita.

**Composición**

**Fenocristales**

Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	15	Euhedral a subhedral, alterada a arcillas y calcita*	0.3 – 0.8

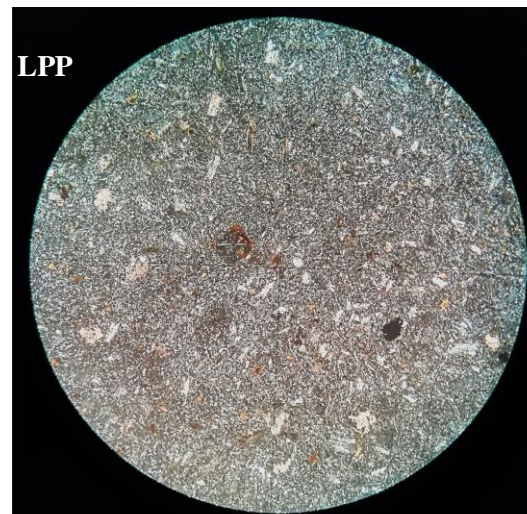
**Masa Fundamental**

Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	19 *	Euhedral a subhedral, alterada a arcillas y calcita	<0.03
Vidrio	60	Altamente desvitrificado	-
Opacos	6	Anhedral	<0.03

**Minerales de alteración**

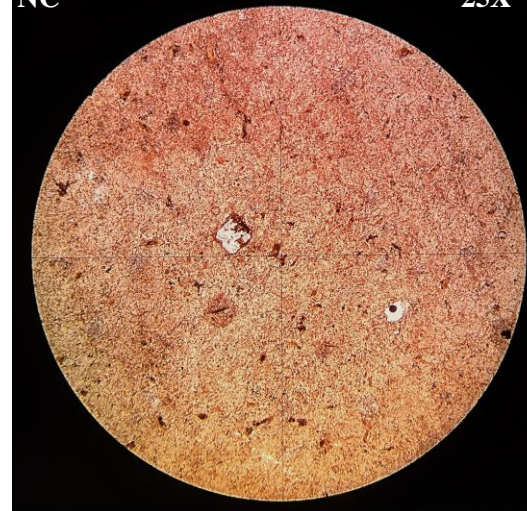
Minerales	%	Observaciones
Arcillas	*	Alteración de plagioclasas
Calcita	*	Alteración de plagioclasas

LPP



NC

25X





**MUESTRA CPV-14-169A**

<b>Ubicación</b>	7.243.400 N / 489.086 E
<b>Localidad</b>	Borde Este Cerro Guanaco
<b>Unidad</b>	Formación Cerro Guanaco
<b>Clasificación</b>	Andesita de biotita (Streckeisen, 1978)
<b>Textura</b>	Vitrofídica
<b>Observaciones</b>	Masa fundamental vítrea y altamente desvitrificada.

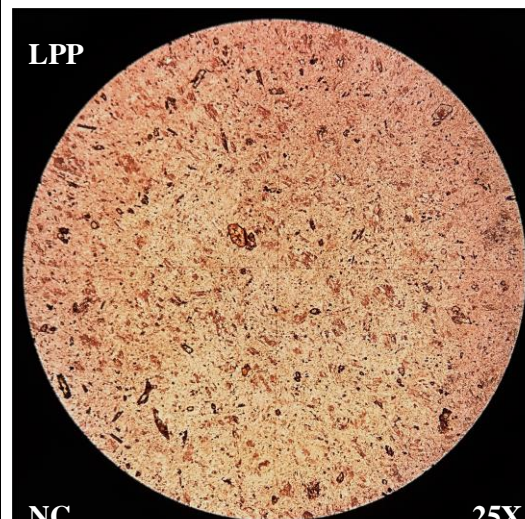
**Composición**

<b>Fenocristales</b>			
Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	8*	Euhedral a subhedral, alterada a arcillas	0.3 – 1.1
Biotita	5	Subhedral a anhedral con alteración a clorita y epidota	0.3 – 1.2
Anfibol	3	Subhedral a anhedral con alteración a clorita y epidota	0.3 – 1.6

<b>Masa Fundamental</b>			
Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	10 *	Subhedral, alterada a arcillas y calcita	<0.3
Vidrio	60 #	Altamente desvitrificado y alterado a calcita	-
Opacos	14	Anhedral	<0.3

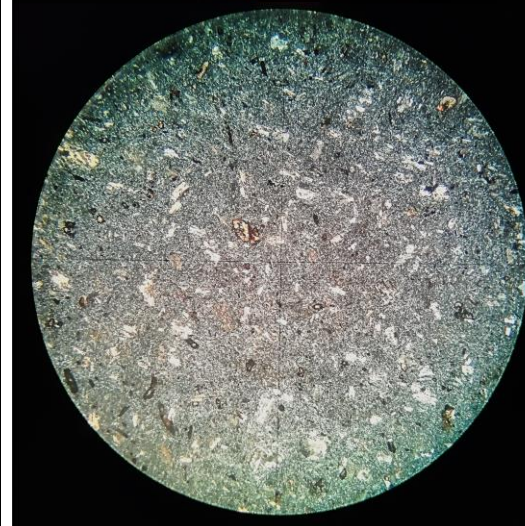
**Minerales de alteración**

Minerales	%	Observaciones
Arcilla	*	Alteración de plagioclasas
Calcita	#*	Alteración de plagioclasas y vidrio
Clorita	2	Alteración de biotita y anfíbol
Epidota	1	Alteración de biotita y anfíbol



NC

25X



**MUESTRA CPV-14-171**

<b>Ubicación</b>	7.243.437 N / 488.864 E
<b>Localidad</b>	Borde E Cerro Guanaco
<b>Unidad</b>	Formación Cerro Guanaco
<b>Clasificación</b>	Andesita de Hornblenda (Streckeisen, 1978)
<b>Textura</b>	Afanítica levemente porfídica y pilotaxítica
<b>Observaciones</b>	Muy poca abundancia de fenocristales, los que a su vez presentan tamaños levemente mayores a los observados en la masa fundamental.

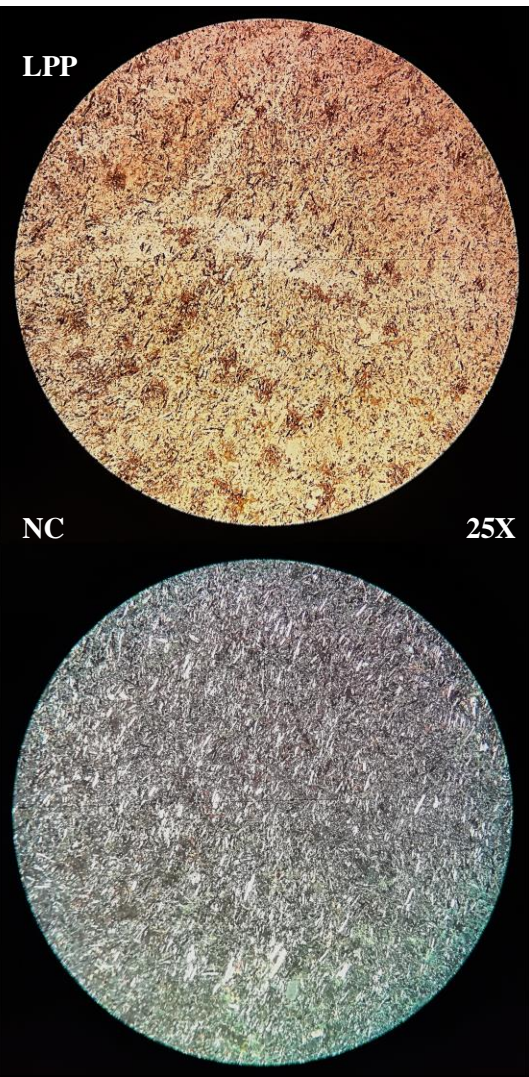
**Composición**

<b>Fenocristales</b>			
Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	7*	Euhedral a subhedral, alterada a arcillas	0.3 – 2.0
Hornblenda	5	Subhedral, fuertemente alterados	0.3 – 1.0

<b>Masa Fundamental</b>			
Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	38*	Euhedrales a subhedral, alteradas a arcillas	<0.06
Vidrio	42	Desvitrificado y alterado a calcita	<0.06
Opacos	8	Anhedral	<0.05

**Minerales de alteración**

Minerales	%	Observaciones
Arcillas	*	Alteración de plagioclasas
Clorita	3	Alteración de hornblenda
Epidota	2	Altera a hornblenda
Calcita	1	Alteración del vidrio.



**MUESTRA CPV-14-172**

<b>Ubicación</b>	7.243.423 N / 488.824 E
<b>Localidad</b>	Borde E cerro Guanaco
<b>Unidad</b>	Formación Cerro Guanaco
<b>Clasificación</b>	Andesita (Streckeisen, 1978)
<b>Textura</b>	Afanítica levemente porfídica
<b>Observaciones</b>	Muy poca abundancia de fenocristales, los que a su vez presentan tamaños levemente mayores a los observados en la masa fundamental.

**Composición**

**Fenocristales**

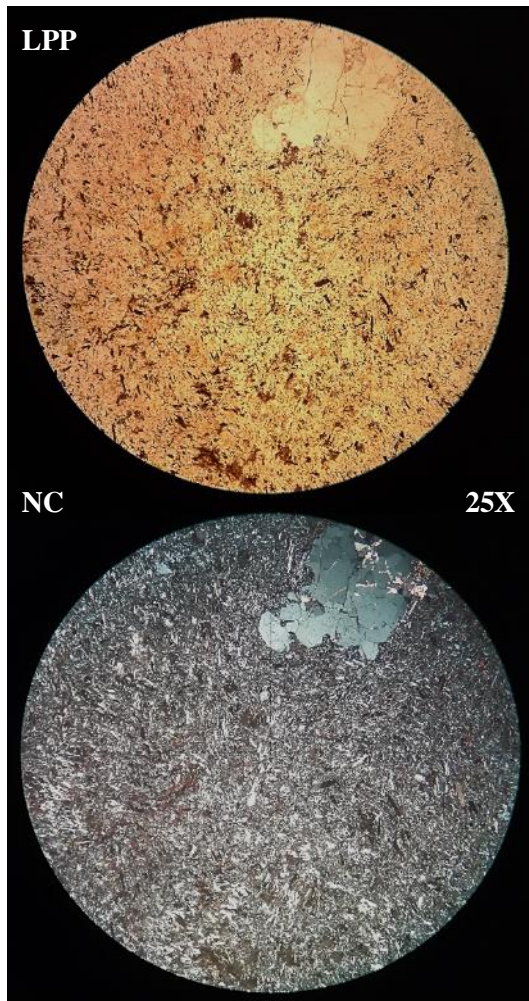
Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	3*	Euhedral a subhedral, alteradas a calcita y arcillas	0.3 – 1
Cuarzo	2	Anhedral	2.5
Hornblenda	3	Subhedral, sumamente alterada	0.1 – 0.3
Opacos	2	Anhedral	0.05 – 0.3

**Masa Fundamental**

Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	38 *	Euhedral a subhedral, con alteración a arcillas y calcita	<0.06
Vidrio	42	Desvitrificado y alterado a calcita	<0.06
Opacos	10	Anhedral	<0.06

**Minerales de alteración**

Minerales	%	Observaciones
Arcillas	*	Altera a plagioclasas
Calcita	15	Altera a plagioclasas y vidrio
Clorita	2	Alteración de hornblenda
Epidota	1	Alteración de hornblenda





**MUESTRA CPV-14-173**

<b>Ubicación</b>	7.243.452 N / 488.614
<b>Localidad</b>	Borde E Cerro Guanaco
<b>Unidad</b>	Formación Cerro Guanaco
<b>Clasificación</b>	Andesita (Streckeisen, 1978)
<b>Textura</b>	Vitrofídica
<b>Observaciones</b>	Masa fundamental vítrea altamente desvitrificada.

**Composición**

**Fenocristales**

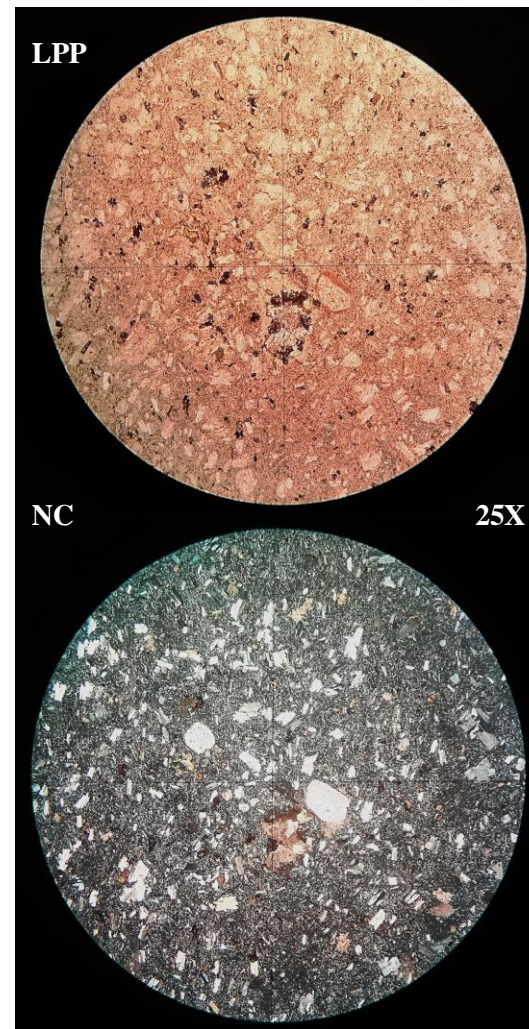
Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	26	Euhedral a subhedral, con alteración a arcillas y calcita	0.3 – 2.0
Anfíbol	3	Subhedral, sumamente alterado	0.1 – 0.3
Opacos	1	Anhedral	0.05 – 0.3

**Masa Fundamental**

Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	5	Subhedral, alterada a calcita y arcillas	<0.06
Vidrio	57	Desvitrificado y alterado a calcita	<0.06
Opacos	8	Anhedral	<0.05

**Minerales de alteración**

Minerales	%	Observaciones
Arcillas	*	Alterando a plagioclasas
Calcita	9	Alteración de vidrio y plagioclasas
Clorita	2	Alteración de anfíbol
Epidota	1	Alteración de anfíbol



**MUESTRA CPV-14-174**

<b>Ubicación</b>	7.243.570 N / 488.503 E
<b>Localidad</b>	Borde E cerro Guanaco
<b>Unidad</b>	Formación Cerro Guanaco
<b>Clasificación</b>	Andesita de Anfíbol (Streckeisen, 1978)
<b>Textura</b>	Vitrofídica localmente glomeroporfídica
<b>Observaciones</b>	Se presentan cristales de plagioclasa de mayor tamaño y en cúmulos

**Composición**

**Fenocristales**

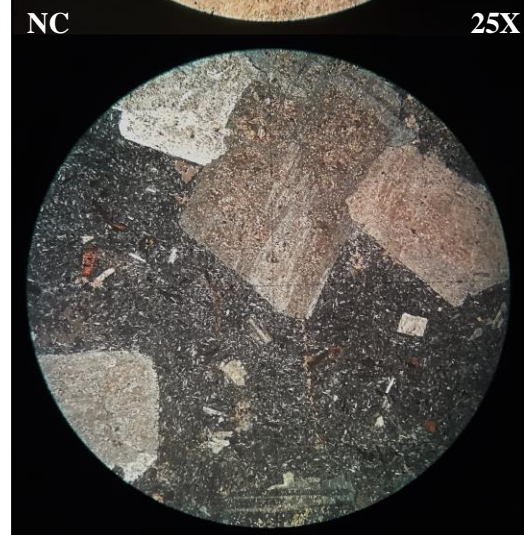
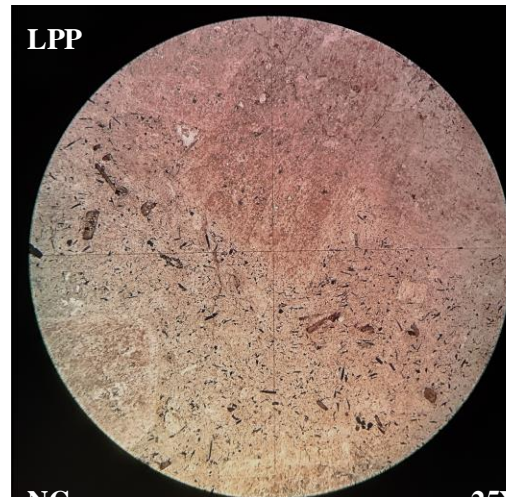
Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	25	Euhedral a subhedral, alterada a arcillas	0.1 – 7.2
Anfíbol	5	Subhedral y biotitizado	0.1 – 0.3
Opacos	2	Anhedral	0.05 – 0.3

**Masa Fundamental**

Minerales	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	7	Subhedral, alterada a arcilla	<0.06
Vidrio	60	Desvitricado y alterado a calcita	<0.06
Opacos	4	Anhedral	<0.06

**Minerales de alteración**

Minerales	%	Observaciones
Arcillas	*	Alteración de plagioclasas
Calcita	7	Alteración leve del vidrio
Biotita	3	Biotitización del anfíbol

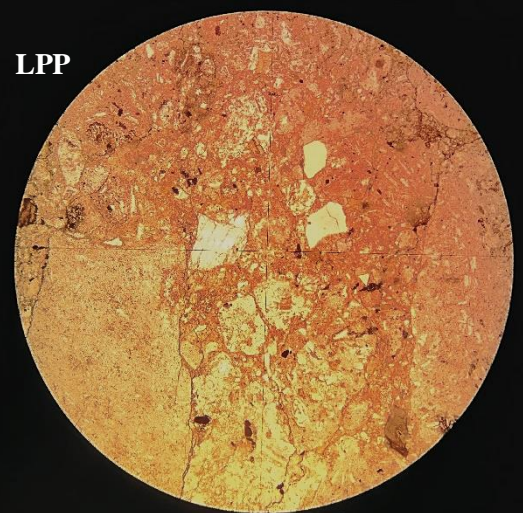




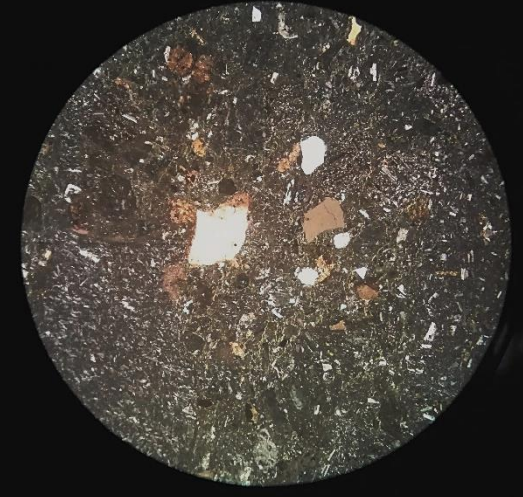
***ROCAS VOLCANOCLÁSTICAS***



MUESTRA CPV-14-157			
Ubicación	7.225.857 N / 475.701 E		
Localidad	S Sierra de Varas. Quebrada del Salitre		
Unidad	Formación Cerro Guanaco		
Clasificación Textural	Lapillita Tobácea ( <i>after</i> Fisher, 1966)		
Clasificación Composicional	-		
Fábrica	Clasto soportado		
Texturas	Fragmental		
Observaciones	Líticos angulosos de gran tamaño, de composición ácida y andesítica en una matriz vítrea desvitrificada y alterada a calcita.		
Composición			
Cristales			
Mineral	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	2*	Cristales fracturados y alterados a arcillas	0.2 – 0.4
Cuarzo	5	Subangulosos	0.2 – 0.9
Opacos	2	Angulosos	0.1 – 0.8
Líticos			
Tipo	%	Descripción	Tamaño (mm)
Volcánicos ácidos	37	Con fenocristales de plagioclasa y biotita, en masa fundamental felsosídica	0.7 – 2.5
Volcánicos andesíticos	36	Textura porfídica. Cristales de plagioclasa y anfíbol.	0.9 – 6.0
Vidrio			
Tipo	%	Descripción	
Vidrio masivo	18	Vidrio desvitrificado y alterado a calcita	
Minerales de alteración			
Minerales	%	Observaciones	
Arcillas	*	Altera a cristales de plagioclasa	
Calcita	10	Alteración del vidrio	



LPP



NC

25X

**MUESTRA CPV-14-165**

<b>Ubicación</b>	7.248.043 N / 486.532 E
<b>Localidad</b>	Cerro Manchón. N portezuelo de la Sal
<b>Unidad</b>	Formación Cerro Guanaco
<b>Clasificación Textural</b>	Lapillita ( <i>after</i> Fisher, 1966)
<b>Clasificación Composicional</b>	-
<b>Fábrica</b>	Clasto soportado
<b>Texturas</b>	Fragmental
<b>Observaciones</b>	Los líticos son exclusivamente volcánicos andesíticos, además de cristales de plagioclasa, todo esto en una matriz vítrea desvitrificada y alterada a calcita.

**Composición**

**Cristales**

Mineral	%	Forma y observaciones	Tamaño (mm)
Plagioclasa	5*	Fragmentados, alterados a arcillas	0.05 – 0.7
Opacos	1	Angulosos	<0.06

**Líticos**

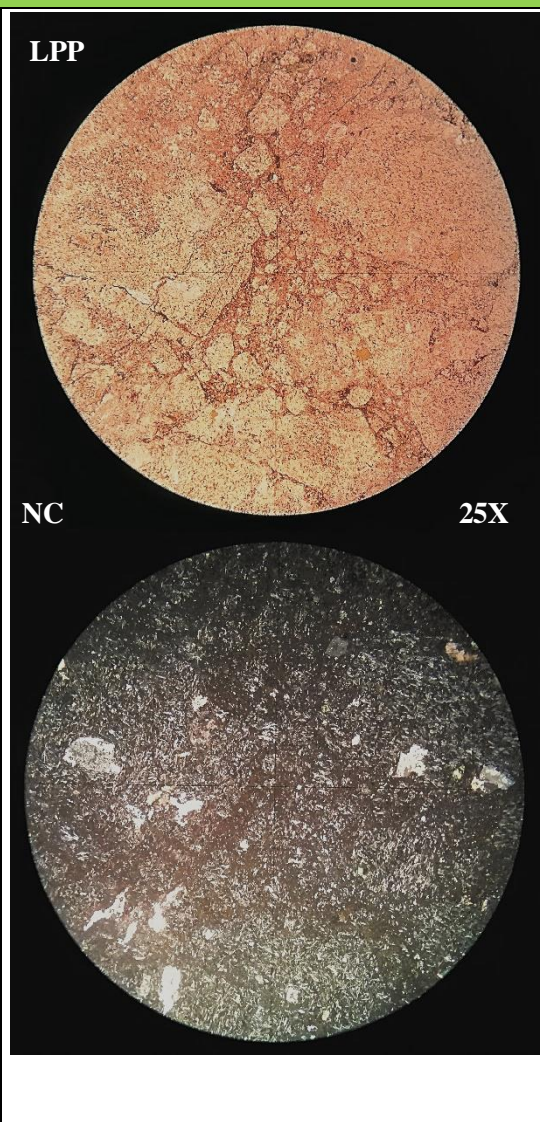
Tipo	%	Descripción	Tamaño (mm)
Volcánicos Andesíticos	65	La mayoría con tamaño mayor a 2 mm. Compuestos prácticamente sólo por plagioclasa, angulosos y fragmentados	0.5 – 7.0

**Vidrio**

Tipo	%	Descripción
Vidrio masivo	29	Desvitrificado y alterado a calcita

**Minerales de alteración**

Minerales	%	Observaciones
Arcillas	*	Altera a cristales de plagioclasas
Calcita	5	Alteración del vidrio volcánico





# ÍNDICE

<b>1 ELEMENTOS MAYORES.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 E.M FORMACIÓN LA TERNERA.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 E.M FORMACIÓN LA TERNERA NORMALIZADOS A BASE ANHIDRA....</b>	<b>1</b>
<b>1.3 E.M FORMACIÓN LA TERNERA CON HIERRO (Fe) AJUSTADO.....</b>	<b>2</b>
<b>2 ELEMENTOS TRAZA.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 FORMACIÓN LA TERNERA.....</b>	<b>2</b>
2.1.1 E.T sin normalización.....	2
2.1.2 E.T (REE normalizadas al condrito).....	3
2.1.3 E.T (Elementos traza normalizados al manto primitivo).....	4
<b>2.2 FORMACIÓN CERRO GUANACO.....</b>	<b>5</b>
2.2.1 E.T sin normalización.....	5
2.2.2 E.T (REE normalizadas al condrito).....	6
2.2.3 E.T (Elementos traza normalizados al manto primitivo).....	6
<b>2.3 FORMACIÓN QUEBRADA DEL SALITRE.....</b>	<b>7</b>
2.3.1 E.T sin normalización.....	7
2.3.2 E.T (REE normalizadas al condrito).....	8
2.3.3 E.T (Elementos traza normalizados al manto primitivo).....	8
<b>2.4 FORMACIÓN LA TOTORA.....</b>	<b>9</b>
2.4.1 E.T sin normalización.....	9
2.4.2 E.T (REE normalizadas al condrito).....	9
2.4.3 E.T (Elementos traza normalizados al manto primitivo).....	10



## 1 ELEMENTOS MAYORES (E.M)

### 1.1 E.M FORMACIÓN LA TERNERA

Análisis químico de E.M expresado en porcentaje en peso (wt%) mediante el método FUS – ICP (Fusion - Inductively Coupled Plasma).

Código	Petrografía	E	N	R	SiO2	Al2O3	Fe2O3(T)	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	LOI	Total sin LOI	Total
CPV-15-271	Basalto	405540	6897409	0,20	51,33	16,50	9,05	0,12	4,99	7,46	3,32	0,15	1,57	0,49	5,02	94,98	100,00
CPV-15-274	Andesita	438698	6931859	0,35	62,25	15,09	6,30	0,10	0,53	2,92	6,03	0,23	1,69	0,35	4,52	95,48	100,00
CPV-15-278	Andesita basáltica	451252	6927171	0,30	50,02	16,38	9,25	0,19	3,91	7,99	3,16	0,52	1,93	0,42	6,25	93,75	100,00
CPV-15-279	Toba vítrea riolítica	448251	6933987	0,50	76,98	11,24	1,58	0,02	0,42	1,87	4,68	0,63	0,11	0,01	2,45	97,55	100,00
CPV-15-280	Toba cristalina riolítica	442475	6933547	0,50	69,92	14,08	3,06	0,01	0,08	2,50	6,22	0,37	0,26	0,03	3,46	96,54	100,00
CPV-15-281	Toba vítrea basáltica	427604	7000335	0,20	71,74	13,99	4,26	0,03	0,27	1,07	1,88	2,97	0,55	0,14	3,08	96,92	100,00
CPV-15-284	Basalto	429399	7000568	0,20	48,59	18,68	10,64	0,11	3,82	3,93	5,97	0,40	1,53	0,18	6,15	93,85	100,00
CPV-15-285	Toba vítrea basáltica	429399	7000568	0,20	64,24	14,69	4,69	0,07	1,30	3,36	6,02	0,31	1,05	0,12	4,15	95,85	100,00
CPV-15-287	Dacita	429509	7000612	0,40	61,86	15,38	5,30	0,09	3,26	5,35	2,63	1,80	0,91	0,22	3,18	96,82	100,00

### 1.2 E.M FORMACIÓN LA TERNERA NORMALIZADOS A BASE ANHIDRA

Código	Petrografía	E	N	R	SiO2	Al2O3	Fe2O3(T)	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	Total
CPV-15-271	Basalto	405540	6897409	0,20	54,04	17,38	9,53	0,13	5,25	7,86	3,50	0,16	1,65	0,51	100,00
CPV-15-274	Andesita	438698	6931859	0,35	65,19	15,80	6,60	0,10	0,56	3,05	6,32	0,24	1,77	0,37	100,00
CPV-15-278	Andesita basáltica	451252	6927171	0,30	53,35	17,47	9,86	0,20	4,17	8,52	3,37	0,55	2,05	0,45	100,00
CPV-15-279	Toba vítrea riolítica	448251	6933987	0,50	78,92	11,53	1,62	0,02	0,43	1,92	4,79	0,65	0,11	0,01	100,00
CPV-15-280	Toba cristalina riolítica	442475	6933547	0,50	72,43	14,58	3,17	0,01	0,08	2,59	6,45	0,39	0,27	0,03	100,00
CPV-15-281	Toba vítrea basáltica	427604	7000335	0,20	74,03	14,43	4,40	0,03	0,28	1,10	1,94	3,07	0,57	0,15	100,00
CPV-15-284	Basalto	429399	7000568	0,20	51,78	19,91	11,33	0,11	4,07	4,18	6,36	0,43	1,63	0,19	100,00
CPV-15-285	Toba vítrea basáltica	429399	7000568	0,20	67,01	15,33	4,90	0,08	1,35	3,50	6,28	0,32	1,10	0,13	100,00
CPV-15-287	Dacita	429509	7000612	0,40	63,90	15,89	5,48	0,09	3,37	5,53	2,72	1,86	0,94	0,23	100,00

### 1.3 E.M FORMACIÓN LA TERNERA CON HIERRO (Fe) AJUSTADO

Código	Petrografía	E	N	R	SiO2	Al2O3	FeO	Fe2O3	Fe medido	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	Total
CPV-15-271	Basalto	405540	6897409	0,20	54,04	17,38	7,94	1,59	9,53	9,37	0,13	5,25	7,86	3,50	0,16	1,65	0,51	100,00
CPV-15-274	Andesita	438698	6931859	0,35	65,19	15,80	4,89	1,71	6,60	6,43	0,10	0,56	3,05	6,32	0,24	1,77	0,37	100,00
CPV-15-278	Andesita basáltica	451252	6927171	0,30	53,35	17,47	7,59	2,28	9,86	9,63	0,20	4,17	8,52	3,37	0,55	2,05	0,45	100,00
CPV-15-279	Toba vítrea riolítica	448251	6933987	0,50	78,92	11,53	1,08	0,54	1,62	1,56	0,02	0,43	1,92	4,79	0,65	0,11	0,01	100,00
CPV-15-280	Toba cristalina riolítica	442475	6933547	0,50	72,43	14,58	2,11	1,06	3,17	3,07	0,01	0,08	2,59	6,45	0,39	0,27	0,03	100,00
CPV-15-281	Toba vítrea basáltica	427604	7000335	0,20	74,03	14,43	3,67	0,73	4,40	4,33	0,03	0,28	1,10	1,94	3,07	0,57	0,15	100,00
CPV-15-284	Basalto	429399	7000568	0,20	51,78	19,91	9,45	1,89	11,33	11,15	0,11	4,07	4,18	6,36	0,43	1,63	0,19	100,00
CPV-15-285	Toba vítrea basáltica	429399	7000568	0,20	67,01	15,33	4,08	0,82	4,90	4,82	0,08	1,35	3,50	6,28	0,32	1,10	0,13	100,00
CPV-15-287	Dacita	429509	7000612	0,40	63,90	15,89	3,91	1,57	5,48	5,32	0,09	3,37	5,53	2,72	1,86	0,94	0,23	100,00

## 2 ELEMENTOS TRAZA (E.T)

### 2.1 FORMACIÓN LA TERNERA

#### 2.1.1 E.T sin normalización

Análisis químico expresado en partes por millón (ppm) obtenido mediante FUS – ICP y FUS – MS (Fusión Mass Spectrometry).

Código	Petrografía	E	N	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
CPV-15-271	Basalto	405540	6897409	23,10	52,90	6,94	30,30	6,53	2,02	5,71	0,83	4,64	0,86	2,43	0,34	2,18	0,31	16,10
CPV-15-274	Andesita	438698	6931859	20,20	45,50	5,90	26,30	6,14	1,85	6,19	0,94	5,65	1,10	3,16	0,45	2,96	0,45	23,20
CPV-15-278	Andesita basáltica	451252	6927171	15,10	35,50	4,92	22,70	6,04	2,06	6,36	1,03	6,05	1,17	3,15	0,46	2,94	0,44	22,20
CPV-15-279	Toba vítrea riolítica	448251	6933987	34,90	74,20	8,42	31,80	7,10	1,07	6,80	1,00	5,34	0,89	2,43	0,38	2,76	0,43	19,70
CPV-15-280	Toba cristalina riolítica	442475	6933547	38,80	84,80	10,70	43,60	9,91	2,32	9,05	1,60	9,98	2,01	5,98	0,91	6,07	0,92	44,20
CPV-15-281	Toba vítrea basáltica	427604	7000335	12,90	29,40	3,56	14,90	4,09	1,05	6,79	1,21	7,49	1,49	4,48	0,68	4,69	0,71	31,80
CPV-15-284	Basalto	429399	7000568	9,97	24,90	3,22	14,00	3,59	1,35	4,25	0,73	4,53	0,91	2,58	0,39	2,41	0,37	18,40
CPV-15-285	Toba vítrea basáltica	429399	7000568	5,49	14,00	2,09	9,47	2,55	0,84	2,79	0,48	2,87	0,56	1,53	0,23	1,38	0,20	10,90
CPV-15-287	Dacita	429509	7000612	26,10	54,20	6,14	23,90	4,91	1,22	4,51	0,70	4,22	0,82	2,37	0,33	2,26	0,34	16,70

Código	Petrografía	E	N	Hf	Nb	Ta	Th	Ba	Sr	Zr	Rb	U	Cs	Pb	K	P	Ti
CPV-15-271	Basalto	405540	6897409	4,10	8,10	0,63	1,63	163,00	613,00	60,00	2,30	0,48	2,30	11,40	1245,21	2138,42	9409,54
CPV-15-274	Andesita	438698	6931859	5,30	6,50	0,58	2,44	153,00	88,00	110,00	4,00	0,55	0,20	5,60	1909,33	1527,44	10080,80
CPV-15-278	Andesita basáltica	451252	6927171	4,50	4,70	0,43	1,18	131,00	375,00	63,70	22,60	0,37	5,30	19,40	4316,74	1832,93	11573,14
CPV-15-279	Toba vítrea riolítica	448251	6933987	5,70	9,00	0,88	9,04	382,00	179,00	142,00	17,80	2,66	0,70	2,50	5229,90	43,64	659,27
CPV-15-280	Toba cristalina riolítica	442475	6933547	10,00	13,40	1,22	9,51	47,00	94,00	333,00	8,90	2,37	0,40	3,30	3071,53	130,92	1564,26
CPV-15-281	Toba vítrea basáltica	427604	7000335	7,80	11,80	1,06	10,60	1140,00	116,00	30,80	143,00	2,36	27,60	10,40	24489,20	610,98	3284,35
CPV-15-284	Basalto	429399	7000568	3,60	2,90	0,33	0,99	135,00	187,00	35,40	12,10	0,32	1,00	6,90	3320,57	785,54	9031,96
CPV-15-285	Toba vítrea basáltica	429399	7000568	1,90	3,10	0,36	1,03	79,00	91,00	37,90	9,70	0,48	0,50	4,40	2573,44	523,69	6304,99
CPV-15-287	Dacita	429509	7000612	5,30	9,40	0,81	4,11	456,00	265,00	64,30	56,00	1,10	1,70	12,80	14942,56	960,11	5429,97

### 2.1.2 E.T (REE normalizadas al Condrito. Sun y McDonough, 1989)

Código	Petrografía	E	N	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
CPV-15-271	Basalto	405540	6897409	97,47	86,30	74,78	66,30	44,12	115,99	28,69	22,99	18,86	15,50	15,19	13,77	13,54	12,60
CPV-15-274	Andesita	438698	6931859	85,23	74,23	63,58	57,55	41,49	109,06	31,11	26,04	22,97	19,82	19,75	18,22	18,39	18,29
CPV-15-278	Andesita basáltica	451252	6927171	63,71	57,91	53,02	49,67	40,81	107,28	31,96	28,53	24,59	21,08	19,69	18,62	18,26	17,89
CPV-15-279	Toba vítrea riolítica	448251	6933987	147,26	121,04	90,73	69,58	47,97	126,11	34,17	27,70	21,71	16,04	15,19	15,38	17,14	17,48
CPV-15-280	Toba cristalina riolítica	442475	6933547	163,71	138,34	115,30	95,40	66,96	176,02	45,48	44,32	40,57	36,22	37,38	36,84	37,70	37,40
CPV-15-281	Toba vítrea basáltica	427604	7000335	54,43	47,96	38,36	32,60	27,64	72,65	34,12	33,52	30,45	26,85	28,00	27,53	29,13	28,86
CPV-15-284	Basalto	429399	7000568	42,07	40,62	34,70	30,63	24,26	63,77	21,36	20,22	18,41	16,40	16,13	15,79	14,97	15,04
CPV-15-285	Toba vítrea basáltica	429399	7000568	23,16	22,84	22,52	20,72	17,23	45,29	14,02	13,30	11,67	10,09	9,56	9,31	8,57	8,13
CPV-15-287	Dacita	429509	7000612	110,13	88,42	66,16	52,30	33,18	87,21	22,66	19,39	17,15	14,77	14,81	13,36	14,04	13,82

### 2.1.3 E.T (Elementos traza normalizados al Manto Primitivo. Sun y McDonough, 1989)

Código	Petrografía	E	N	Cs	Rb	Ba	Th	U	Nb	Ta	K	La	Ce	Pb	Pr
CPV-15-271	Basalto	405540	6897409	310,81	3,62	164,81	19,18	22,86	11,36	15,37	4,98	33,62	29,80	160,56	25,14
CPV-15-274	Andesita	438698	6931859	27,03	6,30	154,70	28,71	26,19	9,12	14,15	7,64	29,40	25,63	78,87	21,38
CPV-15-278	Andesita basáltica	451252	6927171	716,22	35,59	132,46	13,88	17,62	6,59	10,49	17,27	21,98	20,00	273,24	17,83
CPV-15-279	Toba vítrea riolítica	448251	6933987	94,59	28,03	386,25	106,35	126,67	12,62	21,46	20,92	50,80	41,80	35,21	30,51
CPV-15-280	Toba cristalina riolítica	442475	6933547	54,05	14,02	47,52	111,88	112,86	18,79	29,76	12,29	56,48	47,77	46,48	38,77
CPV-15-281	Toba vítrea basáltica	427604	7000335	3729,73	225,20	1152,68	124,71	112,38	16,55	25,85	97,96	18,78	16,56	146,48	12,90
CPV-15-284	Basalto	429399	7000568	135,14	19,06	136,50	11,65	15,24	4,07	8,05	13,28	14,51	14,03	97,18	11,67
CPV-15-285	Toba vítrea basáltica	429399	7000568	67,57	15,28	79,88	12,12	22,86	4,35	8,78	10,29	7,99	7,89	61,97	7,57
CPV-15-287	Dacita	429509	7000612	229,73	88,19	461,07	48,35	52,38	13,18	19,76	59,77	37,99	30,54	180,28	22,25

Continuación

Código	Petrografía	E	N	Sr	P	Nd	Zr	Sm	Eu	Ti	Dy	Y	Yb	Lu
CPV-15-271	Basalto	405540	6897409	29,05	22,51	22,38	5,36	14,71	12,02	7,24	6,30	3,54	4,42	4,19
CPV-15-274	Andesita	438698	6931859	4,17	16,08	19,42	9,82	13,83	11,01	7,75	7,67	5,10	6,00	6,08
CPV-15-278	Andesita basáltica	451252	6927171	17,77	19,29	16,77	5,69	13,60	12,26	8,90	8,21	4,88	5,96	5,95
CPV-15-279	Toba vítrea riolítica	448251	6933987	8,48	0,46	23,49	12,68	15,99	6,37	0,51	7,25	4,33	5,60	5,81
CPV-15-280	Toba cristalina riolítica	442475	6933547	4,45	1,38	32,20	29,73	22,32	13,81	1,20	13,54	9,71	12,31	12,43
CPV-15-281	Toba vítrea basáltica	427604	7000335	5,50	6,43	11,00	2,75	9,21	6,25	2,53	10,16	6,99	9,51	9,59
CPV-15-284	Basalto	429399	7000568	8,86	8,27	10,34	3,16	8,09	8,04	6,95	6,15	4,04	4,89	5,00
CPV-15-285	Toba vítrea basáltica	429399	7000568	4,31	5,51	6,99	3,38	5,74	5,00	4,85	3,89	2,40	2,80	2,70
CPV-15-287	Dacita	429509	7000612	12,56	10,11	17,65	5,74	11,06	7,26	4,18	5,73	3,67	4,58	4,59

## 2.2 FORMACIÓN CERRO GUANACO

### 2.2.1 E.T sin normalización

Análisis químico expresado en partes por millón (ppm) obtenido mediante FUS – ICP y FUS – MS (Fusión Mass Spectrometry).

Muestra	Petrografía	Este	Norte	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
CPV-14-159	Brecha volcánica	486567	7248856	11,90	27,10	3,30	12,80	2,52	0,46	1,97	0,35	2,21	0,46	1,37	0,23	1,49	0,24	12,90
CPV-14-164	Basalto de ortopiroxeno	486491	7248161	15,20	33,20	4,00	15,80	3,25	0,82	3,05	0,51	3,08	0,62	1,82	0,27	1,81	0,31	18,10
CPV-14-166	Andesita de hornblenda	486526	7248012	15,30	29,60	3,45	13,10	2,87	0,65	2,59	0,44	2,70	0,59	1,72	0,28	1,98	0,31	16,40
CPV-14-167	Andesita	489308	7242948	11,20	27,20	3,56	14,70	3,04	0,62	2,28	0,34	1,87	0,39	1,13	0,16	1,12	0,17	11,10
CPV-14-169A	Andesita de biotita	489086	7243400	15,00	34,80	4,04	15,30	2,84	0,60	2,43	0,45	2,63	0,54	1,60	0,25	1,74	0,24	13,70
CPV-14-172	Andesita	488824	7243423	28,20	64,90	7,54	29,10	5,89	1,53	4,75	0,71	4,15	0,83	2,39	0,40	2,60	0,41	23,70
CPV-14-173	Andesita	488614	7243452	36,20	67,60	7,06	23,20	3,84	0,77	2,89	0,45	2,56	0,55	1,62	0,25	1,64	0,27	15,00

Continuación...

Muestra	Petrografía	Este	Norte	Hf	Nb	Ta	Th	Ba	Sr	Zr	Rb	U	Cs	Pb	K	P	Ti
CPV-14-159	Brecha volcánica	486567	7248856	2,40	3,50	0,57	3,83	1312,00	169,00	131,00	88,00	1,03	2,40	-2,50	27477,72	567,33	2337,40
CPV-14-164	Basalto de ortopiroxeno	486491	7248161	3,70	6,30	0,68	3,45	1328,00	82,00	199,00	154,00	1,05	1,70	-2,50	73550,62	829,18	3416,20
CPV-14-166	Andesita de hornblenda	486526	7248012	3,70	5,60	0,68	3,44	664,00	69,00	202,00	89,00	0,93	0,90	-2,50	44080,57	785,54	3296,34
CPV-14-167	Andesita	489308	7242948	2,80	7,70	0,53	4,96	695,00	61,00	140,00	26,00	1,08	2,70	21,00	18180,12	392,77	1738,07
CPV-14-169A	Andesita de biotita	489086	7243400	3,40	6,10	0,71	4,58	907,00	174,00	146,00	28,00	0,68	4,20	-2,50	11954,05	610,98	2097,67
CPV-14-172	Andesita	488824	7243423	4,30	8,20	1,01	6,53	125,00	413,00	254,00	20,00	1,13	0,80	10,00	4399,76	960,11	4195,34
CPV-14-173	Andesita	488614	7243452	3,40	5,80	0,75	4,32	157,00	93,00	185,00	13,00	1,10	1,20	-2,50	6890,18	480,05	2337,40



### 2.2.2 E.T (REE normalizadas al Condrito. Sun y McDonough, 1989)

Muestra	Petrografía	Este	Norte	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
CPV-14-159	Brecha volcánica	486567	7248856	50,21	44,21	35,56	28,01	17,03	8,17	9,90	9,70	8,98	8,29	8,56	9,31	9,25	9,76
CPV-14-164	Basalto de ortopiroxeno	486491	7248161	64,14	54,16	43,10	34,57	21,96	14,56	15,33	14,13	12,52	11,17	11,38	10,93	11,24	12,60
CPV-14-166	Andesita de hornblenda	486526	7248012	64,56	48,29	37,18	28,67	19,39	11,55	13,02	12,19	10,98	10,63	10,75	11,34	12,30	12,60
CPV-14-167	Andesita	489308	7242948	47,26	44,37	38,36	32,17	20,54	11,01	11,46	9,42	7,60	7,03	7,06	6,48	6,96	6,91
CPV-14-169A	Andesita de biotita	489086	7243400	63,29	56,77	43,53	33,48	19,19	10,66	12,21	12,47	10,69	9,73	10,00	10,12	10,81	9,76
CPV-14-172	Andesita	488824	7243423	118,99	105,87	81,25	63,68	39,80	27,18	23,87	19,67	16,87	14,95	14,94	16,19	16,15	16,67
CPV-14-173	Andesita	488614	7243452	152,74	110,28	76,08	50,77	25,95	13,68	14,52	12,47	10,41	9,91	10,13	10,12	10,19	10,98

### 2.2.3 E.T (Elementos traza normalizados al Manto Primitivo. Sun y McDonough, 1989)

Muestra	Petrografía	Este	Norte	Cs	Rb	Ba	Th	U	Nb	Ta	K	La	Ce	Pb	Pr
CPV-14-159	Brecha volcánica	486567	7248856	324,32	138,58	1326,59	45,06	49,05	4,91	13,90	109,91	17,32	15,27	-35,21	11,96
CPV-14-164	Basalto de ortopiroxeno	486491	7248161	229,73	242,52	1342,77	40,59	50,00	8,84	16,59	294,20	22,13	18,70	-35,21	14,49
CPV-14-166	Andesita de hornblenda	486526	7248012	121,62	140,16	671,39	40,47	44,29	7,85	16,59	176,32	22,27	16,68	-35,21	12,50
CPV-14-167	Andesita	489308	7242948	364,86	40,94	702,73	58,35	51,43	10,80	12,93	72,72	16,30	15,32	295,77	12,90
CPV-14-169A	Andesita de biotita	489086	7243400	567,57	44,09	917,09	53,88	32,38	8,56	17,32	47,82	21,83	19,61	-35,21	14,64
CPV-14-172	Andesita	488824	7243423	108,11	31,50	126,39	76,82	53,81	11,50	24,63	17,60	41,05	36,56	140,85	27,32
CPV-14-173	Andesita	488614	7243452	162,16	20,47	158,75	50,82	52,38	8,13	18,29	27,56	52,69	38,08	-35,21	25,58

Muestra	Petrografía	Este	Norte	Sr	P	Nd	Zr	Sm	Eu	Ti	Dy	Y	Yb	Lu
CPV-14-159	Brecha volcánica	486567	7248856	8,01	5,97	9,45	11,70	5,68	2,74	1,80	3,00	2,84	3,02	3,24
CPV-14-164	Basalto de ortopiroxeno	486491	7248161	3,89	8,73	11,67	17,77	7,32	4,88	2,63	4,18	3,98	3,67	4,19
CPV-14-166	Andesita de hornblenda	486526	7248012	3,27	8,27	9,68	18,04	6,46	3,87	2,54	3,66	3,60	4,02	4,19
CPV-14-167	Andesita	489308	7242948	2,89	4,13	10,86	12,50	6,85	3,69	1,34	2,54	2,44	2,27	2,30
CPV-14-169A	Andesita de biotita	489086	7243400	8,25	6,43	11,30	13,04	6,40	3,57	1,61	3,57	3,01	3,53	3,24
CPV-14-172	Andesita	488824	7243423	19,57	10,11	21,49	22,68	13,27	9,11	3,23	5,63	5,21	5,27	5,54
CPV-14-173	Andesita	488614	7243452	4,41	5,05	17,13	16,52	8,65	4,58	1,80	3,47	3,30	3,33	3,65

## 2.3 FORMACIÓN QUEBRADA DEL SALITRE

### 2.3.1 E.T sin normalización

Análisis químico expresado en partes por millón (ppm) obtenido mediante FUS – ICP y FUS – MS (Fusión Mass Spectrometry).

Muestra	Petrografía	Este	Norte	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
CPV-15-310	Riolita	462332	7114194	20,500	38,900	4,230	16,200	3,840	0,480	4,240	0,870	5,780	1,240	3,910	0,600	4,090	0,670	35,400
CPV-15-311	Basalto	467495	7132147	12,600	31,400	4,300	19,400	5,100	1,790	5,960	1,010	6,140	1,190	3,360	0,480	3,240	0,510	32,300
CPV-15-312	Andesita	471764	7136501	24,600	57,700	6,110	23,700	4,940	1,170	4,580	0,740	4,470	0,870	2,600	0,390	2,550	0,400	23,000
CPV-15-314	Riolita (domo)	467881	7125180	58,700	126,000	14,200	53,500	11,800	1,850	11,300	2,020	12,600	2,460	7,200	1,040	6,840	1,100	69,100
CPV-15-319	Dacita	465751	7126652	18,100	37,400	4,430	18,500	4,120	1,080	4,010	0,650	4,000	0,800	2,230	0,340	2,170	0,360	22,100
CPV-15-322	Andesita	460778	7123934	6,690	17,800	2,610	12,300	3,400	1,210	4,100	0,690	4,220	0,850	2,330	0,340	2,250	0,360	15,100

Muestra	Este	Norte	Hf	Nb	Ta	Th	Ba	Sr	Zr	Rb	U	Cs	Pb	K	P	Ti
CPV-15-310	462332	7114194	6,300	9,000	1,130	11,900	1100,000	23,000	170,000	151,000	2,770	3,900	5,000	9904,31	604991,95	189781,42
CPV-15-311	467495	7132147	4,900	10,500	0,770	1,020	451,000	438,000	138,000	21,600	0,340	1,800	6,100	188612,44	491111,11	27147,54
CPV-15-312	471764	7136501	6,100	11,300	0,950	5,680	537,000	90,000	177,000	99,200	1,150	10,100	14,400	38755,98	629903,38	124677,60
CPV-15-314	467881	7125180	9,700	12,600	1,460	14,100	390,000	57,000	70,200	91,000	3,440	3,000	15,600	24545,45	249826,09	114371,58
CPV-15-319	465751	7126652	4,600	9,100	0,830	5,590	148,000	143,000	158,000	71,300	1,830	5,300	7,400	61578,95	562286,63	89612,02
CPV-15-322	460778	7123934	3,100	5,000	0,390	0,590	93,000	140,000	79,000	8,200	0,350	0,300	7,700	60287,08	281143,32	10306,01

### 2.3.2 E.T (REE normalizadas al Condrito. Sun y McDonough, 1989)

Muestra	Petrografía	Este	Norte	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
CPV-15-310	Riolita	462332	7114194	86,50	63,46	45,58	35,45	25,95	8,53	21,31	24,10	23,50	22,34	24,44	24,29	25,40	27,24
CPV-15-311	Basalto	467495	7132147	53,16	51,22	46,34	42,45	34,46	31,79	29,95	27,98	24,96	21,44	21,00	19,43	20,12	20,73
CPV-15-312	Andesita	471764	7136501	103,80	94,13	65,84	51,86	33,38	20,78	23,02	20,50	18,17	15,68	16,25	15,79	15,84	16,26
CPV-15-314	Riolita (domo)	467881	7125180	247,68	205,55	153,02	117,07	79,73	32,86	56,78	55,96	51,22	44,32	45,00	42,11	42,48	44,72
CPV-15-319	Dacita	465751	7126652	76,37	61,01	47,74	40,48	27,84	19,18	20,15	18,01	16,26	14,41	13,94	13,77	13,48	14,63
CPV-15-322	Andesita	460778	7123934	28,23	29,04	28,13	26,91	22,97	21,49	20,60	19,11	17,15	15,32	14,56	13,77	13,98	14,63

### 2.3.3 E.T (Elementos traza normalizados al Manto Primitivo. Sun y McDonough, 1989)

Muestra	Petrografía	Este	Norte	Cs	Rb	Ba	Th	U	Nb	Ta	K	La	Ce	Pb	Pr
CPV-15-310	Riolita	462332	7114194	527,03	237,80	1112,23	140,00	131,90	12,62	27,56	184,62	29,84	21,92	70,42	15,33
CPV-15-311	Basalto	467495	7132147	243,24	34,02	456,02	12,00	16,19	14,73	18,78	23,91	18,34	17,69	85,92	15,58
CPV-15-312	Andesita	471764	7136501	1364,86	156,22	542,97	66,82	54,76	15,85	23,17	62,76	35,81	32,51	202,82	22,14
CPV-15-314	Riolita (domo)	467881	7125180	405,41	143,31	394,34	165,88	163,81	17,67	35,61	98,62	85,44	70,99	219,72	51,45
CPV-15-319	Dacita	465751	7126652	716,22	112,28	149,65	65,76	87,14	12,76	20,24	52,47	26,35	21,07	104,23	16,05
CPV-15-322	Andesita	460778	7123934	40,54	12,91	94,03	6,94	16,67	7,01	9,51	33,87	9,74	10,03	108,45	9,46

Muestra	Petrografía	Este	Norte	Sr	P	Nd	Zr	Sm	Eu	Ti	Dy	Y	Yb	Lu
CPV-15-310	Riolita	462332	7114194	1,09	-0,46	11,96	15,18	8,65	2,86	0,51	7,84	7,78	8,30	9,05
CPV-15-311	Basalto	467495	7132147	20,76	13,32	14,33	12,32	11,49	10,65	8,44	8,33	7,10	6,57	6,89
CPV-15-312	Andesita	471764	7136501	4,27	12,86	17,50	15,80	11,13	6,96	4,10	6,07	5,05	5,17	5,41
CPV-15-314	Riolita (domo)	467881	7125180	2,70	1,84	39,51	6,27	26,58	11,01	0,97	17,10	15,19	13,87	14,86
CPV-15-319	Dacita	465751	7126652	6,78	10,11	13,66	14,11	9,28	6,43	3,64	5,43	4,86	4,40	4,86
CPV-15-322	Andesita	460778	7123934	6,64	8,27	9,08	7,05	7,66	7,20	6,18	5,73	3,32	4,56	4,86

## 2.4 FORMACIÓN LA TOTORA

### 2.4.1 E.T sin normalización

Análisis químico expresado en partes por millón (ppm) obtenido mediante FUS – ICP y FUS – MS (Fusión Mass Spectrometry).

Muestra	Formación	Petrografía	Este	Norte	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
CPV-12-23	La Totora	Andesita	376484	6814323	26,15	52,80	5,12	28,44	6,24	2,01	6,27	0,98	5,58	1,12	3,16	0,42	2,79	0,41	33,30
CPV-12-24	La Totora	Andesita	383333	6826718	1,33	6,30	0,78	5,04	1,37	0,48	1,37	0,23	1,32	0,26	0,72	0,09	0,61	0,08	2,48
CPV-12-60	La Totora	Basalto	382348	6827655	8,87	28,53	3,75	17,66	3,65	1,08	3,27	0,46	2,31	0,43	1,58	0,15	0,99	0,14	13,32
ST-93A	La Totora	Toba Riolítica	386440	6829587	48,69	98,17	11,03	44,91	6,35	0,82	4,46	0,55	3,20	0,68	2,35	0,41	3,41	0,63	N.D.

Muestra	Formación	Petrografía	Este	Norte	Hf	Nb	Ta	Th	Ba	Sr	Zr	Rb	U	Cs	Pb	K	P	Ti
CPV-12-23	La Totora	Andesita	376484	6814323	6,01	9,34	0,47	3,14	391,70	444,24	280,70	20,78	0,71	0,50	8,85	10791,85	1876,57	8031,07
CPV-12-24	La Totora	Andesita	383333	6826718	2,71	3,72	0,18	0,27	17,79	146,52	127,83	0,05	0,23	0,01	10,39	664,11	1614,72	9469,48
CPV-12-60	La Totora	Basalto	382348	6827655	1,87	4,76	0,18	2,04	43,43	199,15	78,92	3,22	0,14	0,77	9,29	2407,41	1440,16	6592,67
ST-93A	La Totora	Toba Riolítica	386440	6829587	2,92	5,88	0,60	5,97	478,37	100,70	90,42	7,17	1,99	0,03	8,99	249,04	87,28	1438,40

### 2.4.2 E.T (REE normalizadas al Condrito. Sun y McDonough, 1989)

Muestra	Petrografía	E	N	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
CPV-12-23	Andesita	376484	6814323	110,34	86,13	55,20	62,23	42,16	35,70	31,51
CPV-12-24	Andesita	383333	6826718	5,61	10,28	8,41	11,03	9,26	8,53	6,88
CPV-12-60	Basalto	382348	6827655	37,43	46,54	40,36	38,64	24,66	19,18	16,43
ST-93A	Toba Riolítica	386440	6829587	205,44	160,15	118,86	98,27	42,91	14,56	22,41

Muestra	Petrografía	Este	Norte	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
CPV-12-23	Andesita	376484	6814323	27,15	22,68	20,18	19,75	17,00	17,33	16,67
CPV-12-24	Andesita	383333	6826718	6,37	5,37	4,68	4,50	3,64	3,79	3,25
CPV-12-60	Basalto	382348	6827655	12,74	9,39	7,75	9,88	6,07	6,15	5,69
ST-93A	Toba Riolítica	386440	6829587	15,24	13,01	12,25	14,69	16,60	21,18	25,61

### 2.4.3 E.T (Elementos traza normalizados al Manto Primitivo. Sun y McDonough, 1989)

Muestra	Petrografía	Este	Norte	Cs	Rb	Ba	Th	U	Nb	Ta	K	La	Ce	Pb	Pr	Sr
CPV-12-23	Andesita	376484	6814323	67,57	32,72	396,06	36,94	33,81	13,10	11,46	43,17	38,06	29,75	124,65	18,56	21,05
CPV-12-24	Andesita	383333	6826718	1,35	0,08	17,99	3,18	10,95	5,22	4,39	2,66	1,94	3,55	146,34	2,83	6,94
CPV-12-60	Basalto	382348	6827655	104,05	5,07	43,91	24,00	6,67	6,68	4,39	9,63	12,91	16,07	130,85	13,57	9,44
ST-93A	Toba Riolítica	386440	6829587	4,05	11,29	483,69	70,24	94,76	8,25	14,63	1,00	70,87	55,31	126,62	39,96	4,77

Muestra	Petrografía	Este	Norte	p	Nd	Zr	Sm	Eu	Ti	Dy	Y	Yb	Lu	Hf
CPV-12-23	Andesita	376484	6814323	19,75	21,00	25,06	14,05	11,96	6,18	7,57	7,32	5,66	5,54	6,01
CPV-12-24	Andesita	383333	6826718	17,00	3,72	11,41	3,09	2,86	7,28	1,79	0,55	1,24	1,08	2,71
CPV-12-60	Basalto	382348	6827655	15,16	13,04	7,05	8,22	6,43	5,07	3,13	2,93	2,01	1,89	1,87
ST-93A	Toba Riolítica	386440	6829587	0,92	33,17	8,07	14,30	4,88	1,11	4,34	-	6,92	8,51	2,92