



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

“¿MUSH O XENOLITOS? ORIGEN DE LOS LÍTICOS GRANITOIDES DE LA IGNIMBRITA LAGUNA DEL MAULE.”

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

FRANCISCA IGNACIA ROJAS ORTEGA

PROFESOR GUÍA:

CLAUDIO CONTRERAS HIDALGO

PROFESOR CO-GUÍA:

ANGELO CASTRUCCIO ÁLVAREZ

COMISIÓN:

MIGUEL PARADA REYES

Este trabajo ha sido financiado por *From Arc Magmas to Ores* (FAMOS) y el Fondo de Movilidad de para la Investigación de la Universidad de O’Higgins.

SANTIAGO DE CHILE

2024

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Geóloga.
POR: Francisca Ignacia Rojas Ortega
FECHA: 2024
PROFESOR GUÍA: Claudio Contreras Hidalgo.

¿MUSH O XENOLITOS? ORIGEN DE LOS LÍTICOS GRANITOIDES DE LA IGNIMBRITA LAGUNA DEL MAULE.

El Complejo Volcánico Laguna del Maule (LdM) ubicado a 400 [km] al sur de Santiago, forma parte de la Zona Volcánica Sur de Chile Central. Se caracteriza por ser uno de los campos volcánicos riolíticos más prolíferos de los Andes alimentado por un reservorio tipo *mush* cristalino. En la época postglacial, destaca la erupción pliniana más grande del complejo volcánico (>17 [km³]), Ignimbrita Laguna del Maule (*rdm*), única que presenta líticos graníticos. Debido a la falta de testimonios naturales en superficie del *mush*, esta memoria intenta descubrir cuál es el origen de estos líticos graníticos y cuál es la evolución magmática que genera este tipo de reservorios mediante una caracterización detallada de análisis geológicos de terreno, geoquímicos, petrológicos y termobarométricos de los líticos graníticos presentes en estos depósitos.

En esta investigación se analizaron 10 muestras de líticos graníticos correspondientes a dos depósitos de *rdm*, recolectadas en la zona norte del complejo volcánico. Se seleccionaron muestras con tamaños mayores a los 10 [cm], en donde se realizaron estudios de geoquímica de roca total y confección de cortes transparentes y pulidos. Con estos cortes, se llevaron a cabo estudios petrológicos, considerando fases minerales y texturales tanto en microscopio óptico como microscopio electrónico de barrido. Por último, se determinaron condiciones intensivas, en feldespatos y anfíboles, mediante el uso de microsonda electrónica.

Los resultados muestran que las rocas corresponden a granitos con altos contenidos de sílice (72-75 %wt.) caracterizados por presentar una asociación de cuarzo, feldespatos, biotita, óxidos de Fe-Ti y \pm anfíboles y clorita. Asimismo, se destaca la presencia de texturas inequigranulares, localización de cúmulos de microcristales en vetillas y poros intergranulares, así como texturas gráficas y mesopertíticas. Además, se determinó que la temperatura y presión de emplazamiento de estos granitos saturados en agua (entre 5-6%wt) corresponde a 750° a 810° C y 0,03 a 1,2 [kbar], respectivamente.

Finalmente, la comparación de las muestras con depósitos porfídicos, evidencia que los líticos graníticos corresponden a granitos hipoabisales formados a partir de fundido intersticial del *mush* cristalino, diferenciándose de cuerpos plutónicos cercanos por su mayor contenido de sílice y menor presión de emplazamiento. La inyección de magmas máficos desde niveles profundos a este reservorio, el cual alimenta lentes riolíticos someros, confirma que LdM corresponde a un Sistema Mágmatco Transcortical, el cual presenta características iniciales similares a las observadas en porfidos cupríferos como Don Manuel o a sistemas geotermale activos como Kakkonda, Japón, lo que destaca a LdM como un sistema magmático silícico joven en una etapa evolutiva temprana.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a los proyectos del *Natural Environment Research Council* (NERC), *From Arc Magmas to Ores* (FAMOS): *a mineral systems approach* y al Fondo de Movilidad de para la Investigación de la Universidad de O'Higgins. Agradezco también a mi profesor guía, Claudio Contreras, quien me dio la oportunidad de realizar esta memoria de título, y estuvo presente siempre con dedicación, compromiso, ayudándome y guiándome durante todo el proceso. Dándome oportunidades para expandir mis conocimientos y compartir con otros científicos. Además, de consejos que los atesorare el resto de mi vida. Más que un profesor guía, fue un referente al cual seguir. Agradezco a todos los que me han acompañado durante mi estadía en la universidad, a mis compañeros y amigos que hice en Geología y Plan Común, que estuvieron en buenos y malos momentos y que me dieron apoyo en cada etapa; al profesor Francisco Delgado, por siempre tener la disposición de contestar mis dudas, al profesor Fernando Barra por facilitarme el microscopio para mi memoria, a los profesores Ángel Castruccio y Miguel Ángel Parada, por sus comentarios que me ayudaron a mejorar mi memoria y a los funcionarios por su importante labor en la facultad. También quiero agradecer a mi familia por siempre apoyarme, guiarme y estar conmigo en cada decisión que he tomado en mi vida. A mis papás, por aconsejarme, estar siempre presentes, ayudarme en todas las necesidades que he tenido y permitirme equivocarme, experimentar y seguir mis sueños. A mis hermanas, por siempre estar ahí, por sus consejos, masajes, palabras de ánimo y siempre confiar en mí. A mis abuelos, que me inculcaron a seguir y perseguir mis sueños, a interesarme por las ciencias y que todo se puede lograr con dedicación y esfuerzo. Por último, quiero agradecerme a mí. Por seguir adelante a pesar de las dudas, por trabajar duro por lo que quiero conseguir, por ser metódica y siempre ver el lado positivo de los desafíos y por permitirme decidir lo que quiero hacer en mi vida.

Muchas gracias a todos.

Tabla de contenido

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Ubicación y accesos.....	3
1.3 Hipótesis	5
1.4.1 Objetivo general	5
1.4.2 Objetivos específicos.....	5
Capítulo 2: Marco Geológico	6
2.1 Basamento y unidades eruptivas en LdM.....	6
2.2 Rocas ígneas intrusivas presentes en LdM.....	7
2.3 Ignimbritas pre-glaciales LdM	8
2.3.1 Ignimbrita Laguna Sin Puerto (unidad <i>igsp</i>)	8
2.3.2 Ignimbrita Cajones de Bobadilla (unidad <i>igcb</i>).....	9
2.4 Ignimbrita Laguna del Maule (unidad <i>rdm</i>)	9
Capítulo 3: Metodologías analíticas	14
3.1 Trabajo de laboratorio.....	14
3.1.1 Tratamiento de muestras.....	14
3.1.2 Microscopia óptica	16
3.1.3 Escalas numéricas.....	17
3.1.4 Análisis con JMicrovision	19
3.2 Geoquímica roca total.....	20
3.3 Microscopia electrónica de barrido (Scanning Electron Microscopy).....	21
3.4 Microsonda electrónica (Electron Probe Microanalyser).....	22
Capítulo 4: Resultados de trabajo de terreno	24
4.1 Depósitos de Ignimbrita Laguna del Maule	24
4.2 Muestras de mano líticas graníticas	26
Capítulo 5: Petrografía	30
5.1 Generalidades	30
5.2 Mineralogía.....	32
5.2.1 Feldespato potásico.....	33
5.2.2 Plagioclasa	33
5.2.3 Cuarzo.....	34
5.2.4 Biotita	35
5.2.5 Anfíbol.....	36
5.2.7 Titanita.....	38
5.2.8 Clorita	39
5.3 Análisis textural	40
5.3.1 Textura inequigranular.....	40
5.3.2 Texturas asociada a vetillas	41

5.3.3 Texturas de intercrecimiento y desequilibrio.....	43
Capítulo 6: Geoquímica de roca total	47
6.1 Elementos mayores.....	47
6.2 Diagramas de variación	50
Capítulo 7: Composición mineral	52
7.1 Feldespatos	52
7.1.1 Plagioclasa.....	53
7.1.2 Feldespato potásico.....	55
7.2 Anfíboles.....	56
Capítulo 8: Discusión.....	59
8.1 Termobarometría.....	59
8.1.1 Anfíboles.....	59
8.1.2 Feldespato.....	60
8.2 Texturas ígneas	64
8.3 Origen de los líticos graníticos	67
Capítulo 9: Conclusión.....	70
Bibliografía.....	71
ANEXOS A : TABLAS COMPLEMENTARIAS	78
ANEXOS B: DESCRIPCIONES PETROLÓGICAS	79
ANEXOS C: DATOS GEOQUÍMICA ROCA TOTAL	131
ANEXOS D: DATOS ELEMENTOS MINERALES OPACOS SEM.....	134

Índice de Figuras

Figura 1: Mapa de acceso puntos de muestreo Ignimbrita Laguna del Maule. (a) Mapa de acceso a Complejo Volcánico Laguna del Maule desde la ciudad de Talca, Chile. (b) Ruta de acceso a puntos de interés dentro del Complejo Volcánico Laguna del Maule.	4
Figura 2: Rocas intrusivas del Cretácico (Granodiorita de los Indios, Kg) y del Terciario (Tg) obtenido de Hildreth <i>et al.</i> (2010).	8
Figura 3: Modelo de <i>mush</i> cristalino debajo del Complejo Volcánico Laguna del Maule obtenido de Singer <i>et al.</i> (2014).	11
Figura 4: Modelo magmático conceptual de la evolución del volcanismo postglacial de LdM obtenido de Klug <i>et al.</i> (2020).	12
Figura 5: Mapa geológico unidades eruptivas en el Complejo Volcánico Laguna del Maule obtenido de Hildreth (2021).	13
Figura 6: Líticos graníticos obtenidos durante la campaña de terreno en el Complejo Volcánico Laguna del Maule correspondiente a dos depósitos de la Ignimbrita Laguna del Maule.	15
Figura 7: Cortes transparentes y pulidos de líticos granitos seleccionados de la Ignimbrita Laguna del Maule a nícoles paralelos y nícoles cruzados. (a) Imagen de corte escaneado de muestra obtenida en el depósito proximal norte, <i>rdm-N-09</i> (b) Imagen de corte escaneado de muestra obtenida en el depósito proximal oeste, <i>rdm-O-06</i>	16
Figura 8. Fotomicrografías tomadas en microscopio óptico a nícoles paralelos y nícoles cruzados (a) Fotomicrografía correspondiente a líticos graníticos obtenidos en el depósito proximal norte, <i>rdm-N</i> (b) Fotomicrografía correspondiente a líticos en el depósito proximal oeste, <i>rdm-O</i> . (c) Fotomicrografía cristal de biotita en líticos graníticos <i>rdm-N</i> . (d) Fotomicrografía cristal de titanita en líticos graníticos <i>rdm-O</i>	17
Figura 9. Metodología utilizada para obtención de escalas numéricas de cortes transparentes y pulidos utilizando ImageJ. (a) Medición de longitud de lámina delgada usando regla numérica en milímetros. (b) Medición de 5 longitudes en pixeles usando el <i>software</i> ImageJ. (c) Configuración de escala usando el promedio de las 5 mediciones y su equivalencia en milímetros. (d) Configuración de barra de escala.	18
Figura 10. Metodología utilizada para obtención de escalas numéricas para distintas magnificaciones en microscopio óptico utilizando ImageJ. (a) Imagen de regla numérica a 2,5X. (b) Imagen de regla numérica a 5X. (c) Imagen de regla numérica a 10X. (d) Interfaz en ImageJ de 5 mediciones para configurar escala de magnificación a 5X.	19
Figura 11. <i>Interfaz de JMicrovision usando point counting. (a) Cuantificación de fases minerales mediante fotomicrografías obtenidas con microscopio óptico. (b) Cuantificación de microlitos y fenocristales utilizando imágenes escaneadas de láminas delgadas.</i>	20
Figura 12. Fotomicrografías obtenidas mediante SEM. (a) Fotomicrografía de muestra obtenida en depósito proximal oeste, <i>rdm-O-06</i> . (b) Fotomicrografía de muestra obtenida en el depósito proximal norte, <i>rdm-N-09</i>	22
Figura 13. Fotomicrografías obtenidas en EMPA, Universidad de Bristol, UK. (a) Fotomicrografía de muestra obtenida en depósito proximal oeste, <i>rdm-O-06</i> . (b) Fotomicrografía de muestra obtenida en depósito proximal norte, <i>rdm-N-09</i>	23
Figura 14. Mapa puntos de muestreo de la Ignimbrita Laguna del Maule en la zona norte de la laguna. Posición del vent de <i>rdm</i> obtenida de Contreras <i>et al.</i> (2022).	25
Figura 15. Fotografías de depósitos durante campaña de terreno. (a) Vista general depósito proximal oeste de la Ignimbrita. (b) Lítico granítico (círculo rojo) obtenido en depósito proximal oeste. (c) Vista general depósito proximal norte de la Ignimbrita Laguna del Maule.	26

Figura 16. Líticos graníticos correspondientes al grupo 1. (a) Muestra de color rosáceo porfídica y tamaño de 13,7 [cm]. (b) Muestra de color grisáceo porfídica y tamaño de 20,4 [cm]. (c) Muestra de color blanquecina porfídica y tamaño 23,3 [cm]. (d) Muestra de color grisáceo porfídica y tamaño 14,8 [cm]. (e) Muestra de color grisáceo porfídica y tamaño 13,5 [cm]. (f) Muestra de color blanquecino porfídica y tamaño 15,5 [cm].	28
Figura 17. Líticos graníticos correspondientes al grupo 2. (a) Muestra de color rosáceo porfídica y tamaño de 15,9 [cm]. (b) Muestra de color blanquecino rosáceo porfídica y tamaño 22,3 [cm]. (c) Muestra de color blanquecino porfídica y tamaño de 14 [cm]. (d) Muestra de color blanquecino poco competente porfídica y tamaño de 16,8 [cm].	29
Figura 18. Diagrama Streckeisen para clasificación de 10 líticos graníticos de la Ignimbrita Laguna del Maule mediante porcentajes modales de fases minerales. Modificado de Streckeisen (1967).	32
Figura 19. Cristales de feldespatos potásicos en grupos de estudio. (a) Cristal de feldespato potásico en grupo 1 tanto a nícoles paralelos como a nícoles cruzados. (b) Cristal de feldespato potásico en grupo 2 a nícoles cruzados.	33
Figura 20. Cristales de plagioclasa en grupos de estudio a nícoles paralelos y nícoles cruzados. (a) Cristal de plagioclasa en grupo 1. (b) Cristal de plagioclasa en grupo 2.	34
Figura 21. Cristales de cuarzo en grupos de estudios a nícoles paralelos y nícoles cruzados. (a) Fenocristal de cuarzo en grupo 2. (b) Cristal de cuarzo en grupo 1. (c) Microlitos y fenocristales de cuarzo en grupo 2. (d) Microlitos y fenocristales de cuarzo en grupo 1.	35
Figura 22. Cristales de biotita en líticos graníticos. (a) Microlitos y fenocristales de biotita a nícoles paralelos y nícoles cruzados en el grupo 1. (b) Fenocristales de biotita a nícoles paralelos y cruzados en grupo 1. (c) Alteración clorítica en cristal de biotita a nícoles paralelos y nícoles cruzados en grupo 1. (d) Imagen SEM de alteración clorítica en grupo 1. (e) y (f) Cristales de biotita a nícoles paralelos y nícoles cruzados en grupo 2.	36
Figura 23. Cristales de anfíboles en el grupo 1. (a) Fenocristales de hornblenda a nícoles paralelos y nícoles cruzados. (b) Alteración clorítica en cristal de anfíbol a nícoles paralelo y nícoles cruzados. (c) y (d) Imágenes SEM de cristales de anfíboles.	37
Figura 24. Cristales de óxidos de Fe y Fe-Ti en líticos graníticos. (a) Fotomicrografía de cristales de óxidos de Fe y Fe-Ti a luz reflejada en el grupo 1. (b) Cristales de óxidos de Fe y Fe-Ti a SEM. (c) Fotomicrografía de cristales de óxidos de Fe y Fe-Ti a luz reflejada en el grupo 2. (d) Cristales de óxidos de Fe y Fe-Ti a SEM.	38
Figura 25. Cristales de titanita en líticos graníticos a nícoles paralelos y nícoles cruzados. (a) y (b) Cristales de titanita en grupo 1. (c) y (d) Cristales de titanita en grupo 2.	39
Figura 26. (a) y (b) Cristales de clorita en líticos graníticos del grupo 1 a nícoles paralelos y nícoles cruzados.	40
Figura 27. Fotomicrografía textura inequigranular asociada a líticos graníticos a nícoles cruzados. (a) y (b) Grupo 1. (c) y (d) Grupo 2.	41
Figura 28. Fotomicrografía de texturas asociada a vetillas en grupo 1. (a) y (b) Fotomicrografía a nícoles cruzados de microlitos de cuarzo. (c) y (d) Fotomicrografía a nícoles cruzados de microlitos de cuarzo asociado a bordes de fenocristales. (e) y (f) Imágenes SEM de crecimiento de microlitos asociado a vetillas.	42
Figura 29. Fotomicrografías de texturas asociadas a vetillas en grupo 2. (a) y (b) Fotomicrografía de cúmulos de microlitos de cuarzo a nícoles cruzados. (c) y (d) Imágenes SEM de crecimiento de microlitos asociado a vetillas.	43
Figura 30. Fotomicrografía a nícoles paralelo y cruzado de textura mesopertítica. (a) Grupo 1. (b) Grupo 2.	44
Figura 31. Fotomicrografía de textura gráfica a nícoles paralelos como nícoles cruzados. (a) Grupo 1. (b) Grupo 2.	44

Figura 32. Zonación normal en cristales de plagioclasa en líticos graníticos. (a) Fotomicrografía de zonación normal a nícoles cruzados en grupo 1. (b) Imagen SEM de zonación normal en grupo 1. (c) Fotomicrografía de zonación normal a nícoles cruzados en grupo 2. (d) Imagen SEM de zonación normal en grupo 2.	45
Figura 33. Fotomicrografías textura consertal en líticos graníticos. (a) Fotomicrografía a nícoles cruzados de bordes irregulares en grupo 1. (b) Fotomicrografía a nícoles cruzados de bordes irregulares en grupo 2. (c) Imagen SEM bordes irregulares en feldespatos, grupo 1. (d) Imagen SEM bordes irregulares en cristales de cuarzo, grupo 2.....	46
Figura 34. Diagrama TAS para líticos graníticos grupos 1 (cuadrados) y 2 (triángulos). Valores de óxidos mayores utilizados normalizados al 100%. Modificado de Middlemost, E.A.K (1994)..	49
Figura 35. Diagrama AFM para líticos graníticos grupos 1 (cuadrados) y 2 (triángulos). Valores de óxidos mayores utilizados normalizados al 100%. Modificado de Rollinson, H. (1996).	50
Figura 36. Diagrama Harker para valores %wt. de óxidos mayores normalizados al 100% de muestras de la Ignimbrita Laguna del Maule para grupo 1(cuadrados) y 2 (triángulos). Valores para Riolita Lomas Los Espejos (<i>rle</i>), Riolita Las Nieblas (<i>rln</i>), Riodacita Cajones de Bobadilla (<i>igcb</i>) y Riodacita Laguna Sin Puerto (<i>igsp</i>) obtenidos de Hildreth <i>et al.</i> (2010) (detalle en Anexos C)	51
Figura 37. Diagrama ternario de composición de feldespatos Ab-An-Or. Miembros límites y solución solida son identificados con formula química. Composición y grupo de muestras analizadas (grupo 1, cuadrado y grupo 2, triángulo) están indicados en el diagrama. Modificado de Greenwood & Earnshaw (1998).	53
Figura 38. Variación porcentaje An núcleo-borde para plagioclasas en líticos graníticos.....	54
Figura 39. Variaciones composicionales borde-núcleo de An en plagioclasas zonadas en grupos de estudio. (a) Plagioclasa zonada del grupo 1 con variación borde-núcleo de An1 – 35. (b) Plagioclasa zonada del grupo 2 con variación borde-núcleo de An19 – 36.....	54
Figura 40. Variación porcentaje Ab y Or núcleo-borde para feldespatos potásico en líticos graníticos.	55
Figura 41. Variaciones composicionales borde-núcleo de An en feldespatos potásicos en grupos de estudio. (a) Cristales de feldespatos potásico del grupo 1 con variación borde-núcleo de Or51 – 58, Or54 – 52, Or66 – 61. (b) Cristales de feldespatos potásico del grupo 2 con variación borde-núcleo de Or64 – 85 y Or84 – 85	56
Figura 42. Diagrama composición de anfíboles cálcicos. Miembros son definidos por el número de átomos en los sitios cristalográficos A, B, C, T, -OH. Composición y grupo de muestras analizadas (grupo 1, cuadrado) están indicados en el diagrama. Modificado de Leake <i>et al.</i> (1997).....	57
Figura 43. Fotomicrografía SEM con puntos de muestreo (círculos verdes) para análisis composicional de anfíboles.	57
Figura 44. Variación núcleo-borde de % de Si en cristales de anfíboles grupo 1.	58
Figura 45. Datos de temperatura usando borde de cristales de plagioclasa y pares núcleo-borde en anfíboles mediante geotermobarómetro de Putirka (2008) para plagioclasa-vidrio, feldespatos-vidrio y Putirka (2016) para anfíbol.....	62
Figura 46. Datos de contenido de agua utilizando higrómetro de Ridolfi <i>et al.</i> (2010) en anfíboles del grupo 1 e higrómetro de Waters & Lange (2015) en plagioclasas del grupo 1 y 2.	63
Figura 47. Fotomicrografías rocas ígneas. (a) Mineralogía de rocas ígneas a nícoles cruzados en depósito El Teniente (Stewes <i>et al.</i> 2005). (b) Mineralogía de roca ígneas a nícoles cruzados en depósito Don Manuel (Gilmer <i>et al.</i> , 2017).....	65
Figura 48. Fotomicrografía SEM rocas félsicas. (a) y (b) Fotomicrografías de rocas félsicas en DMIC (obtenidas de Hannah Ellis). (c) y (d) Fotomicrografía de rocas pertenecientes a grupo 1 en <i>rdm</i>	66

Índice de Tablas

Tabla 1. 10 muestras seleccionadas de un total de 22 líticos graníticos para realizar cortes transparentes y pulidos.	15
Tabla 2. Porcentaje de microlitos y fenocristales en líticos graníticos de la Ignimbrita Laguna del Maule. Análisis de proporciones modales obtenidas con imágenes escaneadas de láminas delgadas.	31
Tabla 3. Porcentaje fases minerales normalizados al 100% en líticos graníticos de la Ignimbrita Laguna del Maule. Análisis de proporciones modales obtenidas con fotomicrografías de láminas delgadas mediante microscopio óptico.	31
Tabla 4. Tamaño de cristales en milímetros para cada fase minerales de las muestras de líticos graníticos obtenidas de la Ignimbrita Laguna del Maule. Identificación de tamaños de cristales obtenidas con fotomicrografías de láminas delgadas mediante microscopio óptico.	32
Tabla 5. Valores %wt. de óxidos mayores normalizados al 100% de líticos graníticos obtenidos en la Ignimbrita Laguna del Maule. Se excluyen valores de muestra <i>rdm-N -02</i>	48
Tabla 6. Número de feldespatos cálcicos (a) y potásicos (b) en líticos graníticos de la Ignimbrita Laguna del Maule. Análisis de un total de 318 puntos, de los cuales 272 fueron usados para la identificación de feldespatos.	52
Tabla 7. Número de anfíboles en líticos graníticos de la Ignimbrita Laguna del Maule. Análisis de un total de 107 puntos, de los cuales 55 fueron usados para la identificación de anfíboles.	56
Tabla 8. Valores de termobarometría para anfíboles mediante geotermobarómetro de Putirka (2016) y Ridolfi <i>et al.</i> (2010).	60
Tabla 9. Valores de temperatura máximo, mínimo y promedio de feldespatos potásicos mediante geotermobarómetro feldespato-vidrio de Putirka (2008).	61
Tabla 10. Valores de temperatura máximo, mínimo y promedio de plagioclasas mediante geotermobarómetro plagioclasa-vidrio de Putirka (2008).	61
Tabla 11. Valores de composición de agua máximo, mínimo y promedio utilizando plagioclasas mediante higrómetro de Waters & Lange (2015).	61
Tabla 12. Resumen de valores composicionales y termobarométricos promedios de grupos de estudio de <i>rdm</i>	63
Tabla 13. Comparación entre pórfidos fértiles, El Teniente y Don Manuel con los grupos de estudio de <i>rdm</i>	66
Tabla 14. Comparación de pórfido fértil Don Manuel con grupos de estudio de <i>rdm</i>	67
Tabla 15. Resumen de evidencias que comprueban el origen de los líticos graníticos de <i>rdm</i>	69

Capítulo 1: Introducción

Un *mush* cristalino (*crystal mush*) se define como un reservorio compuesto por una mezcla entre cristales y fundido silicatado heterogéneo, tal que la movilidad de este es inhibida por la gran proporción de partículas sólidas (cristales; Bachman *et al.*, 2004; Bachman *et al.*, 2008; Cooper, 2017). De acuerdo, a la proporción de cristales dentro del fundido, este puede tener un comportamiento como fluido (< 50% de cristales) o como “esponja rígida” (>50 % cristales; Bachman *et al.*, 2008; Cordell *et al.*, 2020). Características como los altos contenidos de SiO₂ (>60% wt.) y las elevadas viscosidades, las cuales se incrementa con la presencia de cristales y temperaturas relativamente bajas (700° – 900°C para riolitas) en los fundidos, son factores claves que dificultan el movimiento del flujo dentro del reservorio magmático y su ascenso hacia la superficie (Cashman *et al.*, 2017; Cooper, 2017).

Un ejemplo representativo de reservorio magmático tipo *mush* cristalino se encuentra en el Complejo Volcánico Laguna del Maule (LdM; Cordell *et al.*, 2020; Klug *et al.*, 2020; Andersen *et al.*, 2017) localizado a 400 [km] al sur de Santiago de Chile en la cordillera de los Andes Centrales. El complejo volcánico comprende más de 350 [km³] de lava, tefra y depósitos piroclásticos con composiciones basálticas hasta riolíticas de alto contenido de sílice, emitidos desde al menos 130 vents distintos (Hildreth *et al.*, 2010; Andersen *et al.*, 2017). En donde el sistema magmático se caracteriza por inyecciones de magmas máficos a un reservorio somero tipo *mush* cristalino (~450 [km³]) el cual, alimenta distintos lentes silícicos someros (Hildreth, 2021; Contreras *et al.* 2022).

Entre los depósitos riolíticos postglaciales (<25ky; Singer *et al.*, 2000) del Complejo Volcánico Laguna del Maule destacan, por un lado, la riolita Loma Los Espejos (*rle*) y la riolita Las Nieblas (*rln*); ambas asociadas a erupciones Plinianas moderadas con componentes efusivos. Por otro lado, la riolita Laguna del Maule; destaca como la única riolita formadora de depósitos ignimbríticos, generados durante la erupción más temprana y voluminosa de LdM (Contreras *et al.*, 2022).

Estudios previos de diversos autores como Hildreth (2021) y Contreras *et al.*, (2022) han identificado que la Ignimbrita Laguna del Maule (*rdm*) es la única de los depósitos postglaciales de LdM asociada con líticos graníticos como piroclastos. Sin embargo, hasta ahora no se ha realizado un análisis exhaustivo de estos componentes de origen plutónico. En este contexto, surge la interrogante sobre el origen y la historia evolutiva magmática de estos granitoides, considerando que son rocas ígneas intrusivas formadas bajo la superficie.

Debido a la falta de testimonios naturales en superficie del *mush*, esta memoria intenta descubrir cuál es el origen de estos líticos graníticos encontrados en los depósitos de *rdm* y cuál es la evolución magmática que modela los reservorios tipo *mush* cristalino.

1.1 Planteamiento del problema

Los sistemas volcánicos silícicos (>65%wt. de SiO₂) son de profundo interés debido a la generación de grandes erupciones explosivas formadoras de caldera. Éstas dispersan grandes cantidades de ceniza (10⁰ – 10³ [km³]) en áreas extensas. (Andersen *et al.*, 2018; Schipper *et al.*, 2013). Antes de la erupción en superficie, los magmas deben transitar a través de la corteza desde reservorios magmáticos en profundidad, donde son almacenados durante largos periodos de tiempo (~ 0,1– 1 Myr; Hildreth, 2004).

Por más de 100 años, la comunidad científica concordaba que los reservorios magmáticos estaban asociados a un simple modelo de esfera líquida o cámara magmática inmersa en una “roca caja” (Sparks *et al.*, 2018). Sin embargo, en las últimas décadas, modelos físicos señalan que estas cámaras son extremadamente difíciles de encontrar e inestables estructuralmente. Por ello existe una transición a un modelo más complejo en donde las cámaras magmáticas son solo una parte efímera y superficial de un sistema magmático trans-cortical (TCMS) y los reservorios más profundos son considerados *mushes* cristalinos (>50% de cristales) con una baja movilidad del fundido silicatado a través de la corteza (Bachmann & Bergantz., 2009). En donde estos son alimentados por magma menos evolucionado en profundidad, lo que permite al *mush*, alimentar reservorios someros más pequeños (lentes) con distintos estilos eruptivos (Cordell *et al.*, 2020). Encontrar testimonios naturales del *mush* es un gran desafío debido a que no son eruptables como un cuerpo sólido completo. Además, la gran viscosidad (>10⁴ Pa s) que presentan los magmas con alto contenido de SiO₂, influye en la baja movilidad de éstos a través la corteza (Bachmann & Bergantz., 2004; Cashman *et al.*, 2017; Cashman *et al.*, 2020).

El estudio de estos nuevos reservorios magmáticos tipo *mush* cristalino se puede extrapolar a distintos sistemas volcánicos en particular, a los formadores de caldera con alto contenido de sílice (> 65%wt. SiO₂) y reservorios de colosal magnitud. En este sentido, destaca el Complejo Volcánico Laguna del Maule (LdM), uno de los campos volcánicos riolíticos más prolíferos de los Andes caracterizado por ser un TCMS (Cordell *et al.*, 2020). Este presenta erupciones efusivas y explosivas riolíticas pobre en cristales durante el Pleistoceno Medio – Holoceno con una frecuencia y número considerable de erupciones riolíticas y riodacíticas en la época post-glacial (<17 ky; Hildreth, 2021). Y que presenta, la erupción pliniana de mayor magnitud (>17 [km³]) del complejo volcánico y la única en donde se observan líticos graníticos (*rdm*; Contreras *et al.*, 2022).

La ausencia de evidencia superficial de cuerpos graníticos a menos 5 [km] de la posible fuente emisora de la ignimbrita *rdm*, plantea un importante interés en determinar el origen de estos líticos granitoides. En este sentido destacan dos grandes alternativas: podrían tratarse de rocas ígneas similares al basamento del Complejo Volcánico Laguna del Maule, o bien constituir testimonios del *mush* riodacítico subyacente. No obstante, dada la falta de testimonios naturales a escala global de los *mushes* en superficie, el estudio de estos líticos graníticos expuestos proporciona una oportunidad única para comprender las características de un *mush* silícico y los procesos que conducen a su formación.

1.2 Ubicación y accesos

La zona de estudio para este trabajo se encuentra en la comuna de San Clemente, a 400 [km] al sur de Santiago y 150 [km] al este de Talca por el camino internacional San Clemente-Paso Pehuenche. El acceso principal al área se realiza desde Talca (Fig. 1a). Desde acá se sigue por la avenida San Miguel camino hacia San Clemente durante 13 [km] en camioneta hasta llegar a la avenida Huamachuco y tomar la Ruta 115 en dirección al Paso Internacional Pehuenche durante 115 [km] hasta la Aduana Chilena Paso Pehuenche.

Debido a las condiciones meteorológicas de alta montaña, el Complejo Volcánico Laguna del Maule solo es posible visitarlo entre fines de noviembre e inicios de abril.

Una vez dentro del Complejo Volcánico Laguna del Maule (Fig. 1b), se visitan los dos sitios de muestreo de la Ignimbrita Laguna del Maule tanto al norte como al oeste de la Laguna del Maule.

Por un lado, para llegar al sitio de muestreo al oeste y más próximo a la Aduana Chilena se bordea la Laguna del Maule siguiendo la ruta 115 en dirección hacia Argentina durante 5,4 [km]. El depósito se encuentra a 1 [m] al norte de la ruta 115 en la vereda norte del camino y al norte de la laguna.

Por otro lado, para visitar el depósito más hacia el norte de la Laguna del Maule se sigue la ruta 115 en dirección a Argentina durante 0,7 [km]. En este punto, se abandona la ruta 115 y se sigue en dirección noreste bordeando la orilla de la Laguna del Maule a pie por 1,5 [km] hasta llegar al depósito más próximo al vent (a 1,7 [km] al suroeste del depósito; Contreras *et al.* 2022) del Complejo Volcánico Laguna del Maule.

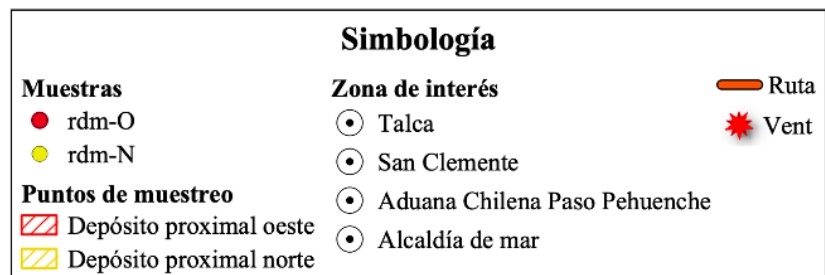


Figura 1: Mapa de acceso puntos de muestreo Ignimbrita Laguna del Maule. (a) Mapa de acceso a Complejo Volcánico Laguna del Maule desde la ciudad de Talca, Chile. (b) Ruta de acceso a puntos de interés dentro del Complejo Volcánico Laguna del Maule.

1.3 Hipótesis

Debido a la ausencia de cuerpos intrusivos en superficie a <10 km de la fuente de la ignimbrita Laguna del Maule, los líticos graníticos deberían corresponder a fragmentos del *mush* cristalino, autolíticos proveniente de los bordes donde se alojó el magma riolítico o cuerpos intrusivos menores destruidos por la erupción. Las condiciones físicas del *mush* silíceo y las condiciones intensivas de formación de estos granitos sugieren que la primera es la opción más factible.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Determinar el origen de líticos granitoides de la Ignimbrita Laguna del Maule.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar las condiciones intensivas de formación y emplazamiento de granitos en LdM.
- Interpretar procesos magmáticos a partir de las texturas de cristales.
- Analizar comparativamente las características de los granitos de LdM con la de otros cuerpos ígneos de Chile central y con sistemas volcánicos geotermales.

Capítulo 2: Marco Geológico

El campo volcánico cuaternario LdM en el transarco está situado a ~330 [km] al este del eje de la fosa, a ~130 -150 [km] sobre la zona de Benioff y a 40-50 [km] sobre el Moho continental. Además, forma parte de la Zona Volcánica Sur (SVZ) de Chile Central y es contiguo hacia el este al Complejo estrato-volcánico Tatara – San Pedro - Pellado (frente volcánico del arco Cuaternario Andino; Andersen *et al.*, 2018)

Entre los 32°S y 37°S, el arco se caracteriza por un gradiente en el grosor de la corteza desde 30 [km] en el sur hasta 60 [km] en el norte, lo cual se correlaciona con una transición desde productos andesíticos-basálticos a intermedios que contienen anfíbol (Hildreth *et al.*, 2010; Andersen *et al.*, 2017).

La actividad volcánica de LdM comprende más de 350 [km³] de lava, tefra y depósitos piroclásticos con composiciones basálticas hasta riolíticas de alto contenido de sílice, emitidos desde al menos 130 vents. Las erupciones cuaternarias se superponen a rocas volcánicas y volcano-clásticas del Paleógeno al Neógeno y a plutones y estratos sedimentarios del Plioceno al Mesozoico. Las unidades eruptivas cuaternarias pre-glaciales incluyen 4 basaltos, 28 andesitas máficas (52 – 57 %wt. SiO₂), 33 andesitas, 11 dacitas (63 – 68%wt. SiO₂), 23 riodacitas, 2 riolitas (>72 %wt. SiO₂) y 6 ignimbritas (andesíticas a riolíticas; Andersen *et al.*, 2017).

Por otro lado, el volcanismo postglacial está concentrado en la cuenca del lago LdM, produciendo 36 domos, coladas silíceas y docenas de erupciones explosivas desde al menos 24 vents que rodean el lago. Dentro de esto, los flujos de riolita preservados son vitrofiricos y contienen menos del 5% de fenocristales modales, los cuales constituyen plagioclasa, biotita subordinada, óxido de Fe-Ti, cuarzo disperso, zircón accesorio, apatito, inclusiones de FeS en magnetita y anfíboles (Andersen *et al.*, 2017).

Esta memoria tiene como objetivo estudiar las unidades post-glaciales de LdM. A continuación, se describe las rocas presentes en el Complejo Volcánico Laguna del Maule. Además, de las riolitas, riodacitas y depósitos postglaciares presentes en el campo volcánico.

2.1 Basamento y unidades eruptivas en LdM

El Complejo Volcánico Laguna del Maule se superpone a las siguientes formaciones volcanogénicas: en el Cretácico, plutones graníticos, en particular Granodiorita de Los Indios (54 – 68 %wt. de SiO₂). En el Oligoceno tardío al Mioceno temprano se encuentra la Formación Cura-Mallín. Esta consiste en estratos sedimentario volcano-clásticos no marinos con lavas y unidades piroclásticas. En el Mioceno, la Formación Trapa-Trapa formada por lavas máficas a andesíticas, depósitos piroclásticos y estratos volcano-sedimentario. Desde el Mioceno al Plioceno, rocas volcánicas intermedias a silíceas e ignimbritas de la Formación Campanario y la Formación Cola

de Zorro del Plioceno al Pleistoceno, constituida de lavas máficas a intermedias. (Hildreth *et al.*, 2010 y Contreras *et al.*, 2022).

2.2 Rocas ígneas intrusivas presentes en LdM

Las rocas ígneas intrusivas presentes en el Complejo Volcánico Laguna del Maule corresponden a plutones de composición granítica del Cretácico y del Terciario expuestos en varios puntos en los márgenes del campo volcánico (Fig.2).

Dentro de las rocas ígneas del Cretácico, destaca la granodiorita de Los Indios. Plutón granítico (54 – 68 %wt. SiO₂) de 15 [km] de longitud perteneciente al Cretácico. En cuanto a la composición mineral, esta presenta fases minerales de cuarzo, feldespatos, biotita y muscovita. Además, de minerales de alteración hidrotermal como clorita, sericita y epidota. Esta roca ígnea aflora a 6 [km] al sur de la confluencia de los ríos de La Plata y Maule hasta 4 [km] al norte del río Puelche (Hildreth *et al.*,2010).

En cuanto a las rocas ígneas del Terciario (Diorita Cari Launa y la Diorita Vego Larga) las cuales presentan <68%wt. de SiO₂, presiones de emplazamiento de 1-2,5 [kbar], temperaturas de 700°-800°C. En cuanto a la mineralogía, estos presentan plagioclasa (An₂₀₋₃₄), cuarzo, feldespato potásico, biotita, óxidos de Fe-Ti (similar a manos grupos de estudio) con texturas porfídicas y zonación en plagioclasas (Hildreth *et al.*,2010).

Además, de cuerpos ígneos intrusivos erráticos con formas redondas, composiciones granodioritas (60-65 %wt. de SiO₂), presiones de emplazamiento >3,5 [kbar] y temperaturas >850°C. En cuanto a la mineralogía, estos presentan feldespatos, cuarzo, biotita, hornblenda y clorita (Hildreth *et al.*,2010).

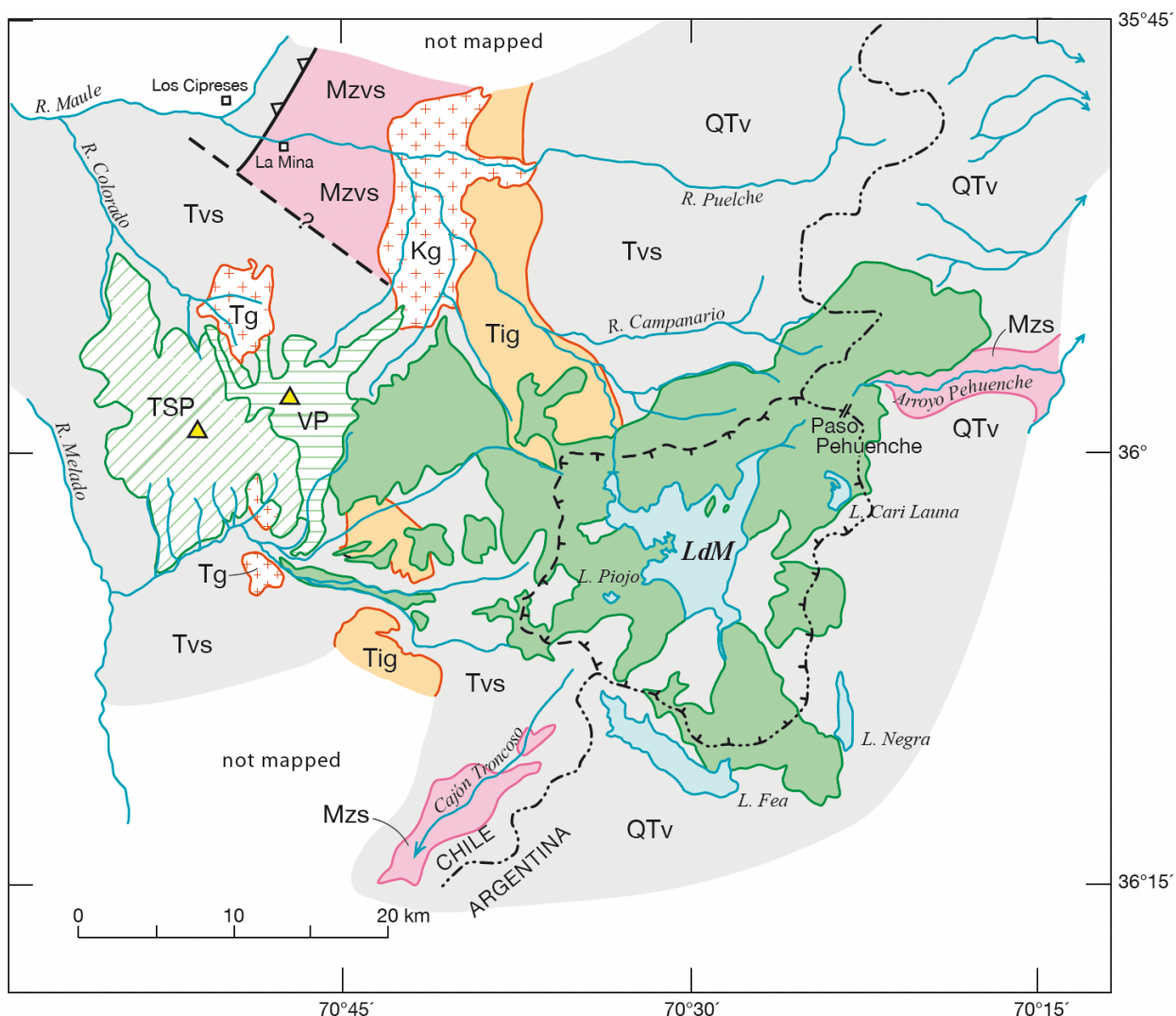


Figura 2: Rocas intrusivas del Cretácico (Granodiorita de los Indios, Kg) y del Terciario (Tg) obtenido de Hildreth *et al.*(2010).

2.3 Ignimbritas pre-glaciales LdM

Composición basáltica andesítica a andesítica dominan gran parte de la historia eruptiva del campo volcánico de LdM. Sin embargo, erupciones silíceas, con composiciones dacítica a riolíticas, han ocurrido durante el Plioceno y Pleistoceno. De estas, dos ignimbritas silíceas se conservan en la cuenca del lago de LdM; Ignimbrita Laguna Sin Puerto (*igsp*) e Ignimbrita Cajones de Bobadilla (*igcb*) (Andersen *et al.*, 2017; Fig. 5).

2.3.1 Ignimbrita Laguna Sin Puerto (unidad *igsp*)

Depósito dacítico (64 – 70 %wt. de SiO₂) de 1489 ± 15 ky (Andersen *et al.*, 2017) localizada en la zona norte y oeste de LdM. Su composición está dada por abundantes inclusiones líticas (5 – 10% de la roca total) de composición riolítica pobre en cristales, lavas intermedias ricas en cristales, escoria y clastos con alteración hidrotermal. En cuando a la mineralogía, predominan

fenocristales de plagioclasa, orto- y clinopiroxeno. Por otro lado, la composición de los fiammes presentes en *igsp*, contienen un 10 % de cristales y 15 a 30% de matriz compuesta de ceniza.

2.3.2 Ignimbrita Cajones de Bobadilla (unidad *igcb*)

Depósito riódacítico (66 – 72 %wt. de SiO₂) de 990 ± 13 ky dado por el colapso de una caldera elíptica de 80 [km²] producto de la erupción más voluminosa en el Cuaternario en LdM (Andersen *et al.*, 2017). Su composición está dada por clastos de pumita de 30 [cm] de diámetro, fragmentos líticos menores a 4 [cm] con composiciones andesítica y clastos félsicos con alteración hidrotermal (Hildreth *et al.*, 2010).

En cuando a la mineralogía, predominan fenocristales de plagioclasa (10 – 20 %), biotita (2 – 5 %), cuarzo disperso, orto- y clinopiroxeno y óxidos de Fe-Ti. Por otro lado, la composición de los fiammes presente en la unidad *igcb* contienen ~15% de fenocristales de plagioclasa (Hildreth *et al.*, 2010).

2.4 Ignimbrita Laguna del Maule (unidad *rdm*)

Desde la desglaciación de la Patagonia (< 25 ky; Singer *et al.*, 2000), LdM ha producido más de 40 riolitas desde, al menos, 24 vents distintos limitados a la cuenca de LdM en el borde sureste (Hildreth, 2021). Dentro de los depósitos y unidades post glaciales en el Complejo Volcánico Laguna del Maule, destaca la Ignimbrita Laguna del Maule (*rdm*), primera ignimbrita pliniana riolítica en LdM (~23 ky; Contreras-Hidalgo, 2020) dada por la erupción más temprana y voluminosa desde la desglaciación en el campo volcánico (Hildreth, 2021).

El *mush* cristalino que dio origen tanto al reservorio como al depósito de *rdm*, corresponde a un cuerpo magmático voluminoso de ~400 [km³] altamente cristalino (Fig. 3; Andersen *et al.*, 2019) con una densidad de 1800 – 1900 kg/ m³ (Andersen *et al.*, 2018), localizado a una profundidad de 2 – 8 [km] debajo del campo volcánico (Singer *et al.*, 2014; Wespestad *et al.*, 2019). Este consiste en una mezcla de cristales sólidos (40 – 50%, Wespestad *et al.*, 2019) y líquido intersticial (fundido silicatado) heterogéneo, que incluye zonas de alta temperatura y largos periodos de tiempo junto a voluminosos *mush* cristalinos más fríos (Andersen *et al.*, 2019). Este *mush* está vinculado a un magma parental con composiciones andecíticas-dacíticas (62-68%wt. SiO₂) y un contenido de agua entre 5-6%wt., lo que indica que el sistema magmático estaba altamente saturado en volátiles. Este magma parental presenta condiciones de emplazamiento de 0,9 a 3 [kbar] y temperaturas entre 850° a 950°C. En donde, las repetidas inyecciones de magma máfico en la base del sistema (Fig. 4), no solo mantuvieron el estado parcialmente fundido del *mush*, sino que también, promovieron la separación del fundido silicatado intersticial de los cristales, acumulándose en las zonas someras del reservorio magmático. Este proceso generó un gradiente térmico y químico dentro del sistema, favoreciendo la diferenciación magmática y la evolución hacia composiciones más silíceas, mientras los cristales sólidos, como plagioclasas anortíticas (An₄₁₋₅₉), cuarzo y hornblenda, se concentraron en las zonas más densas del *mush*. Estas dinámicas resaltan la interacción continua

entre las partes más “líquidas” (zona de baja resistividad) y sólidas del sistema, contribuyendo a la heterogeneidad del reservorio magmático debajo del campo volcánico (Singer *et al.*, 2014; Contreras *et al.*, 2022).

Tanto la riolita *rdm* como la Ignimbrita Laguna del Maule, reflejan la interacción y evolución entre el magma parental andesítico-dacítico y la corteza. Por un lado, la riolita *rdm* (>76 %wt de SiO₂) presenta una mineralogía con plagioclasas (An₂₈₋₃₄), hornblenda, cuarzo, feldespatos potásicos y óxidos de Fe-Ti. En cuando a las condiciones de emplazamiento se dan a presiones entre 0,9-3,5 [kbar], temperaturas entre 850°-900°C y contenidos de agua cercano a la saturación (~4,6-5,8 %wt. H₂O; Contreras *et al.*, 2022). Por otro lado, la composición de *rdm* consiste en depósitos explosivos no continuos (flujos y depósitos de caída piroclásticos) que se extiendan por más de 100 [km] al este de Argentina (Fig. 5). Estos depósitos incluyen juveniles y enclaves máficos y líticos granitoides. Los juveniles máficos tienen composiciones andesíticas máficas con olivinos y andesíticas con hornblenda. Mientras que los líticos granitoides presentan composiciones desde andesíticas hasta riolíticas (62 – 73 %wt. de SiO₂; Contreras *et al.*, 2022).

En este sentido, *rdm* corresponde a la fase temprana de la riolita Loma Los Espejos (*rle*), la cual está compuesta por flujos de lava y depósitos de caída, sin presencia de líticos graníticos (Hildreth *et al.*, 2010).

A pesar de que *rdm* es el único depósito en LdM que presenta líticos granitoides (Hildreth, 2021; Contreras *et al.*, 2021), no hay estudios exhaustivos sobre estos líticos. En este sentido, la autora que describe de forma general los líticos graníticos de *rdm* es Judith Fierstein en un Conference Paper. Sin embargo, no realiza un mayor detalle de estos. En consecuencia, esta memoria intenta realizar el primer análisis detallado del origen de estos líticos graníticos considerando composición química, físicas y mineralógicas.

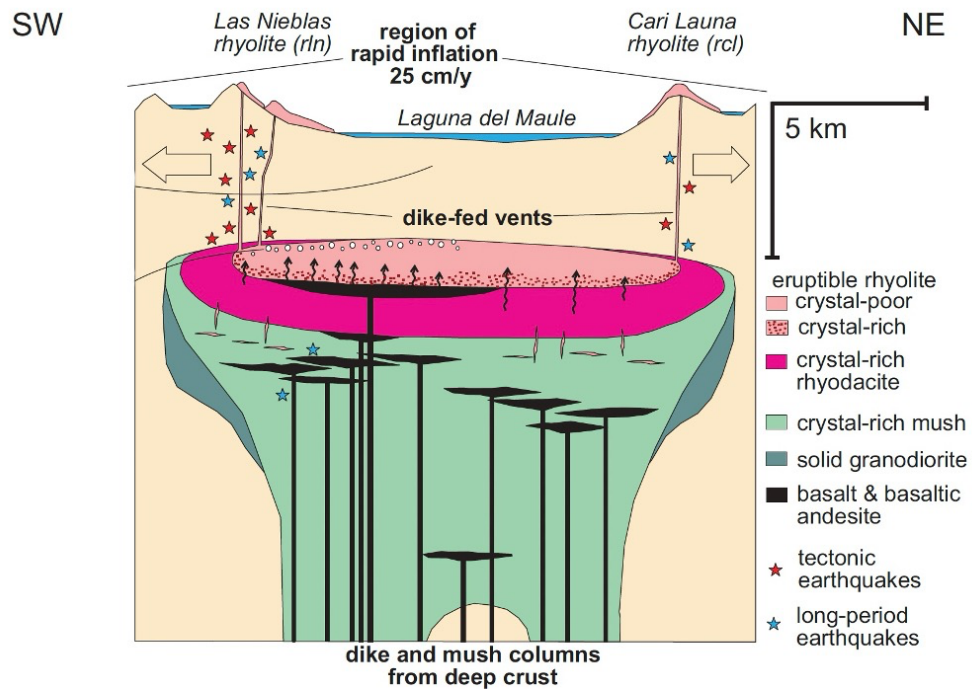


Figura 3: Modelo de *mush* cristalino debajo del Complejo Volcánico Laguna del Maule obtenido de Singer *et al.* (2014).

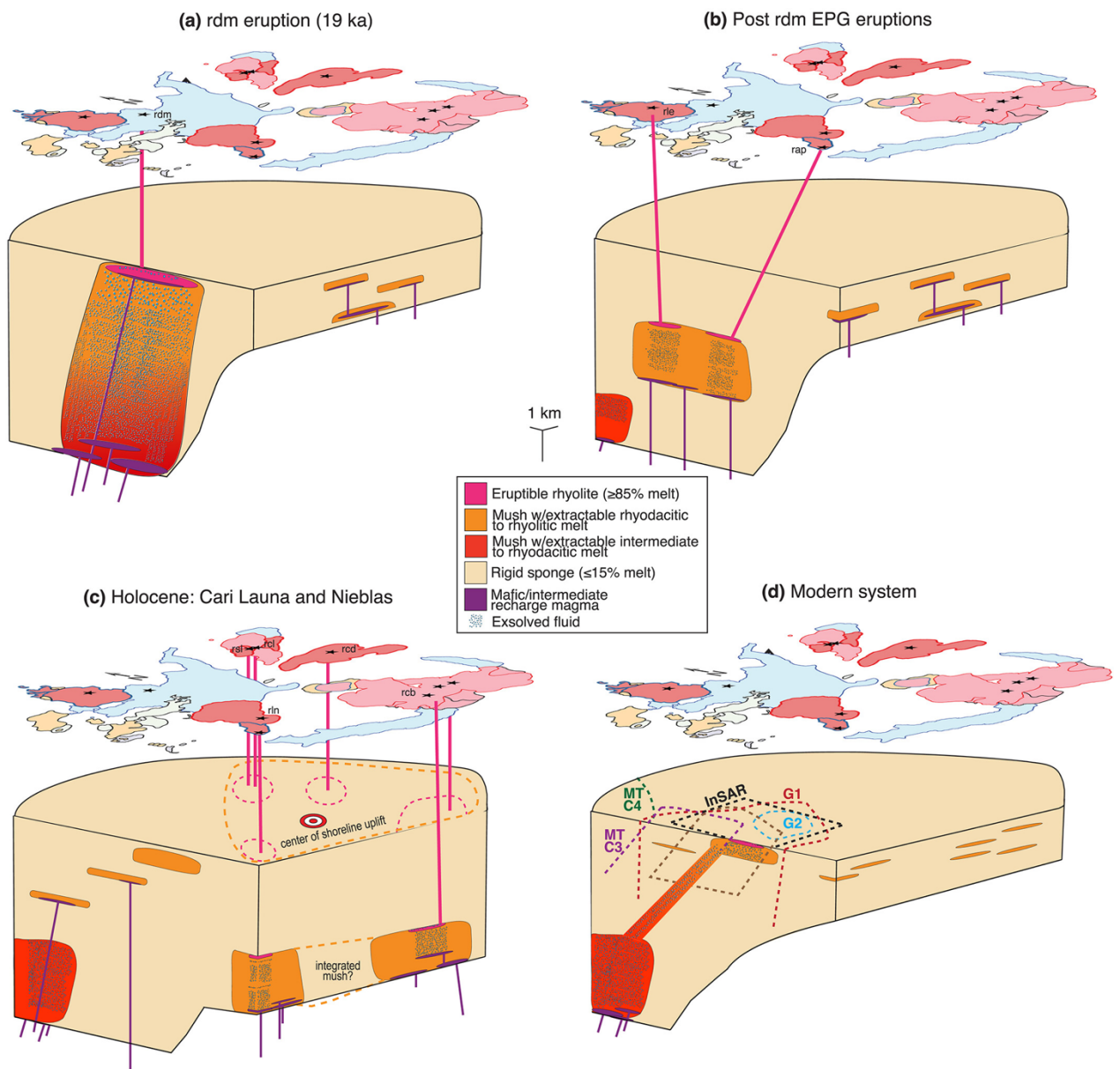


Figura 4: Modelo magmático conceptual de la evolución del volcanismo postglacial de LdM obtenido de Klug *et al.* (2020).

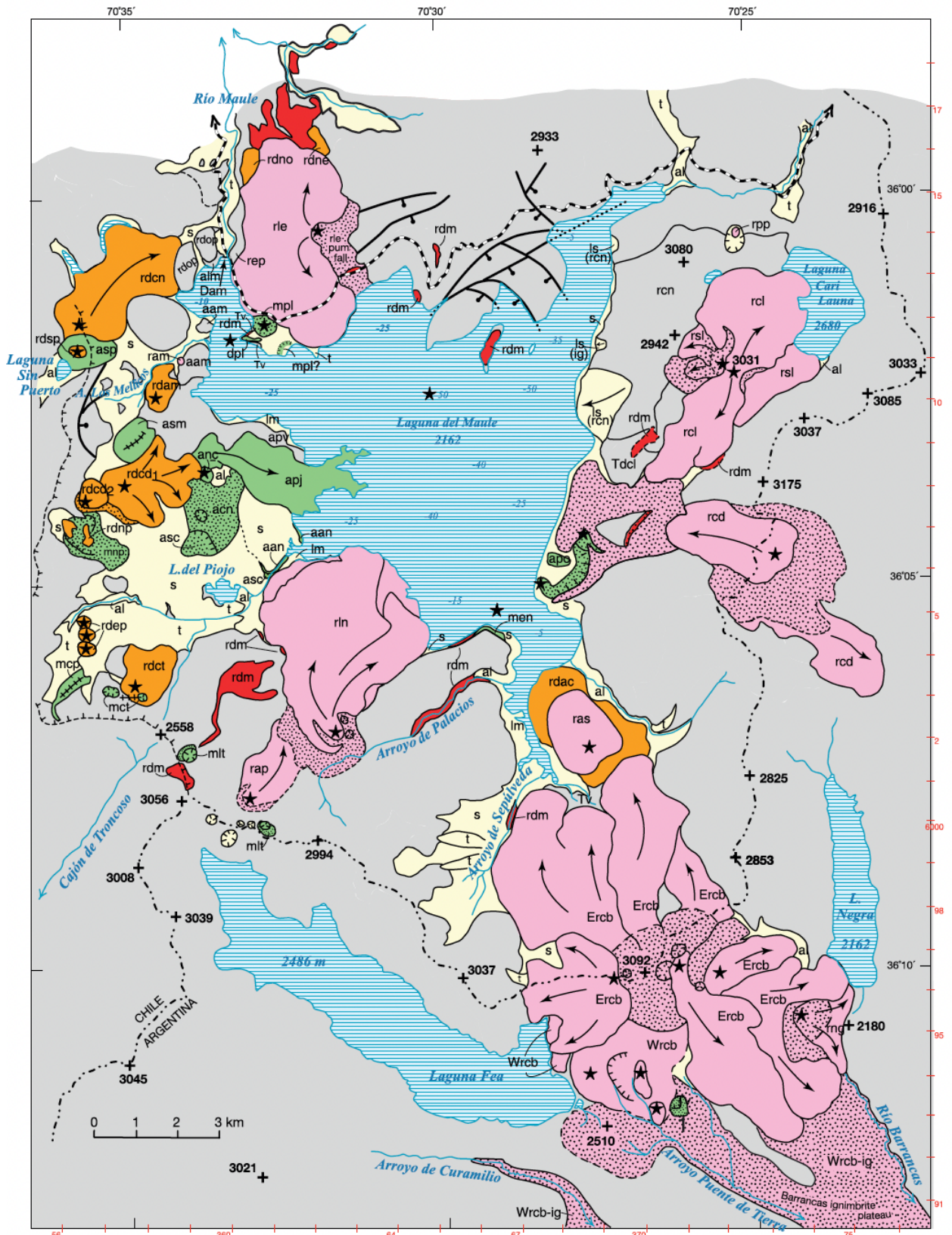


Figura 5: Mapa geológico unidades eruptivas en el Complejo Volcánico Laguna del Maule obtenido de Hildreth (2021).

Capítulo 3: Metodologías analíticas

3.1 Trabajo de laboratorio

3.1.1 Tratamiento de muestras

En la campaña de terreno, se recolectó un total de 22 muestras geológicas de las cuales, 7 provienen del afloramiento descubierto y descrito en esta campaña de terreno (depósito proximal oeste) (muestras etiquetadas con “*rdm-O-XX*”). Por el contrario, 15 muestras forman parte del depósito proximal norte (muestras etiquetadas con “*rdm-N-XX*”). Para seleccionarlas se buscaron muestras con tamaños superiores a 10 [cm], variedad de colores (leucocráticas a melanocráticas para tener una buena selección de los granitos) e integridad (muestras que no se deshicieran para realizar cortes transparentes de estas).

Para muestras etiquetadas con “*rdm-O-XX*”, la recolección se efectuó seleccionando los líticos graníticos de mayor tamaño y rotulándolos. Por otro lado, muestras etiquetadas con “*rdm-N-XX*”, la recolección se efectuó seleccionando los líticos más variados en tonalidades, para obtener mayor variabilidad dentro del depósito. Con un martillo se redujo el tamaño de estos y se generaron caras frescas de las muestras para posterior análisis.

Estas 22 muestras obtenidas en la campaña de terreno (Fig. 6), se ordenaron por índice de color desde la más rosada hasta la más melanocrática pasando por muestras geológicas más blanquecinas. Esto con la finalidad de obtener un correcto rango de índice de color, asumiendo que este estaría relacionado con la composición y mineralogía de las muestras de granitos. Se seleccionaron una roca por medio (1 de 2, intercaladamente) para los análisis instrumentales. Además, se realizó un filtro de selección basado en la mayor integridad de estas.

Con las 10 muestras seleccionadas (Tabla. 1) se realizaron cortes transparentes y pulidos en el Instituto de Geología Económica Aplicada de la Universidad de Concepción. Se realizó una selección de 6 muestras correspondientes al depósito proximal norte y 4 muestras al afloramiento descubierto en el área de la riolita Loma Los Espejos, es decir, el depósito proximal oeste.

Los cortes transparentes pulidos fueron digitalizados en un scanner de escritorio de películas (Fig. 7). Estos se insertaron en el scanner de películas bajo un polarizador fotográfico circular, lo cual permite obtener imágenes similares a las obtenidas en el microscopio óptico a nícoles paralelos. Los cortes también son escaneados entre dos polarizadores circulares, con los que se obtienen imágenes similares a las de nícoles cruzados, pero obteniendo el máximo índice de birrefringencia posible en cada pixel de la imagen.

Las imágenes fueron escaneadas con un tipo de imágenes color 48-bit, con una resolución de 9600 [ppp] y un tamaño de documento de 23,7 x 45,4 [mm].



Figura 6: Líticos graníticos obtenidos durante la campaña de terreno en el Complejo Volcánico Laguna del Maule correspondiente a dos depósitos de la Ignimbrita Laguna del Maule.

Tabla 1. 10 muestras seleccionadas de un total de 22 líticos graníticos para realizar cortes transparentes y pulidos.

Depósito proximal norte	Depósito proximal oeste
<i>rdm-N-01</i>	<i>rdm-O-02</i>
<i>rdm-N-02</i>	<i>rdm-O-03</i>
<i>rdm-N-03</i>	<i>rdm-O-06</i>
<i>rdm-N-09</i>	<i>rdm-O-07</i>
<i>rdm-N-12</i>	
<i>rdm-N-15</i>	

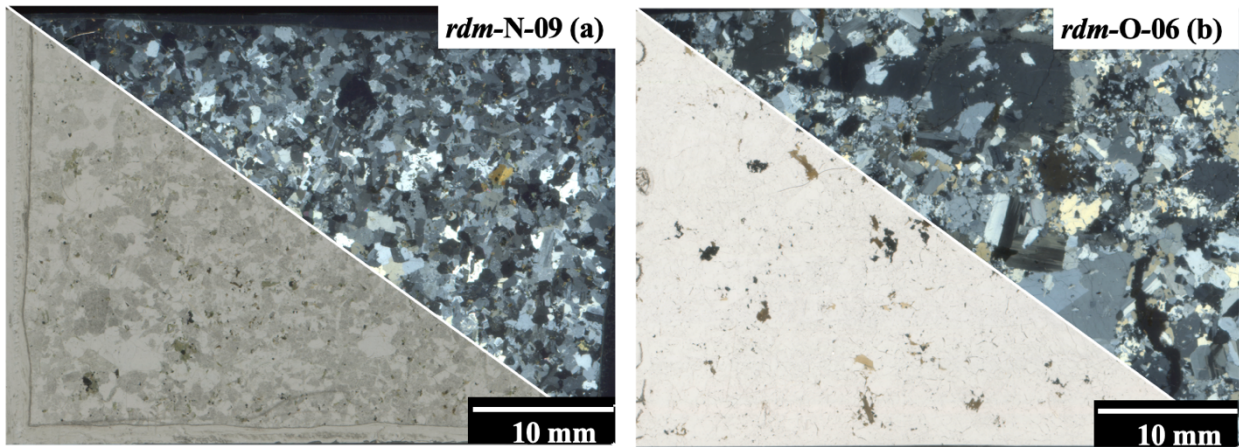


Figura 7: Cortes transparentes y pulidos de líticos granitos seleccionados de la Ignimbrita Laguna del Maule a nícoles paralelos y nícoles cruzados. (a) Imagen de corte escaneado de muestra obtenida en el depósito proximal norte, *rdm-N-09* (b) Imagen de corte escaneado de muestra obtenida en el depósito proximal oeste, *rdm-O-06*.

3.1.2 Microscopia óptica

Se realizó microscopía óptica con la finalidad de determinar fases minerales, fábricas y texturas inter- e intracrystalinas de los cristales de las 10 muestras de líticos graníticos seleccionadas y subdivididas según depósito de proveniencia (Fig. 8).

La microscopía óptica se realizó en el Laboratorio de Microscopía Óptica del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Donde se utilizó una magnificación entre 5X a 20X. En primer lugar, se realizó un barrido general de cada lítico granítico a una magnificación de 5X, con la finalidad de tener una visión general de las fases minerales presentes en las muestras. Posteriormente, se efectuó un estudio exhaustivo de cada fase mineral previamente identificada, determinando características petrográficas distintivas tanto a nícoles paralelos como a nícoles cruzados. Además, de identificación de alteraciones en los cristales, fracturas, poros intersticiales y texturas de inter- e intracrecimiento.

La obtención de fotomicrografías de las muestras analizadas se realizó en el Núcleo Milenio del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Para esto se utilizó una cámara CANON D5600 con adaptador LEICA 1,6X, microscopio óptico LEICA DM 2700P con magnificación entre 2,5X a 20X.

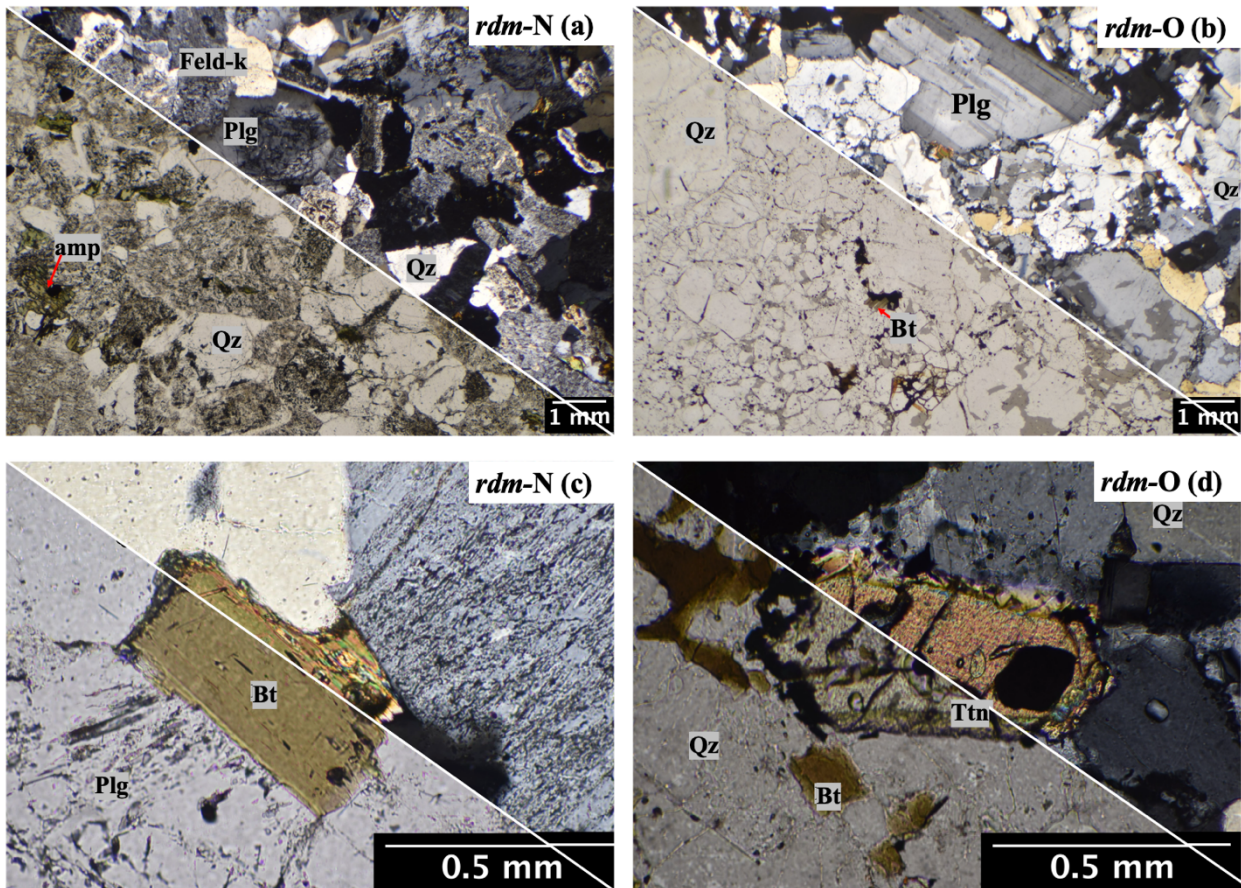


Figura 8. Fotomicrografías tomadas en microscopio óptico a nícoles paralelos y nícoles cruzados (a) Fotomicrografía correspondiente a líticas graníticas obtenidos en el depósito proximal norte, *rdm-N* (b) Fotomicrografía correspondiente a líticas en el depósito proximal oeste, *rdm-O*. (c) Fotomicrografía cristal de biotita en líticas graníticas *rdm-N*. (d) Fotomicrografía cristal de titanita en líticas graníticas *rdm-O*.

3.1.3 Escalas numéricas

El *software* utilizado para la obtención de fotomicrografías e imágenes escaneadas de láminas delgadas no incluye escalas numéricas. Estas deben ser incluidas mediante la herramienta computacional ImageJ.

Para cortes transparentes y pulidos se utilizó imágenes escaneadas en formato *jpg* con dimensiones de 1104 x 6852 pixeles. Estas se re-escalan a una dimensión de 5521 x 3426 pixeles. Luego, se mide la longitud de la imagen obteniendo un promedio de 5520 pixeles correspondientes a 46 [mm], lo cual se realiza midiendo los cortes transparentes y pulidos con una regla (Fig 9a). Posteriormente, se mide 5 longitudes en pixeles de la imagen utilizando el *software* ImageJ (Fig. 9b). Con el promedio de estos datos, se configura la escala numérica de la imagen (Fig. 9c), la cual es dispuesta en esta mediante una barra numérica (Fig. 9d).

Para la obtención de escalas numéricas en fotomicrografías obtenidas en microscopio, se adquirieron un set de imágenes en formato *jpg* con dimensiones de 6000 x 4000 pixeles. Las cuales fueron elaboradas mediante una regla numérica dispuesta en la platina del microscopio óptico.

Posteriormente, se obtuvieron fotografías a diferentes magnificaciones (Fig. 10a-c). Las fotografías obtenidas son re-escaladas a una dimensión de 3000 x 2000 píxeles. Para cada magnificación se mide un promedio de 5 mediciones de la longitud en píxeles entre cada segmento de la escala numérica, lo cual corresponde a un milímetro (Fig. 10d). Tal que, para una magnificación de 2,5X, 249 píxeles corresponden a 1 [mm]; para 5X, 551 píxeles corresponden a 1 [mm]; 10X, 1047 píxeles corresponden a 1 [mm] y para 20X, 2189 píxeles corresponden a 1 [mm]. Con estos datos, se configura la escala numérica de la imagen.

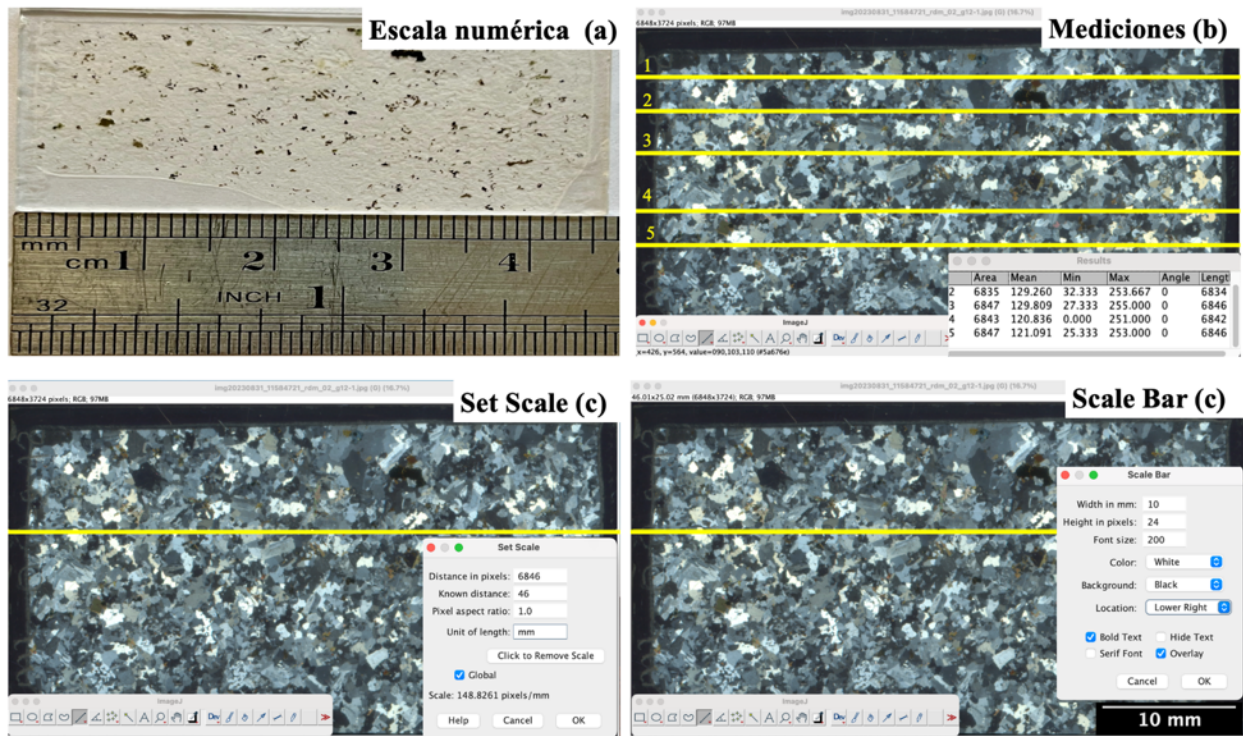


Figura 9. Metodología utilizada para obtención de escalas numéricas de cortes transparentes y pulidos utilizando ImageJ. (a) Medición de longitud de lámina delgada usando regla numérica en milímetros. (b) Medición de 5 longitudes en píxeles usando el *software* ImageJ. (c) Configuración de escala usando el promedio de las 5 mediciones y su equivalencia en milímetros. (d) Configuración de barra de escala.

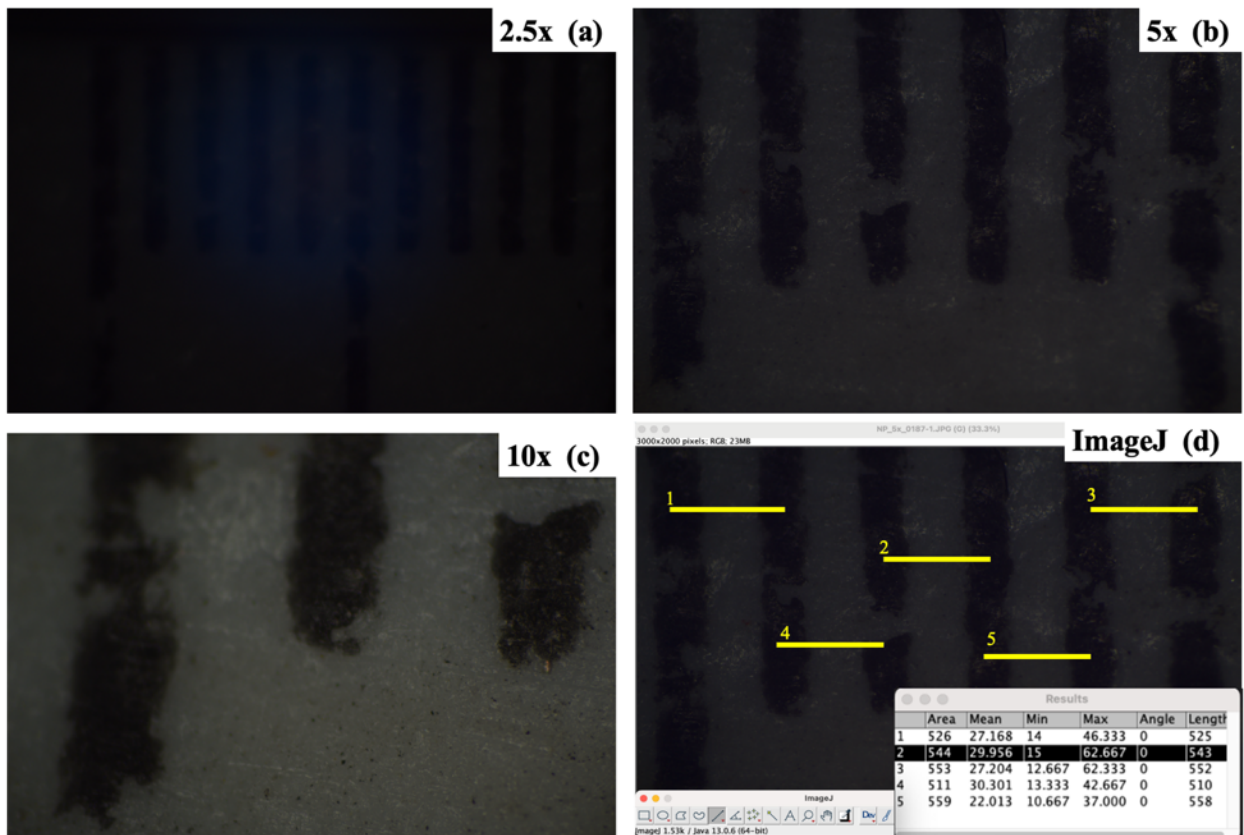


Figura 10. Metodología utilizada para obtención de escalas numéricas para distintas magnificaciones en microscopio óptico utilizando ImageJ. (a) Imagen de regla numérica a 2,5X. (b) Imagen de regla numérica a 5X. (c) Imagen de regla numérica a 10X. (d) Interfaz en ImageJ de 5 mediciones para configurar escala de magnificación a 5X.

3.1.4 Análisis con JMicrovision

Se usó el *software* JMicrovision v.1.3.4 para el análisis composicional de los líticos graníticos utilizando tanto fotomicrografías de las muestras obtenidas con microscopio electrónico así como imágenes escaneadas de las láminas delgadas.

Se efectúa una medición de fracciones de área mediante 140 a 200 puntos dispuestos aleatoriamente en las imágenes utilizando la herramienta “*point counting*”. La cantidad de puntos seleccionados se determina hasta que los porcentajes para las fases minerales (al 100%) analizadas permanecen estables, como se observa en la Fig. 11a.

El análisis y/o cuantificación de fases minerales es realizado mediante imágenes escaneadas de láminas delgadas y de fotomicrografía con una magnificación de 2,5X. Estas últimas son utilizadas para determinar cristales de menor tamaño, los cuales no son identificados con las imágenes escaneadas de las láminas delgadas (Fig. 11b).

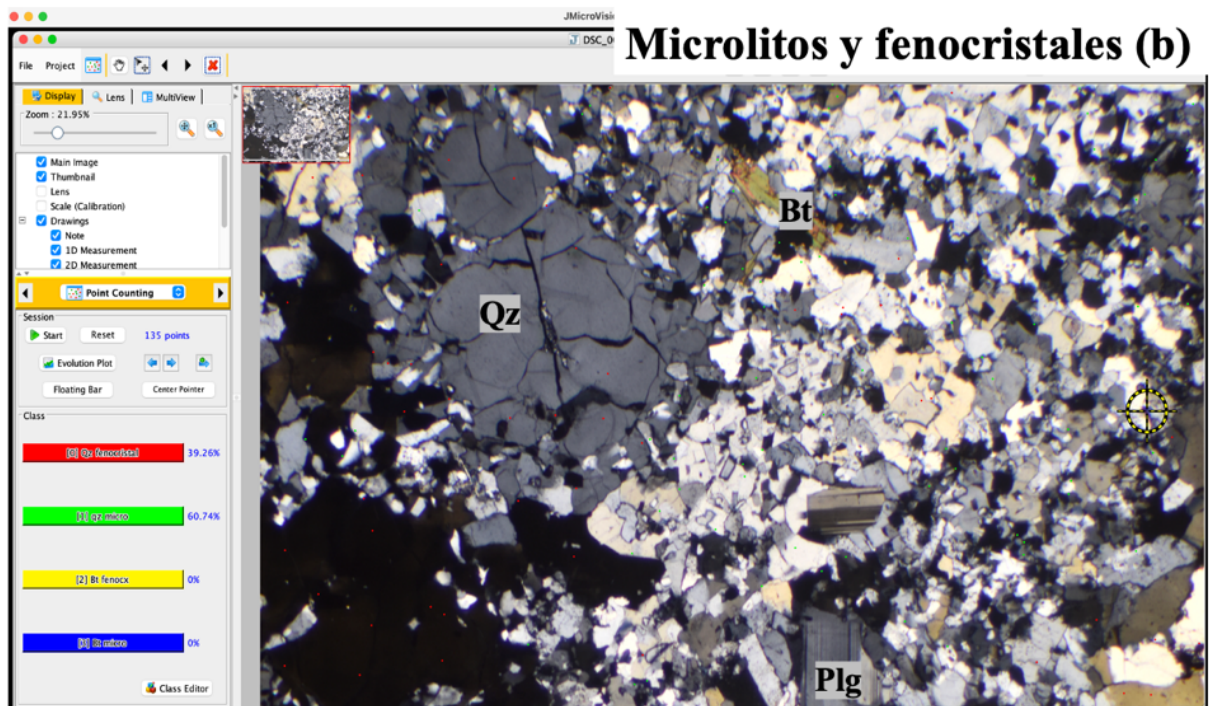
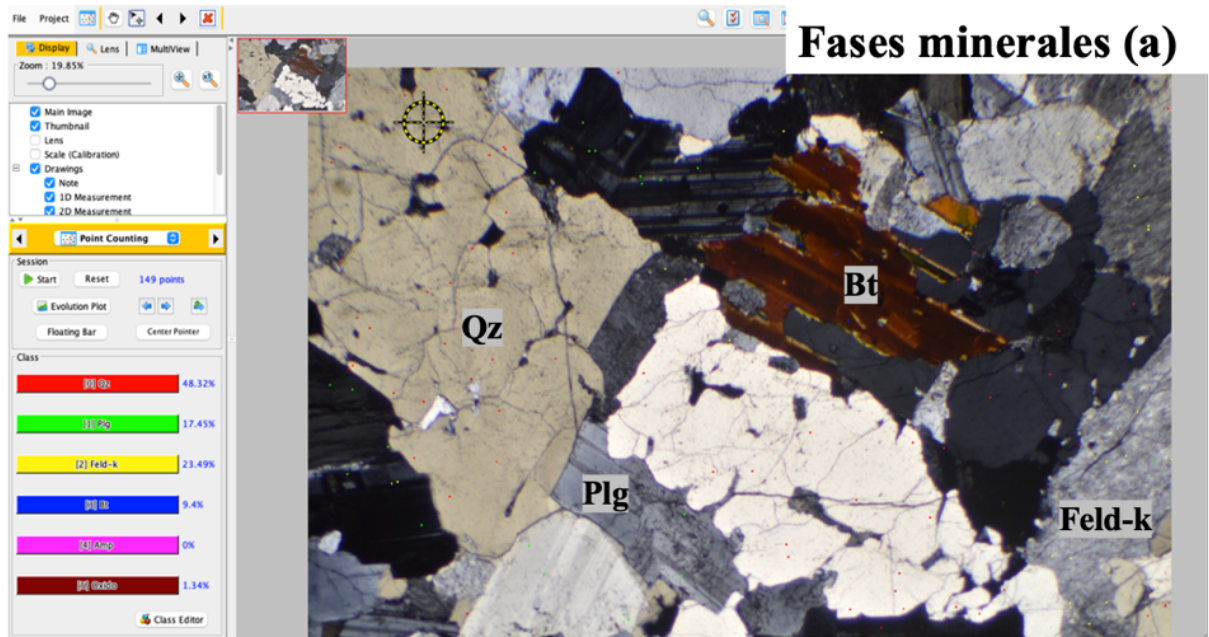


Figura 11. Interfaz de JMicrovision usando point counting. (a) Cuantificación de fases minerales mediante fotomicrografías obtenidas con microscopio óptico. (b) Cuantificación de microlitos y fenocristales utilizando imágenes escaneadas de láminas delgadas.

3.2 Geoquímica roca total

Para el análisis de roca total se seleccionaron 8 muestras geológicas de un total de 10. Por consiguiente, se priorizó la confección del corte transparente por sobre el análisis de geoquímica de roca total en dos muestras de las 10 seleccionadas previamente debido su tamaño pequeño.

De las muestras seleccionadas, 5 corresponden al depósito proximal norte (*rdm-N-01*, *rdm-N-02*, *rdm-N-03*, *rdm-N-09* y *rdm-N-12*) y 3 muestras al depósito proximal oeste (*rdm-O-02*, *rdm-O-03* y *rdm-O-07*).

El análisis de estos líticos graníticos es realizado mediante descomposición por fusión de las muestras. Se estudiaron elementos mayores y elementos menores (fluorescencia de rayos X, XRF), elementos trazas (Espectrometría de Masa Cuadrupolo con Plasma Acoplado Inductivamente; quad-ICP-MS) y medición de isótopos de Sr-Nm (Espectrometría de Masa con Plasma Acoplado Inductivamente Multicolector; MC-ICP-MS) en el Laboratorio Analítico Geoquímico del Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad de Cape Town en Sudáfrica.

En cuanto a los elementos mayores se analizaron SiO₂, TiO₂, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, N₂O, K₂O, P₂O₅, CrO₃, NiO, H₂O- con una pérdida de ignición (LOI) de 0.03 a 0.45 % en peso, producto de secar las muestras durante 4 horas a 800°C.

En relación a elementos trazas se midieron Li, B, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Pb, Th y U.

Finalmente, el análisis de isótopos de Sr-Nm fue efectuado con la medición de la relación entre isótopos (¹⁴³Nd/ ¹⁴⁴Nd) y (⁸⁷Sr / ⁸⁶ Sr), con un error de ± 2 [s] (Valores detallados en Anexos C).

3.3 Microscopia electrónica de barrido (Scanning Electron Microscopy)

Se realizó Microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) en el Laboratorio de Microscopía FESEM de la Universidad Tecnológica Metropolitana (UTEM) mediante el microscopio GemeniSEM 360. Para esto se utilizó una configuración de 15 kV y 80 nA con una magnificación entre 35X y 377X. Los colores de las imágenes obtenidas son en escala de grises, las fases minerales más densas se observan con tonalidades blanquecinas mientras que las menos densas de color gris a negro (tectosilicatos y poros intersticiales). El contraste fue reducido para diferenciar las fases minerales de los líticos graníticos, las que desde lo más oscuro (negro) a lo más claro (blanco) corresponden a poros intersticiales, cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, biotita, anfíboles y minerales opacos. Por otro lado, se fue aumentando el contraste para evidenciar zonaciones en plagioclasas y anfíboles.

Se prioriza la selección de 4 muestras representativas para realizar análisis detallado en SEM por sobre hacer varios análisis simples en las 10 muestras seleccionadas. De estas muestras, dos provienen del depósito proximal oeste (*rdm-O-06* y *rdm-O-07*, Fig. 12a) y dos pertenecen al depósito proximal norte (*rdm-N-09* y *rdm-N-02*, Fig. 12b).

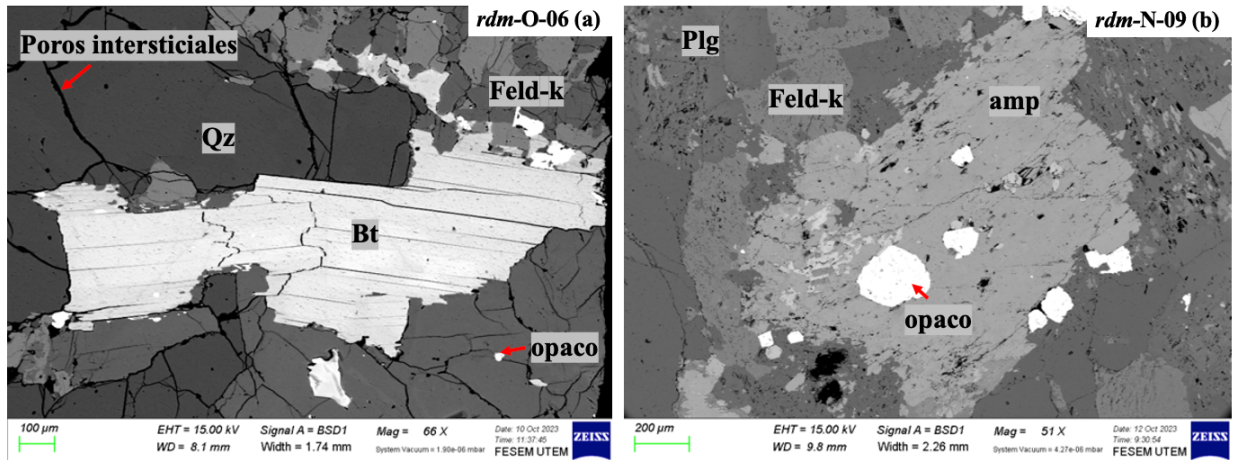


Figura 12. Fotomicrografías obtenidas mediante SEM. (a) Fotomicrografía de muestra obtenida en depósito proximal oeste, rdm-O-06. (b) Fotomicrografía de muestra obtenida en el depósito proximal norte, rdm-N-09.

3.4 Microsonda electrónica (Electron Probe Microanalyser).

Se analizó la composición de fases minerales de 4 muestras usando la microsonda electrónica (EMPA, por sus siglas en inglés) del Laboratorio *Electron Microbeam* de la Universidad de Bristol, Inglaterra, mediante el microscopio JEOL JXA8530F EMPA (Fig.13).

Este está equipado con 5 espectrómetros de longitud de ondas dispersivas (WDS) usando un potencial de aceleración de 20keV y una corriente de haz de electrones de 10nA para los cristales analizados. Se utilizaron estándares minerales tanto naturales como sintéticos para una calibración inicial con una magnificación de 40X. Además, se usaron estándares secundarios antes de hacer las mediciones a las muestras seleccionadas con el fin de verificar la estandarización primaria.

La información adquirida para plagioclasa y feldespato potásico fue obtenida mediante un tiempo de conteo de 10 [s] para elementos de Si, Al, Na, K y Ca, y de 60 [s] para Mg, Fe, Sr y Ba. Se estiman errores en las mediciones de <1% para Si, ~1% para Al, ~2% para Ca, ~3% para Na, ~6% para K, ~13% para Fe, 33-55% para Ba, 55-95% para Sr y >100% para Mg. Análisis con totales de <98.5 y >101.5% fueron descartados.

Para el análisis de biotita y anfíboles se utilizó un tiempo de conteo de 10 [s] para Si, K, Ti, 20 [s] para Al, 30 [s] para Na, Ca, Mg, Fe y Mn, y 60 [s] para Ba. Errores asociados para ambos minerales máficos son de ~1% para Si y Al, 2% para K, 5% para Na, 1% para Fe, Mg, 3% para Ti, >100% para Ca, 8% para Mn y 12% para Ba. Análisis con totales de <95% y >101.5 % fueron descartados.

Lugares de análisis tanto de bordes como núcleos en cristales de hornblenda fueron usados para termobarometría. Lugares de análisis y trayectorias composicionales con espaciamiento de 15 – 30 [um] fueron obtenidas para elementos mayores y menores en plagioclasa y feldespato potásico; solo los bordes más distales de los fenocristales fueron utilizados para calcular el contenido de agua mediante el higrómetro de Waters & Lange (2015).

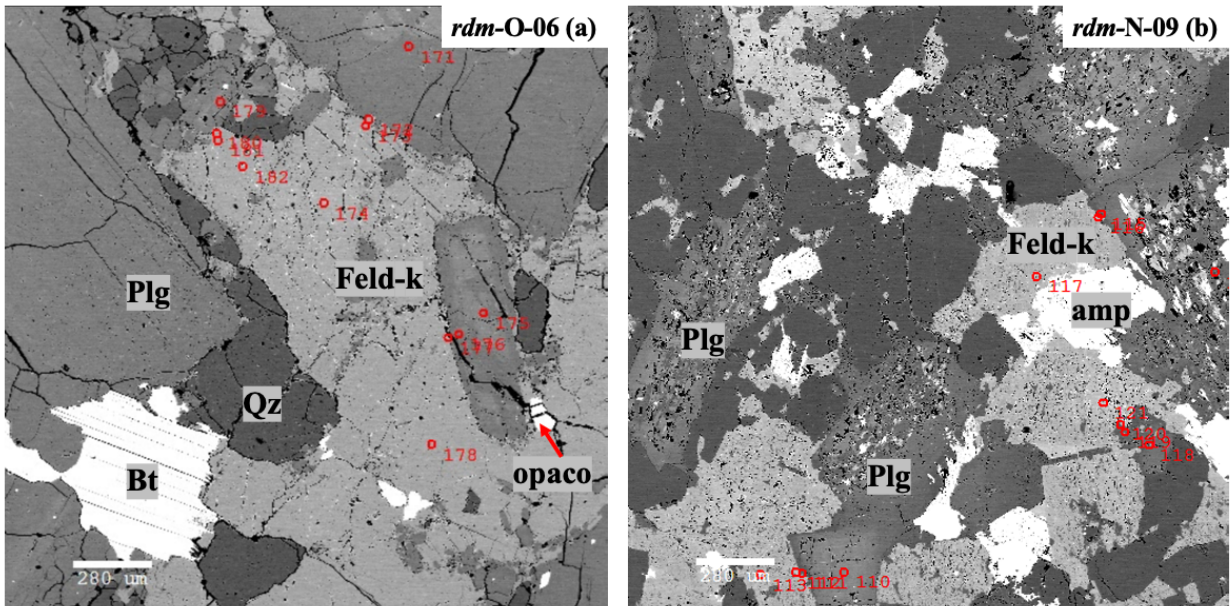


Figura 13. Fotomicrografías obtenidas en EMPA, Universidad de Bristol, UK. (a) Fotomicrografía de muestra obtenida en depósito proximal oeste, *rdm-O-06*. (b) Fotomicrografía de muestra obtenida en depósito proximal norte, *rdm-N-09*.

Capítulo 4: Resultados de trabajo de terreno

4.1 Depósitos de Ignimbrita Laguna del Maule

Se reconocen aproximadamente 9 depósitos de *rdm* dentro de LdM, los cuales presentan volúmenes pequeños (remanentes de unidades piroclásticas plinianas) en comparación con las otras unidades post-glaciares. Visitas y estudios previos en la parte este y sur del Complejo Volcánico Laguna del Maule, determinan que no existen líticos graníticos en estas zonas (Fierstein, 2018; Hildreth, 2021; Contreras *et al.*, 2022).

El trabajo de campo se realizó entre los días 13 al 16 de febrero del 2023 dentro del campo volcánico LdM, localizado en la Región del Maule, Chile. Este consistió en una toma de muestras de líticos graníticos en dos afloramientos de *rdm*, ubicados en la parte norte-oeste de la laguna (Fig. 14). Uno de estos se localiza en el área de *rle* (depósito proximal oeste a ~0,620 [km] del lago). Mientras que el otro depósito, al lado norte de la Laguna del Maule (depósito proximal norte a ~75 [m] del lago). Estos se encuentran separados a una distancia de 1,7 [km].

El depósito proximal oeste fue descubierto mediante exploración en terreno durante esta campaña. Se localiza cerca del área de la riolita Loma Los Espejos y en cercanías del embalse Laguna del Maule y a una distancia de ~2,6 [km] del vent de *rdm* (Fig. 15a). Consiste en un afloramiento de color grisáceo el cual se divide en tres unidades geológicas. Una inferior de color grisáceo blanquecino sin presencia de fragmentos líticos. La matriz es de tamaño limo-arcilla clasto-soportada. Según descripciones previas de los afloramientos post-glaciares (Hildreth *et al.*, 2010), este afloramiento corresponde a la Ignimbrita Cajones de Bobadilla (*igcb*). La superior, de color grisáceo con presencia de obsidiana y sin fragmentos líticos. Se observa estratificación paralela con estratos de diversa competencia. La matriz de color grisácea y tamaño grano limo-arcilla matriz-soportada. Este afloramiento se asocia a la riolita Loma Los Espejos (*rle*) (Hildreth *et al.*, 2010). Y una tercera unidad intermedia, de color grisáceo con presencia de fragmentos líticos. La matriz presenta color grisáceo con tamaño limo-arcilla matriz-soportada. En cuanto a los fragmentos líticos, se observa bajo porcentaje de líticos graníticos con color rosados a blanquecinos y tamaños menores a 18 [cm] (Fig. 15b). Además, de juveniles de colores negros a grisáceos blanquecinos (máficos e intermedios). Este depósito se asocia a la Ignimbrita Laguna del Maule, el cual se encuentra en discordancia erosiva con *rle* y en discordancia angular con *igcb*.

El depósito proximal norte se ubica a 1,7 [km] al noreste del depósito proximal oeste y en el lado norte de la Laguna del Maule, a una distancia de ~1,7 [km] al noreste del vent de *rdm*. Consiste en un afloramiento color grisáceo con presencia de abundantes fragmentos líticos (Fig. 15c). En cuanto a la matriz, es de tamaño lapilli fino con mala selección. La relación entre matriz y fragmentos líticos corresponde a matriz-soportado. Similar a una brecha piroclástica heterolítica (*lag breccia*; Walker, 1985). Los fragmentos líticos observados son de color rosados a grisáceos con forma angulares a subangulares y tamaños menores a 50 – 60 [cm]. De acuerdo con estudios

previos este afloramiento corresponde a la Ignimbrita Laguna del Maule (Fierstein, 2018; Contreras-Hidalgo, 2020; Hildreth, 2021).

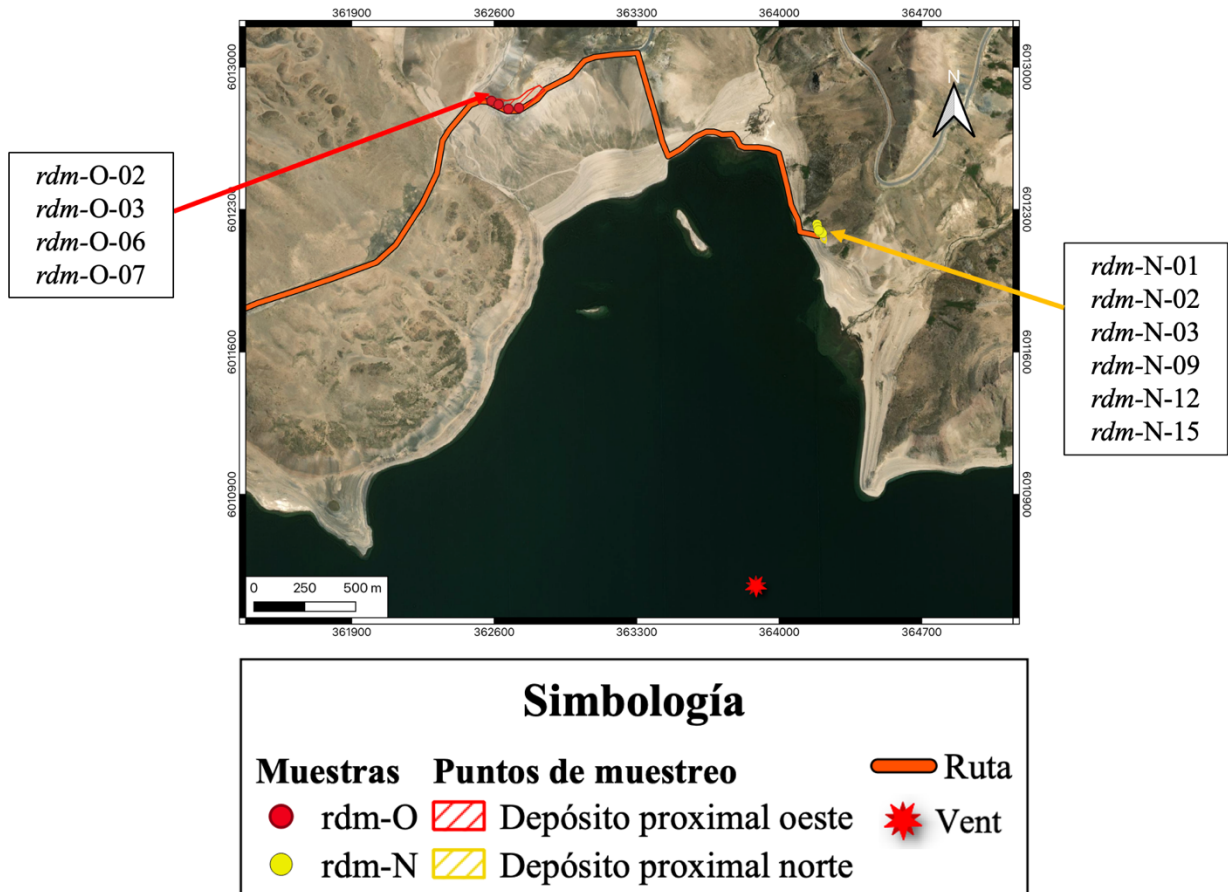


Figura 14. Mapa puntos de muestreo de la Ignimbrita Laguna del Maule en la zona norte de la laguna. Posición del vent de *rdm* obtenida de Contreras *et al.* (2022).

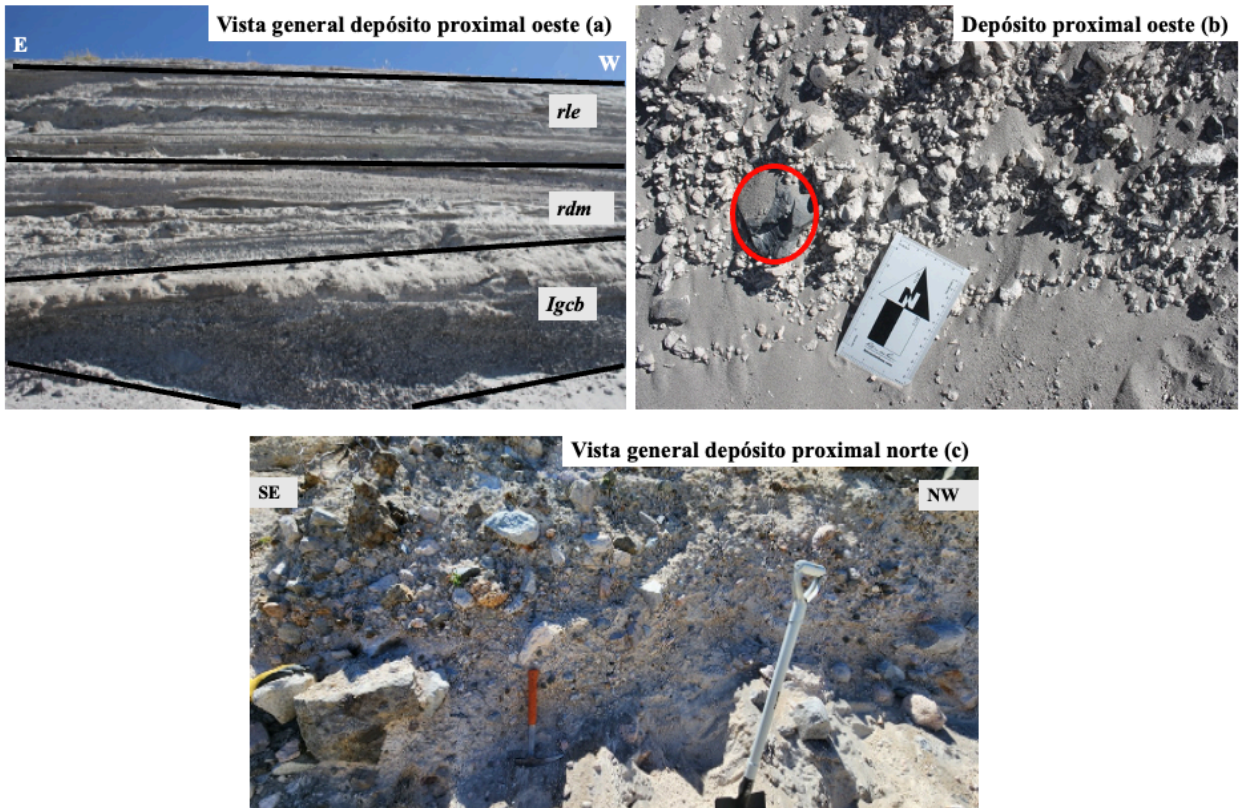


Figura 15. Fotografías de depósitos durante campaña de terreno. (a) Vista general depósito proximal oeste de la Ignimbrita. (b) Lítico granítico (círculo rojo) obtenido en depósito proximal oeste. (c) Vista general depósito proximal norte de la Ignimbrita Laguna del Maule.

4.2 Muestras de mano líticos graníticos

Las muestras de líticos graníticos provienen de dos afloramientos, depósito proximal norte y depósito proximal oeste. Las cuales se clasifican en dos grupos, divididas por diferencias en fases minerales, tonalidades de los líticos y tamaños que estos presentan (mayor detalle en Anexo B).

Para la recolección de las muestras se seleccionó los líticos graníticos que presentaban mayor tamaño, fueran competentes (para análisis posteriores de cortes transparentes y geoquímica de roca total) y de distintas tonalidades con la finalidad de tener un espectro general de la variabilidad composicional dada por la diferencia en los colores de las rocas.

Por un lado, líticos graníticos poco competentes heterogéneos (diferencias locales debido a enclaves máficos), con tonalidades rosadas blanquecinas (Fig. 16a, 16c y 16f) a grisáceas (Fig. 16b, 16d y 16e), sin morfologías especiales e índice de color leucocrática (menor al 15% de minerales máficos presente en las muestras). Estas son rocas inequigranulares, holocristalinas con una textura porfídica y estructura masiva con tamaños entre 12 - 19 [cm]. En cuanto a mineralogía se observan cristales de cuarzo con tamaños de 1 a 3 [mm], feldespatos (plagioclasa y feldespato potásico), con tamaños de 1 a 5 [mm] y minerales máficos con tamaños de 0,2 a 1,5 [mm] (biotita

y anfíboles). Estas muestras obtenidas en el depósito proximal norte son catalogadas como grupo 1.

Por otro lado, líticos graníticos poco competentes (Fig. 17) homogéneos con tonalidades rosáceas blanquecinas (Fig. 17a y 17c) a rosáceas (Fig. 17b y 17d), sin morfologías especiales e índice de color leucocrática (menor al 5% de minerales máficos presente en las muestras). Estas son rocas inequigranulares holocristalinas con una textura porfídica y estructura masiva con tamaños entre 12 – 16 [cm]. En cuanto a mineralogía se observan cristales de cuarzo con tamaños de 1 a 5 [mm], feldespatos (plagioclasa y feldespato potásico) con tamaños de 1 a 3 [mm] y bajo porcentaje de minerales máficos con tamaños de 0,7 a 2 [mm] (biotita y anfíboles). Además, se observan poros intergranulares en las muestras de mano. Estas muestras obtenidas en el depósito proximal oeste son catalogadas como grupo 2.

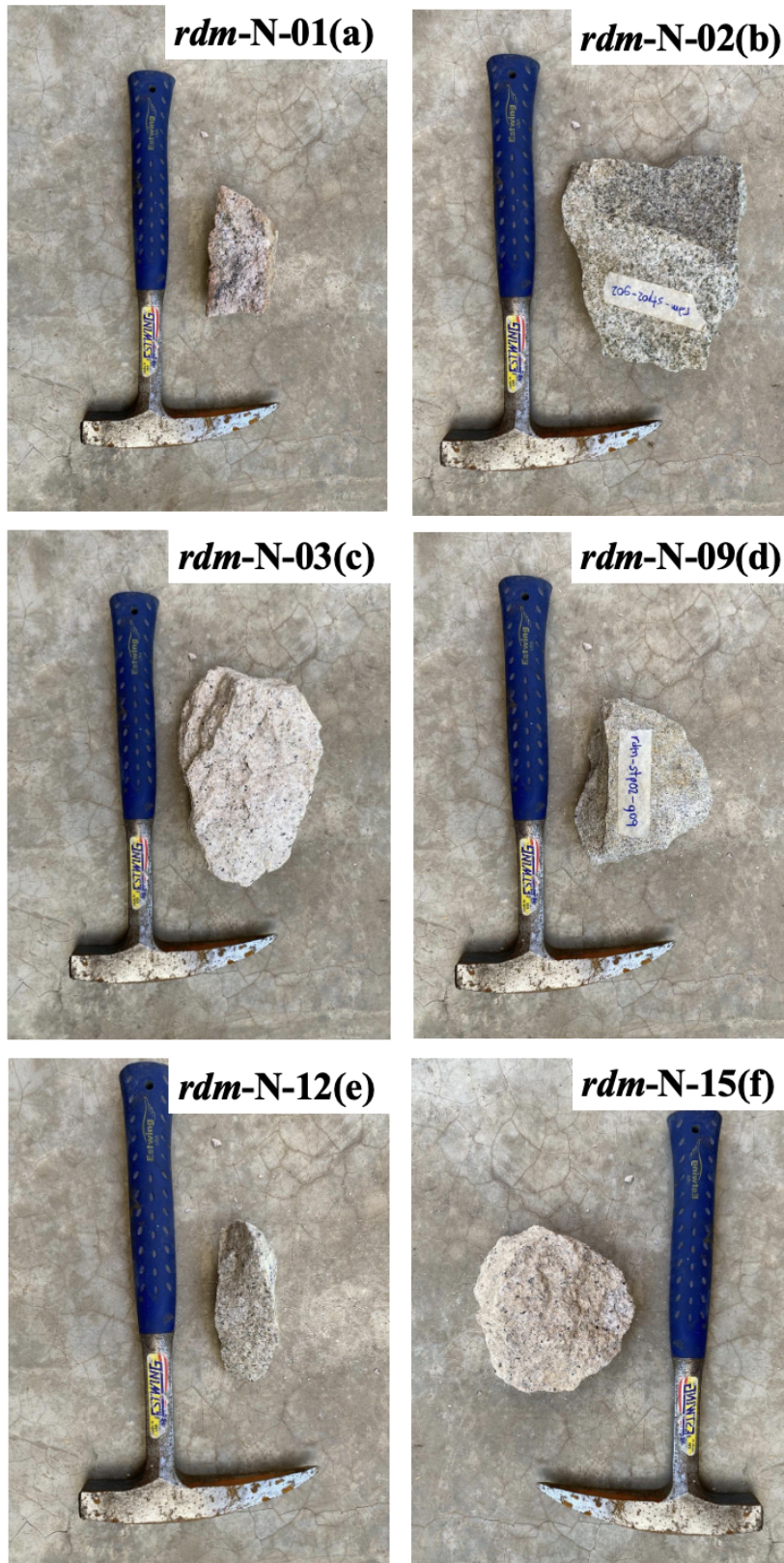


Figura 16. Líticos graníticos correspondientes al grupo 1. (a) Muestra de color rosáceo porfídica y tamaño de 13,7 [cm]. (b) Muestra de color grisáceo porfídica y tamaño de 20,4 [cm]. (c) Muestra de color blanquecina porfídica y tamaño 23,3 [cm]. (d) Muestra de color grisáceo porfídica y tamaño 14,8 [cm]. (e) Muestra de color grisáceo porfídica y tamaño 13,5 [cm]. (f) Muestra de color blanquecino porfídica y tamaño 15,5 [cm].



Figura 17. Líticos graníticos correspondientes al grupo 2. (a) Muestra de color rosáceo porfídica y tamaño de 15,9 [cm]. (b) Muestra de color blanquecino rosáceo porfídica y tamaño 22,3 [cm]. (c) Muestra de color blanquecino porfídica y tamaño de 14 [cm]. (d) Muestra de color blanquecino poco competente porfídica y tamaño de 16,8 [cm].

Capítulo 5: Petrografía

5.1 Generalidades

El estudio petrográfico cuantitativo de 10 laminas delgadas correspondientes a las distintas muestras de líticas graníticas de la Ignimbrita Laguna del Maule, muestran rocas inequigranulares compuestas por fenocristales de plagioclasas, cuarzo, feldespato potásico, biotita, anfíboles, titanita, y óxidos de Fe y Fe-Ti. Así como microlitos de cuarzo, biotita y plagioclasa. Se determina que los fenocristales corresponden a cristales con tamaños > 1 [mm] y microlitos, cristales con tamaños < 1 [mm]. Como se observa en la Tabla 2, la proporción promedio de fenocristales y microlitos en las muestras del grupo 1 es de un 22% y 78%, respectivamente, con excepción de la muestra *rdm-N-02*, la cual presenta un 68% de fenocristales y un 32 % de microlitos. El grupo 2 presenta un 60% de fenocristales y un 40% de microlitos en promedio.

Como se observa en la Tabla 3, el grupo 1 compuesto por 6 muestras, presenta una mineralogía primaria de feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa, biotita, anfíboles, óxidos de Fe, Fe-Ti y titanita. El porcentaje de cuarzo en este grupo varía de un 25,9 a 44,7 %; plagioclasa de un 8,2 a 32 %; feldespato potásico de 31,8 a 51,7 %. Los valores de biotita oscilan entre 3 a 12 %. Por otro lado, el porcentaje de anfíboles fluctúa entre un 4 a 10% para las muestras *rdm-N-02*, *rdm-N-09* y *rdm-N -12*. En cuanto a mineralogía secundaria destaca minerales de clorita (2 – 3%).

En esta misma línea, el grupo 2 presenta una mineralogía primaria de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, biotita, óxidos de Fe, Fe-Ti y titanita. El porcentaje de cuarzo en este grupo oscila entre 31% a un 50%; mientras que plagioclasa y biotita no presentan una mayor variación dentro del grupo (16 – 19% y 6 – 10%, respectivamente). Sin embargo, el porcentaje de feldespato potásico fluctúa entre los 24 – 44%.

Los porcentajes modales de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa de los líticas graníticas de la Ignimbrita Laguna del Maule permiten que estos puedan ser clasificados como granitos (tanto grupo 1 como grupo 2). Todos los ejemplares caen en este campo dispuestas en un diagrama de Streckeisen (QAPF, Fig. 18) según Streckeisen (1967) a excepción de la muestra *rdm-N -02*, la cual pertenece a una cuarzo-monzonita

Los cristales de las fases minerales analizadas presentan tamaño de medio a grueso, en donde este fue obtenido mediante el programa ImageJ 1.53K, utilizando escalas numéricas y su correlación con los pixeles de cada milímetro (detalle en metodología). Como se observa en la Tabla 4, los cristales de cuarzo presentan un menor tamaño en el grupo 2 ($\sim 0,01$ [mm]) que en el grupo 1 ($\sim 0,1$ [mm]). Sin embargo, en ambos grupos el límite superior es de ~ 4 [mm]. Los cristales de plagioclasas presentan un tamaño mayor en el grupo 1, con tamaños hasta los 6 [mm] a diferencia del grupo 2, con máximos de 3 [mm]. Ambos grupos presentan un límite inferior de $\sim 0,3$ [mm]. Por otro lado, los cristales de feldespato potásico presentan mayor tamaño en el grupo 2, con tamaños hasta 7 [mm] a diferencia del grupo 1 con máximos de 5 [mm]. En cuanto a los cristales

de biotita, estos presentan un menor tamaño en el grupo 1 (~0,05 [mm]) a diferencia del grupo 2 (~0,15 [mm]). En ambos grupos el límite superior es de 3 [mm].

Tabla 2. Porcentaje de microlitos y fenocristales en líticos graníticos de la Ignimbrita Laguna del Maule. Análisis de proporciones modales obtenidas con imágenes escaneadas de láminas delgadas.

Grupo	1	2
Microlitos	32,04 – 78,45	38,54 – 53,7
Fenocristales	22,55 – 67,96	46,3 – 61,46

Tabla 3. Porcentaje fases minerales normalizados al 100% en líticos graníticos de la Ignimbrita Laguna del Maule. Análisis de proporciones modales obtenidas con fotomicrografías de láminas delgadas mediante microscopio óptico.

*Fase mineral solo presente en el grupo 1.

Muestra	rdm-N-01	rdm-N-02	rdm-N-03	rdm-N-09	rdm-N-12	rdm-N-15	rdm-O-02	rdm-O-03	rdm-O-06	rdm-O-07
Cuarzo	38	20	34	30	22	34	45	50	40	31
Plagioclasa	7	17	13	12	21	24	18	17	19	16
Feldespato potásico	40	45	48	45	42	27	24	25	30	44
Anfiboles*	0	10	0	5	4	0	0	0	0	0
Biotita	12	4	3	5	8	10	10	6	8	6
Óxidos de Fe-Ti	2,5	3	2	1	3	5	3	2	2	2,5
Titanita	0,5	1	0	2	0	0	0	0	1	0,5
Clorita*	0	0,1	0	0,5	1	0,6	0	0	0	0
Grupo	1					2				
	20 - 38					31 - 50				
	7 - 24					16 - 19				
	27 - 48					24 - 44				
	4 - 10					0				
	3 - 12					6 - 10				
	1 - 5					2 - 3				
	0,5 - 2					0,5 - 1				
0,1 - 1					0					

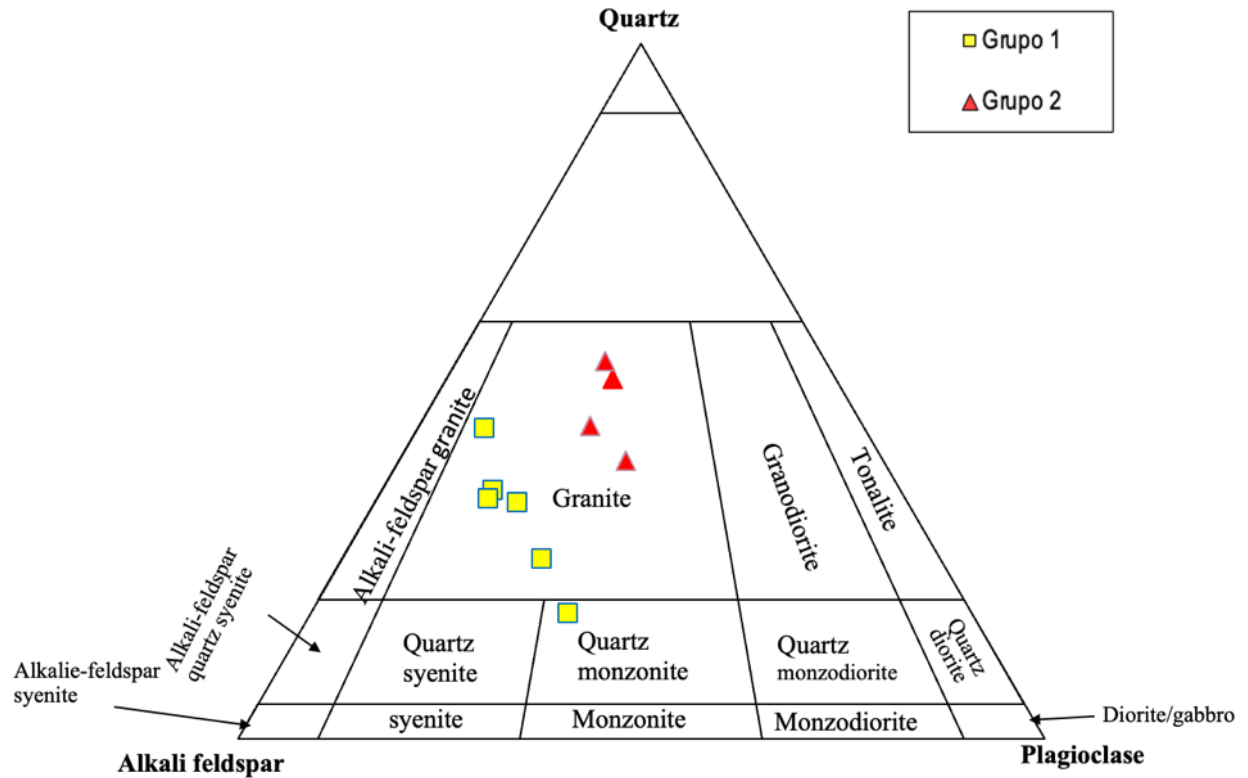


Figura 18. Diagrama Streckeisen para clasificación de 10 lócos graníticos de la Ignimbrita Laguna del Maule mediante porcentajes modales de fases minerales. Modificado de Streckeisen (1967).

Tabla 4. Tamaño de cristales en milímetros para cada fase minerales de las muestras de lócos graníticos obtenidas de la Ignimbrita Laguna del Maule. Identificación de tamaños de cristales obtenidas con fotomicrografías de láminas delgadas mediante microscopio óptico.

Grupo	1	2
Cuarzo	0,1-4	0,01-4
Plagioclasa	0,3-6	0,3-3
Feldespato potásico	0,5-5	0,1-7
Anfibol*	0,2-4	-
Biotita	0,05-3	0,15-3
Óxidos de Fe-Ti	0,04-0,7	0,05-1
Clorita *	0,1- 1	-
Titanita	0,3-4	0,1-0,5

5.2 Mineralogía

El estudio petrográfico cualitativo, es decir, la examinación de fases minerales de 10 laminas delgadas correspondientes a las distintas muestras de lócos graníticos de la Ignimbrita Laguna del Maule, muestran rocas holocristalinas con texturas porfídicas, las cuales están

compuestas por fenocristales de plagioclasas, cuarzo, feldespato potásico, biotita, anfíboles, titanita, clorita y óxidos de Fe y Fe-Ti.

Estas muestras son divididas en dos grupos debido a las fases minerales que se observan en cada muestra (mayor detalle de descripción petrológica de las muestras en Anexo B).

El grupo 1 presenta una variación del porcentaje de minerales máficos de 5-18% con una mineralogía primaria que destaca feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa, anfíbol, biotita, titanita y óxidos de Fe y Fe-Ti. Por otro lado, la mineralogía secundaria, destacan minerales de clorita los cuales se encuentran alterando cristales de anfíbol y biotita (cloritización). Según esto, el porcentaje de cristales frescos de anfíbol y biotita representa menos del 3%, normalizado al 100% de la fase mineral correspondiente a los anfíboles, es decir, el 3% del total de anfíboles.

En cuanto al grupo 2, este presenta una variación del porcentaje de minerales máficos de 5-13% con una mineralogía primaria que destaca cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, biotita, titanita, óxidos de Fe y Fe-Ti. En cuando a la mineralogía secundaria, no se observa en las muestras de este grupo.

5.2.1 Feldespato potásico

Cristales anhedral de tamaño entre 0,5 a 5 [mm], en el grupo 1 y de 0,1 a 7 [mm], en el grupo 2, con presencia de fracturas y tonalidades grisáceas incoloras (nícoles paralelos) en ambos grupos. Esta fase mineral se presenta tanto como fenocristales, así como parte de la masa fundamental de la roca (Fig. 19).

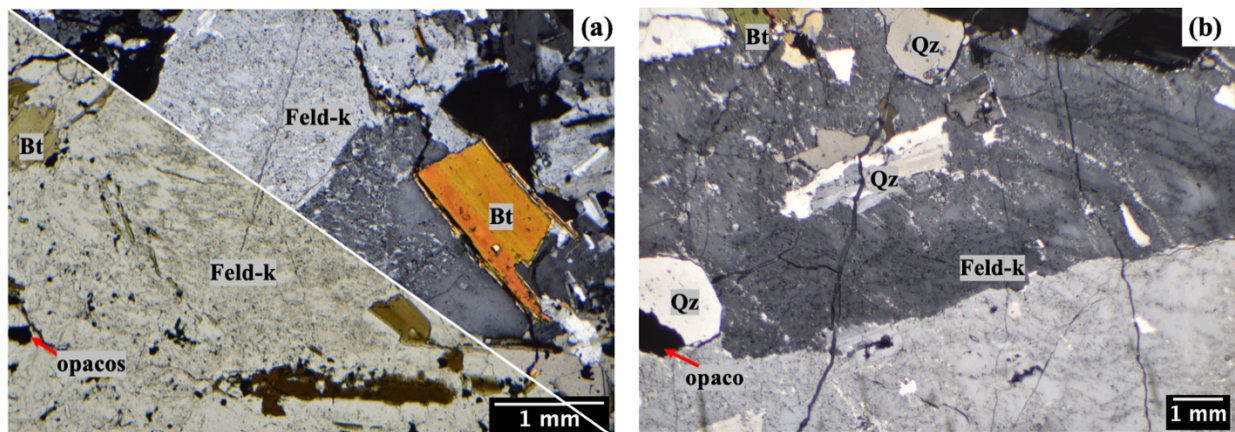


Figura 19. Cristales de feldspatos potásicos en grupos de estudio. (a) Cristal de feldespato potásico en grupo 1 tanto a nícoles paralelos como a nícoles cruzados. (b) Cristal de feldespato potásico en grupo 2 a nícoles cruzados.

5.2.2 Plagioclasa

En el grupo 1, los cristales se presentan de manera fracturada con forma anhedral a subhedral y tamaño entre 0,3 a 6 [mm]. Parte de los fenocristales de esta fase mineral presentan alteración serícitica, particularmente, en el núcleo y borde del cristal (Fig. 20a).

Por otro lado, en el grupo 2, los cristales se presentan poco fracturados con forma anhedral a subhedral y tamaños entre 0,3 a 3 [mm] (Fig. 20b).

En ambos grupos, los cristales presentan tonalidades incoloras (nícoles paralelos) y hábitos tabulares. A nícoles cruzados, se observan mayoritariamente, maclas polisintéticas y tonalidades grisáceas de primer orden.

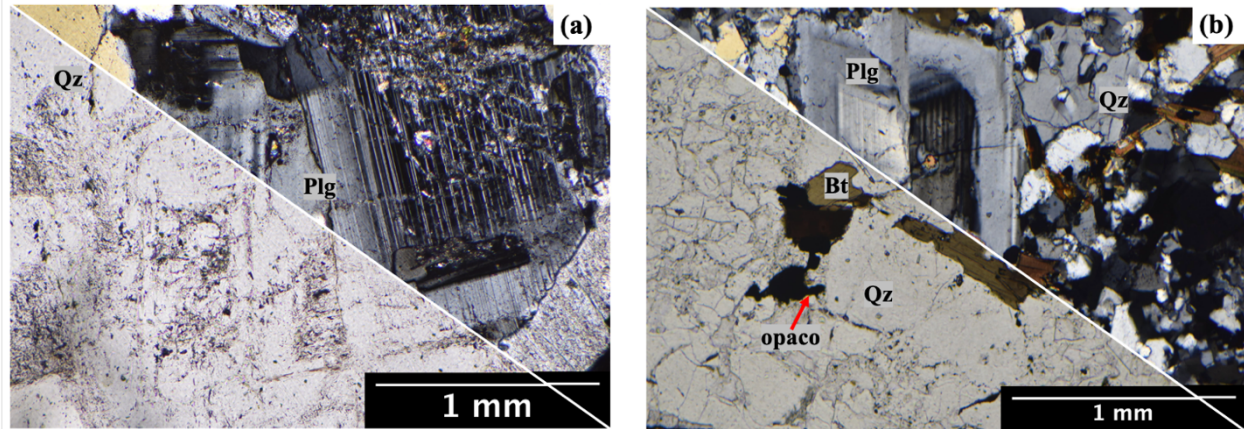


Figura 20. Cristales de plagioclasa en grupos de estudio a nícoles paralelos y nícoles cruzados. (a) Cristal de plagioclasa en grupo 1. (b) Cristal de plagioclasa en grupo 2.

5.2.3 Cuarzo

Cristales anhedrales (Fig. 21a y 21b). con tonalidades incoloras a nícoles paralelos que presentan dos poblaciones de tamaño en ambos grupos de estudio (Fig. 21c y 21d).

Por un lado, el grupo 1 presenta 59% de fenocristales y 41% de microlitos, con tamaños que varían desde los 0,05 a 4 [mm]. Por otro lado, el grupo 2 presenta un porcentaje de 43% de fenocristales y 57% de microlitos, con tamaños que varían desde los 0,01 a 4 [mm]. Además, microlitos se encuentran rellenoando cavidades o fracturas en este grupo.

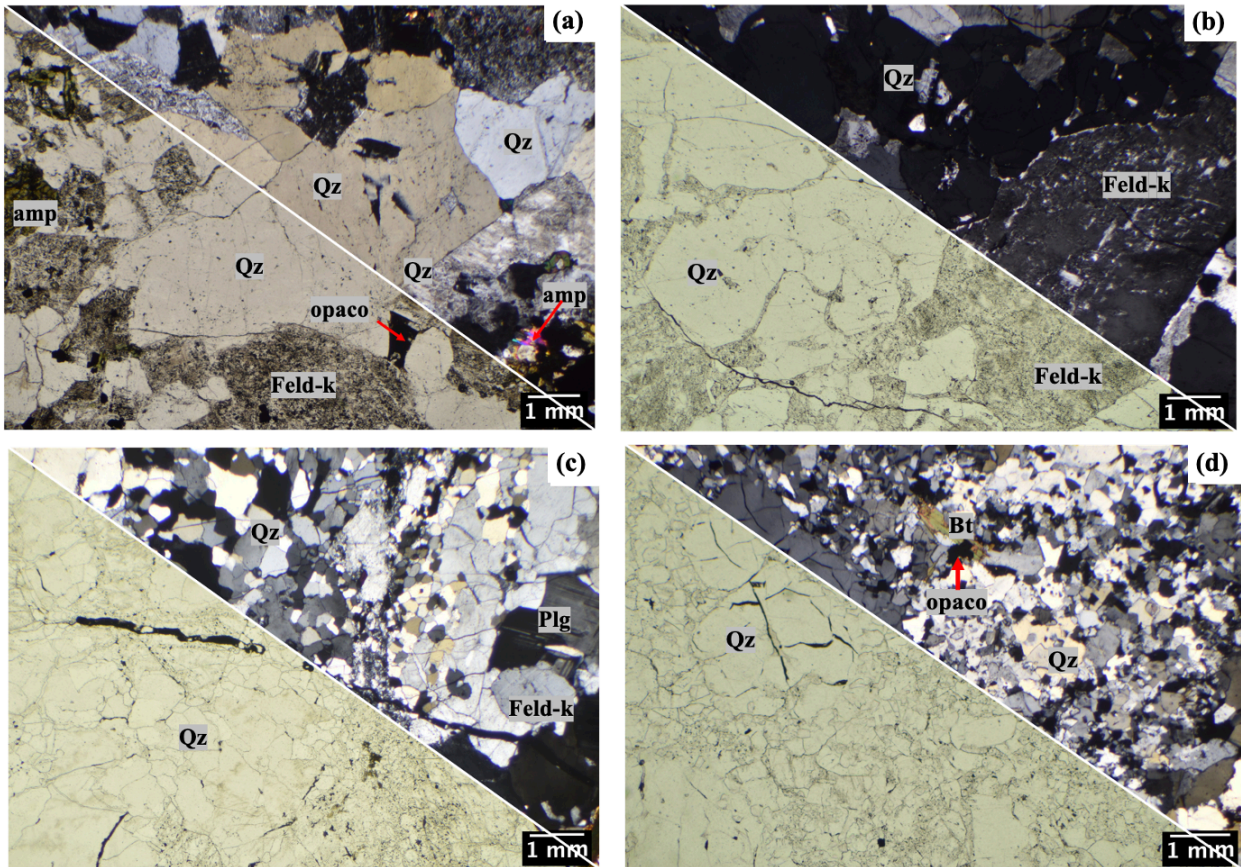


Figura 21. Cristales de cuarzo en grupos de estudios a nicoles paralelos y nicoles cruzados. (a) Fenocristal de cuarzo en grupo 2. (b) Cristal de cuarzo en grupo 1. (c) Microlitos y fenocristales de cuarzo en grupo 2. (d) Microlitos y fenocristales de cuarzo en grupo 1.

5.2.4 Biotita

En el grupo 1, los cristales se presentan con formas anhedrales a subhedrales presentando dos poblaciones de tamaño (Fig. 22a) con un 65,7% de fenocristales y 34,2% de microlitos, con tamaños que varían desde los 0,05 a 3 [mm]. En cuanto a las características observadas, presentan fuerte pleocroísmo con tonalidades marrones a nicoles paralelos y tonalidades verdosas amarillentas hasta rosadas de segundo orden a nicoles cruzados (Fig.22b). Los cristales exhiben alteración clorítica (cloritización, Fig. 22c y 22d). El porcentaje de cristales frescos (sin cloritización visible) es menor al 2% dentro de la fase de estudio.

Por otro lado, el grupo 2 presenta cristales anhedrales a subhedrales con hábito tabular y tamaños entre 0,15 a 3 [mm] (Fig. 22e y 22f). Presentan fuerte pleocroísmo con tonalidades marrones a nicoles paralelos y tonalidades verdosas – rosadas de segundo a tercer orden a nicoles cruzados.

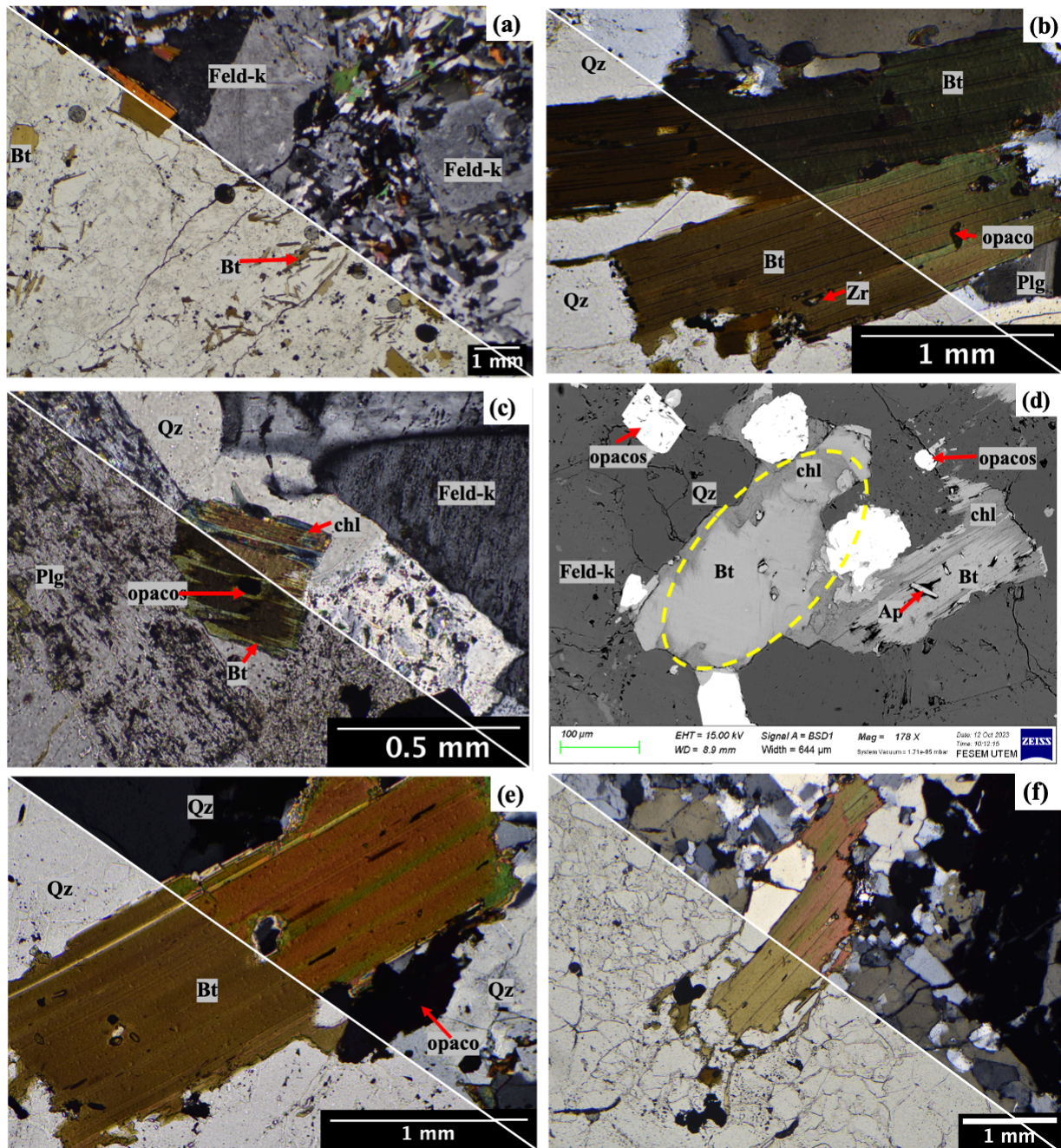


Figura 22. Cristales de biotita en líticos graníticos. (a) Microlitos y fenocristales de biotita a nícoles paralelos y nícoles cruzados en el grupo 1. (b) Fenocristales de biotita a nícoles paralelos y cruzados en grupo 1. (c) Alteración clorítica en cristal de biotita a nícoles paralelos y nícoles cruzados en grupo 1. (d) Imagen SEM de alteración clorítica en grupo 1. (e) y (f) Cristales de biotita a nícoles paralelos y nícoles cruzados en grupo 2.

5.2.5 Anfibol

Cristales fracturados anhedrales a subhedrales de tamaño entre 0,2 a 4 [mm] presentes únicamente en el grupo 1 (Fig. 23). Presentan tonalidades verdosas a marrones a nícoles paralelos y exhiben alteración clorítica (cloritización) debido al intercrecimiento de clorita (Fig. 23b). El porcentaje de cristales frescos (sin cloritización visible) es menor al 3% del total de las fases

analizadas. De estos cristales frescos, se reconoce hornblenda con forma subhedral como uno de los anfíboles presentes en los líticos graníticos (clivaje en dos direcciones, $60^{\circ}/120^{\circ}$, Fig. 23a).

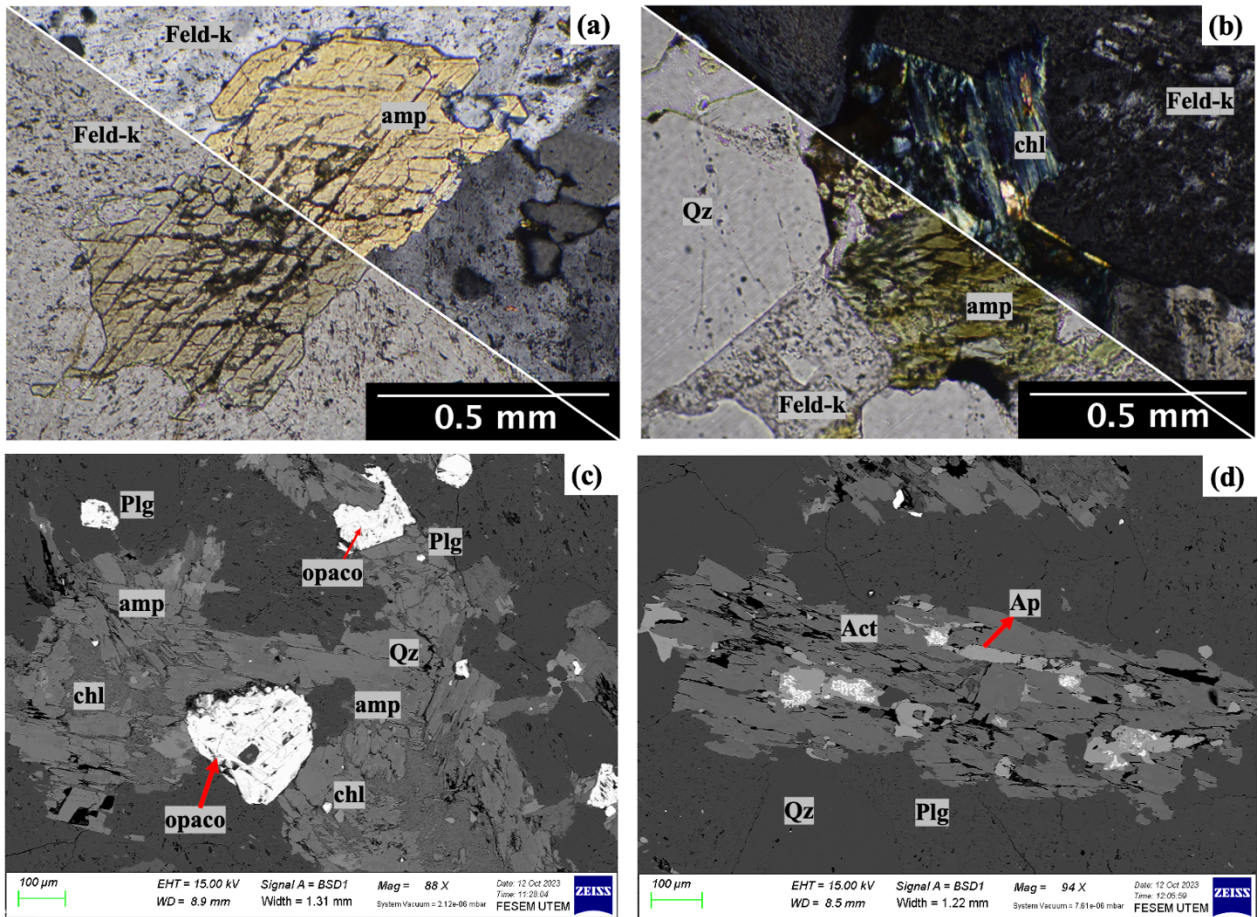


Figura 23. Cristales de anfíboles en el grupo 1. (a) Fenocristales de hornblenda a nícoles paralelos y nícoles cruzados. (b) Alteración clorítica en cristal de anfíbol a nícoles paralelo y nícoles cruzados. (c) y (d) Imágenes SEM de cristales de anfíboles.

5.2.6 Óxidos de Fe-Ti

Cristales con bordes irregulares y forma anhedral de colores amarillos con tamaños de 0,04 a 1 [mm], en el grupo 1 (Fig. 24a y 24b) y de 0,03 a 1 [mm], en el grupo 2 (Fig. 24c y 24d). Estos presentan oquedades y clivaje en una dirección. Se observan tanto óxidos de Fe como óxidos de Fe-Ti asociados a cristales de biotita.

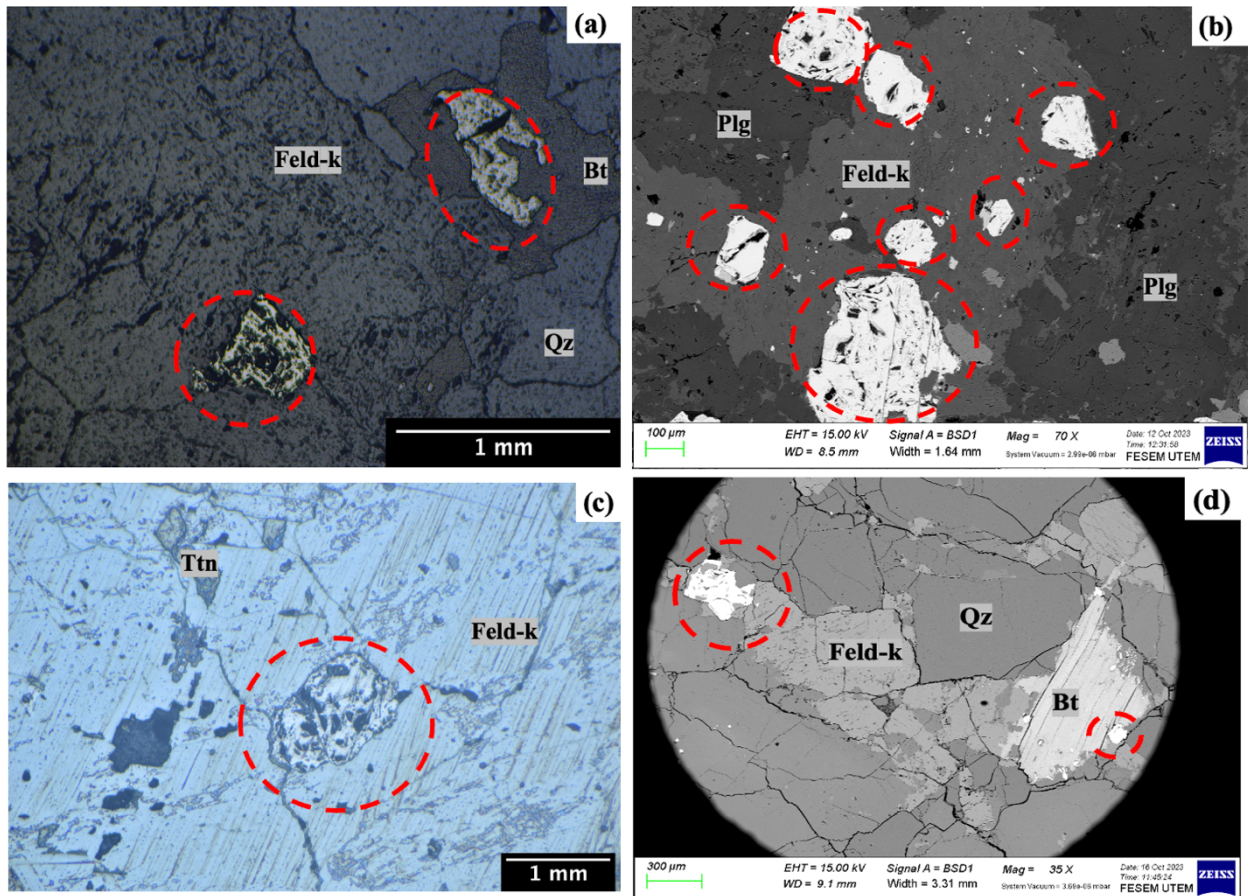


Figura 24. Cristales de óxidos de Fe y Fe-Ti en líticos graníticos. (a) Fotomicrografía de cristales de óxidos de Fe y Fe-Ti a luz reflejada en el grupo 1. (b) Cristales de óxidos de Fe y Fe-Ti a SEM. (c) Fotomicrografía de cristales de óxidos de Fe y Fe-Ti a luz reflejada en el grupo 2. (d) Cristales de óxidos de Fe y Fe-Ti a SEM.

5.2.7 Titanita

Cristales anhedrales a euhedrales con forma de rombos (Fig. 25a) y presencia de fracturas. Estos presentan tamaños entre 0,1 a 4 [mm], en el grupo 1 (Fig. 25a y 25b) y de 0,1 a 5 [mm], en el grupo 2 (Fig. 25c y 25d). Presenta alto relieve en comparación a las otras fases minerales y tonalidades amarillas verdosas a incoloras a nícoles paralelos. A nícoles cruzados, se observan tonalidades amarillas- marrones hasta rosadas verdosas de segundo a tercer orden.

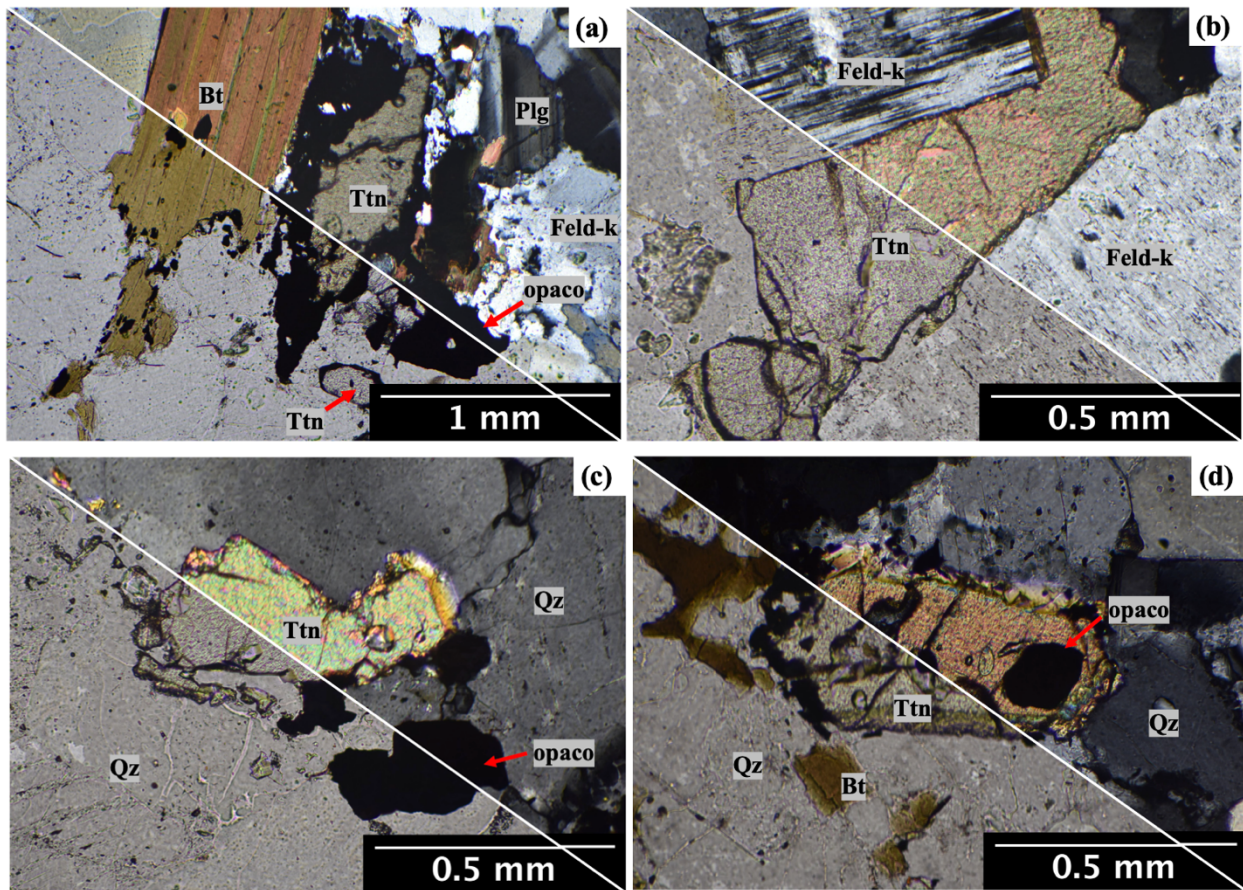


Figura 25. Cristales de titanita en líticos graníticos a nícoles paralelos y nícoles cruzados. (a) y (b) Cristales de titanita en grupo 1. (c) y (d) Cristales de titanita en grupo 2.

5.2.8 Clorita

Cristales anhedrales de tamaños entre 0,1 a 1 [mm] con clivaje en una dirección y fracturas, presentes únicamente en el grupo 1 (Fig.26). Además, se observa como alteración en cristales de biotita y anfíboles (observados únicamente en grupo 1). De tonalidades verdosas a nícoles paralelos y azul berlín a tonalidades rosadas-verdosas de 2  orden en nícoles cruzados tanto en alteraciones como fenocristales.

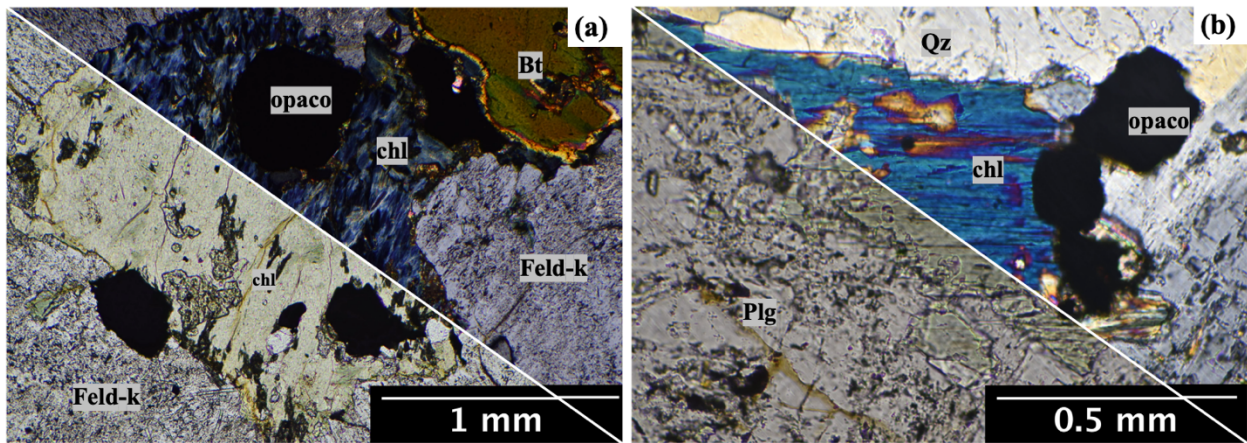


Figura 26. (a) y (b) Cristales de clorita en líticos graníticos del grupo 1 a nícoles paralelos y nícoles cruzados.

5.3 Análisis textural

5.3.1 Textura inequigranular

Diferencia de tamaños relativa entre los distintos cristales de las fases minerales presentes en los líticos graníticos tanto en el grupo 1 como en el grupo 2 dispuestos de forma homogénea. Se observan cristales equantes, poligonales y con bordes levemente aserrados de la misma fase mineral, pero con diferencia en el tamaño de los cristales, evidenciando dos poblaciones de tamaño. En la Fig. 27a, se observa fenocristales fracturados con bordes irregulares y tamaños entre 1 a 3 [mm] asociado a un bajo porcentaje de microlitos (< 1[mm]) de biotita, cuarzo y anfiboles con formas anhedrales. En cuanto a los fenocristales, tanto cuarzo como feldespatos se encuentran en contacto directo entre los bordes de los cristales. En la Fig. 27b, se evidencia una textura inequigranular porfídica con fenocristales de cuarzo y feldespatos con bordes irregulares y fracturas de tamaños entre 1 a 4 [mm] asociados a un alto porcentaje de microlitos de cuarzo y biotita. En cuando a los microlitos de cuarzo, estos se encuentran en contacto directo entre sí y con los fenocristales de la misma fase mineral. Esta textura porfídica inequigranular, es visible también, en las figuras 27c y 27d. En ambos casos se observan fenocristales de feldespatos y cuarzo fracturados de hasta 6 [mm] de tamaño con microlitos de cuarzo con bordes irregulares y formas anhedrales, los cuales se encuentran en contacto entre sí. Además, de microlitos de biotita los cuales se disponen en las rocas como cristales aislados, es decir, no se encuentran en contacto entre sí.

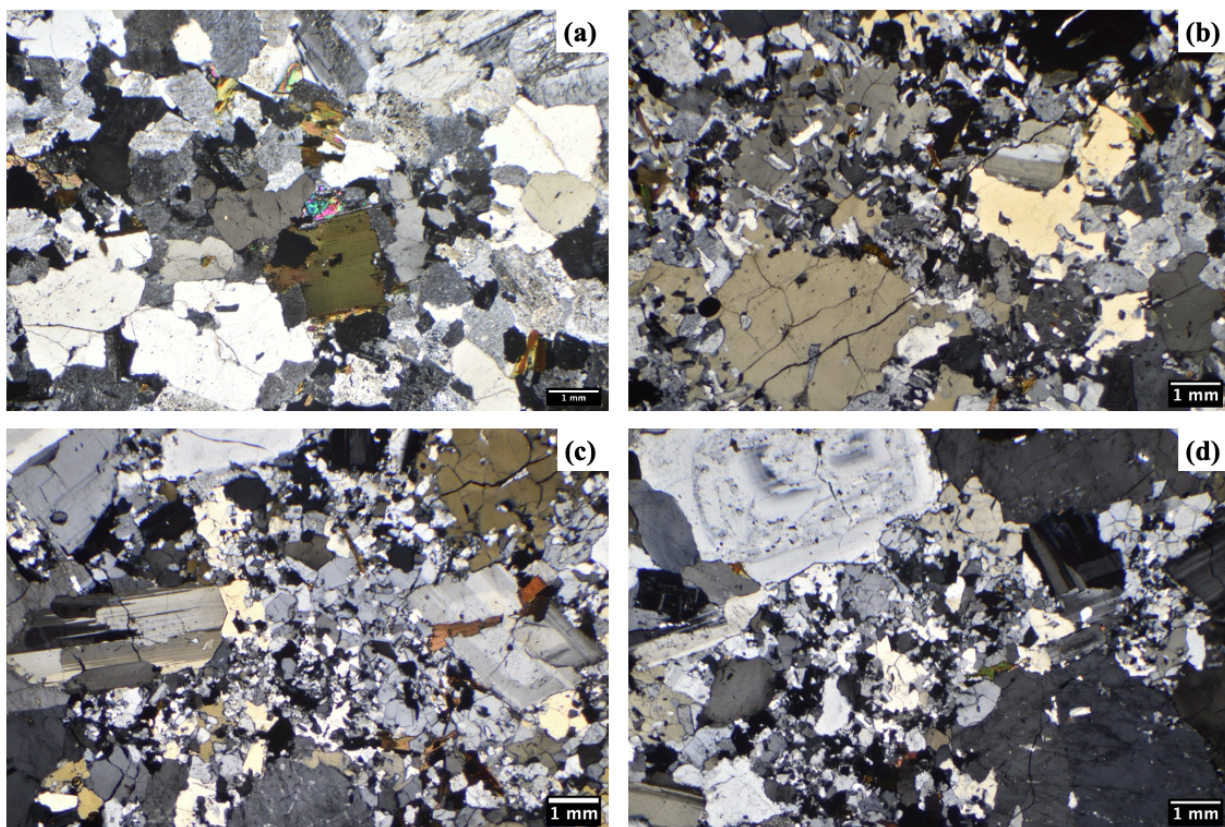


Figura 27. Fotomicrografía textura inequigranular asociada a líticos graníticos a nícoles cruzados. (a) y (b) Grupo 1. (c) y (d) Grupo 2.

5.3.2 Texturas asociada a vetillas

Además de la textura inequigranular e inequigranular porfídica mencionada anteriormente, en donde tanto microlitos como fenocristales se disponen de manera homogénea en las muestras, se observa una textura intergranular en donde existe crecimiento de microcristales de cuarzo de menor tamaño (menor a 0,1 [mm]) con orientación preferente, es decir, localizaciones asociado a vetillas.

En las figuras 28a y 28b, se evidencia el crecimiento localizado y preferente de los microcristales de cuarzo asociado a vetillas. Los microcristales presentan bordes irregulares con aspectos aserrados y formas anhedrales. Estos atraviesan e interrumpen fenocristales y microlitos de la misma fase mineral, particularmente en cristales con bordes aserrados.

En las figuras 28c y 28d, se observa crecimiento intergranular de microcristales de cuarzo con orientación preferente. Estos se encuentran bordeando los fenocristales de feldespatos, anteriormente descritos.

Las figuras 28e y 28f, muestran un crecimiento de microcristales cuarzo con tamaños menores a 20 [um] asociado a poros intergranulares, los cuales irrumpen fenocristales previos de fases minerales como feldespatos, óxidos de Fe-Ti y anfíboles.

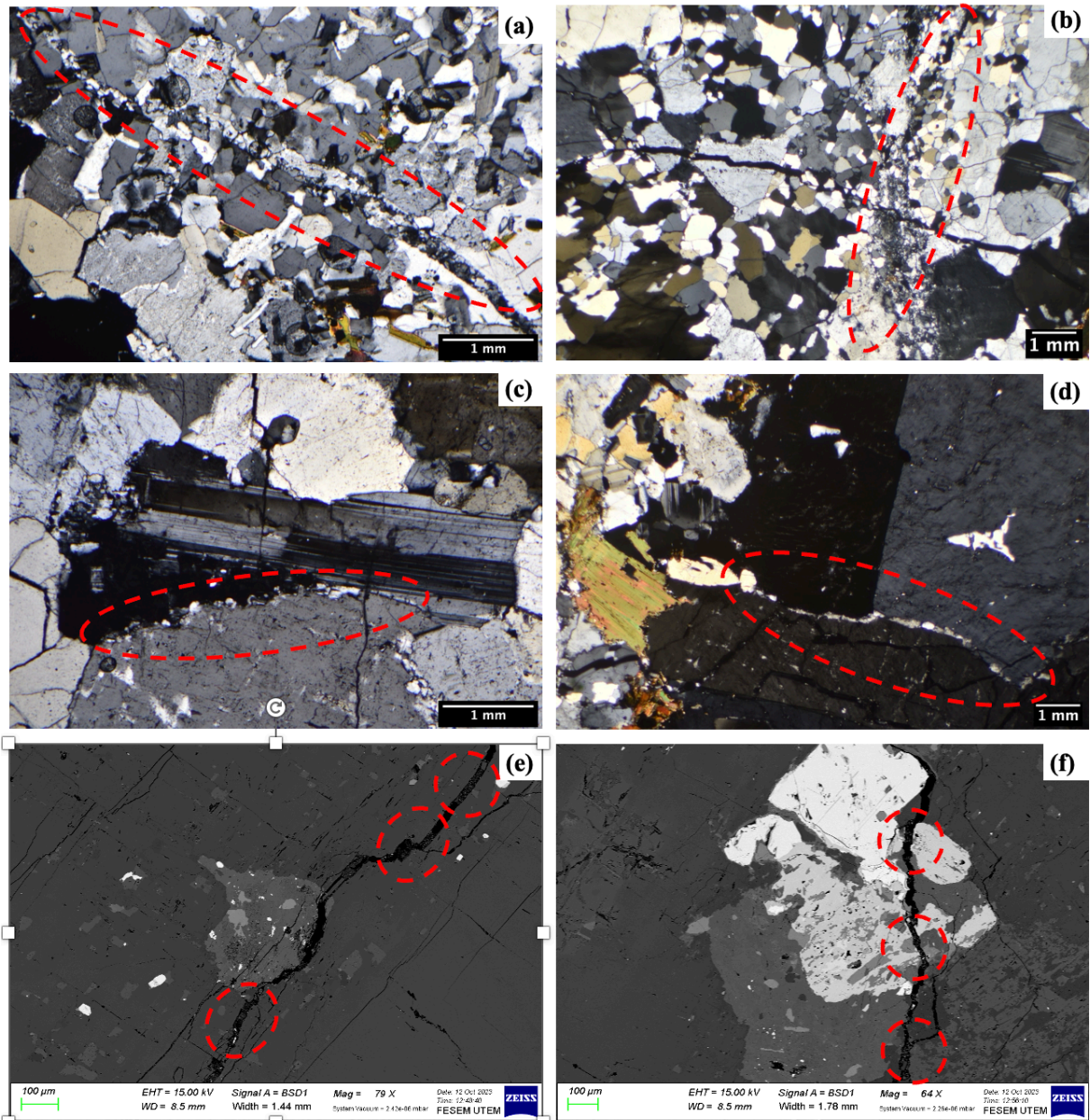


Figura 28. Fotomicrografía de texturas asociada a vetillas en grupo 1. (a) y (b) Fotomicrografía a nícoles cruzados de microlitos de cuarzo. (c) y (d) Fotomicrografía a nícoles cruzados de microlitos de cuarzo asociado a bordes de fenocristales. (e) y (f) Imágenes SEM de crecimiento de microlitos asociado a vetillas.

Por otro lado, en la Fig. 29 se evidencia el crecimiento localizado asociado a vetillas y poros intergranulares de microcristales de cuarzo en el grupo 2.

En la figura 29a, se observa este crecimiento localizado de microcristales de cuarzo, feldespatos y óxidos de Fe-Ti en vetillas. El crecimiento localizado de esta fase mineral irrumpe, principalmente, microlitos de cuarzo y feldespatos. Los microcristales presentan bordes angulosos formas anhedrales y tamaños entre 140 a 10 [um] (Fig. 29b y 29c).

La Fig. 29d, muestra un crecimiento de microcristales de cuarzo con tamaños menores a 5 [um] asociado a poros intergranulares, el cual irrumpe fenocristales previos de biotita.

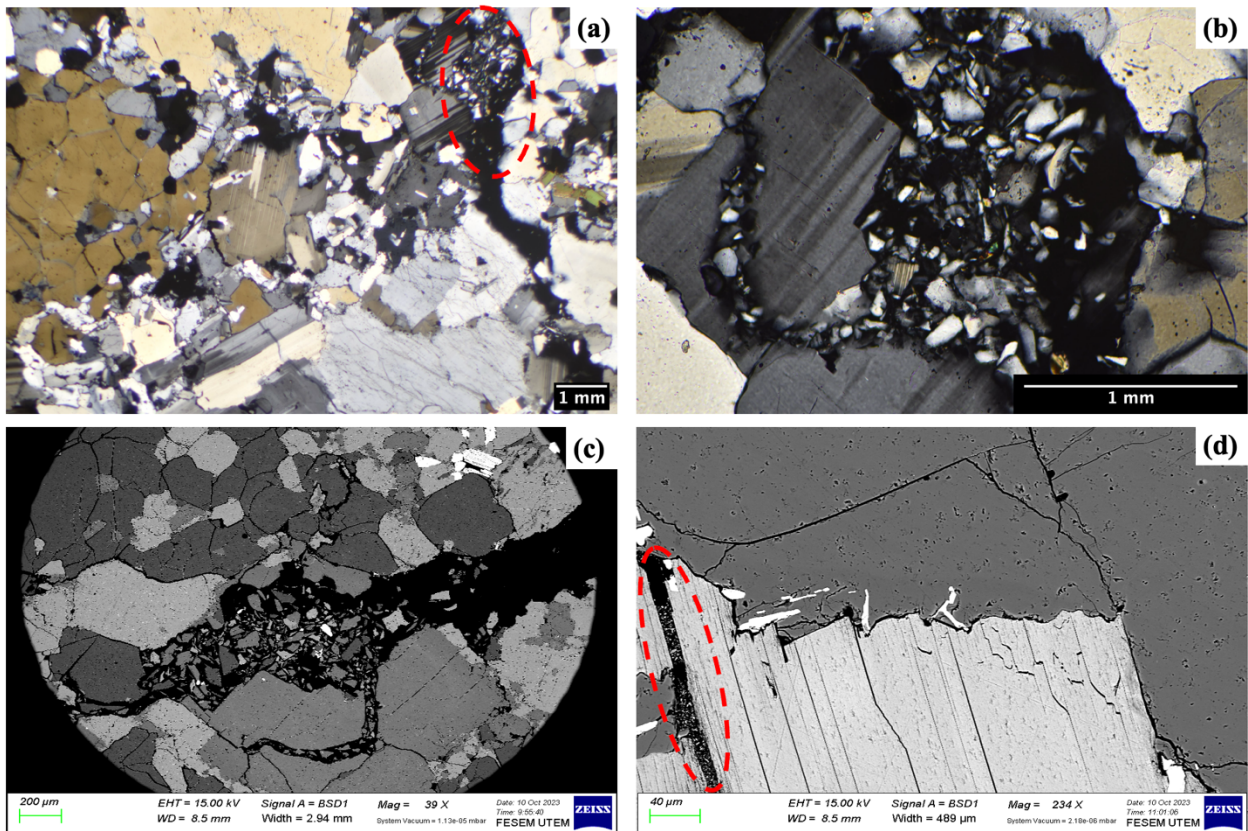


Figura 29. Fotomicrografías de texturas asociadas a vetillas en grupo 2. (a) y (b) Fotomicrografía de cúmulos de microlitos de cuarzo a nícoles cruzados. (c) y (d) Imágenes SEM de crecimiento de microlitos asociado a vetillas.

5.3.3 Texturas de intercrecimiento y desequilibrio

5.3.3.1 Textura mesopertítica

Exsolución de feldespato cálcico en cristales de feldespato potásico de forma lamelar o en forma de venas, tanto en el grupo 1 (Fig. 30a) como en el grupo 2 (Fig.30b). Los fenocristales de feldespato potásico presentan formas anhedrales con bordes rectos y relieve medio. Estos se encuentran asociados a fenocristales de cuarzo.

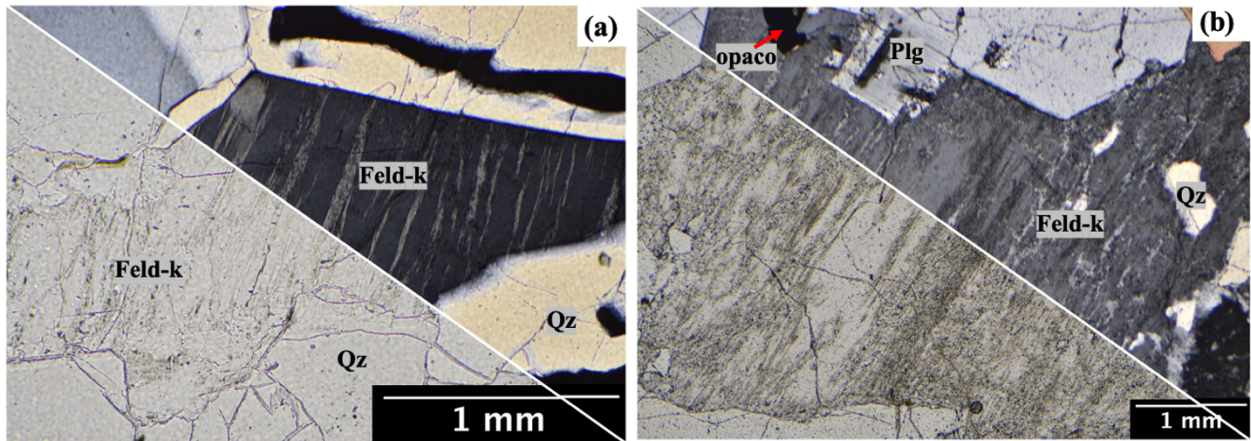


Figura 30. Fotomicrografía a nícoles paralelo y cruzado de textura mesopertítica. (a) Grupo 1. (b) Grupo 2.

5.3.3.2 Textura gráfica o pegmatítica

Intercrecimiento de cristales cuneiformes de cuarzo de forma vemicular dentro de cristal de feldespato potásico, en el grupo 1 (Fig. 31a) y de plagioclasas, en el grupo 2 (Fig. 31b). En el grupo 1, se observa un fenocristal de feldespato potásico de forma anhedral con intercrecimiento de cristales de forma vemicular y anhedral de cuarzo. Junto a estas fases minerales, se observa cristales de biotita y anfíboles. Por otro lado, en el grupo 2, el fenocristal que presenta la textura descrita es un cristal de plagioclase con forma euhedrales a subhedrales, hábito tabular junto a fenocristales de cuarzo y feldespatos con bordes de aspecto aserrados.

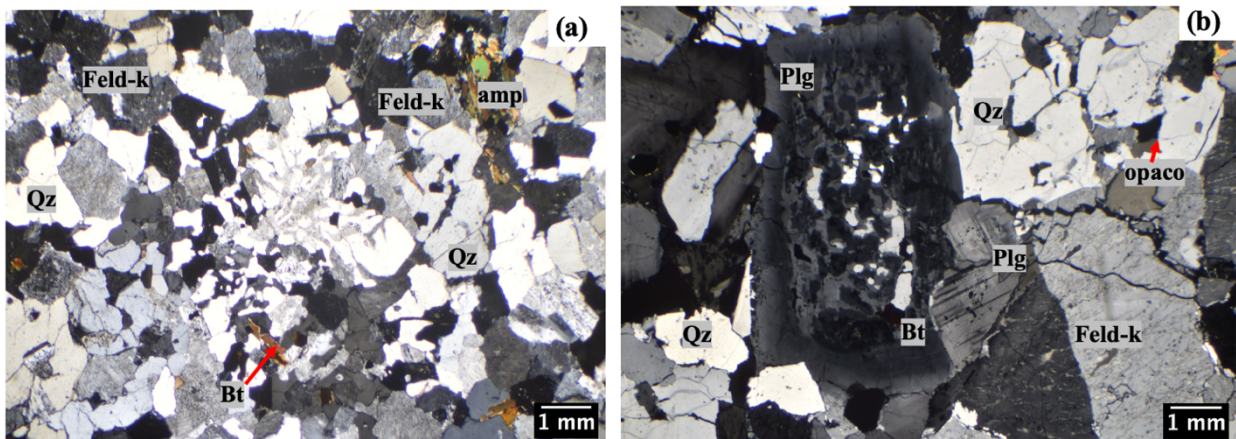


Figura 31. Fotomicrografía de textura gráfica a nícoles paralelos como nícoles cruzados. (a) Grupo 1. (b) Grupo 2.

5.3.3.3 Zonación normal y textura poiquilítica

Variación de tonalidades grises a incoloras de forma concéntrica presente en los núcleos de fenocristales de plagioclasas con forma subhedrales tanto en grupo 1 (Fig. 32a, 32b) como en grupo 2 (Fig. 32c y 32d). En ambos casos, los cristales que presentan zonación se encuentran asociados a microlitos y fenocristales de cuarzo, feldespato potásico y biotita.

En las figuras 32a y 32c, también se evidencia textura poiquilítica en cristales de plagioclase y feldespato potásico con intercrecimiento de chadacristales de cuarzo, óxidos de Fe-Ti, biotita,

titanita y apatito en cristales huésped. Los chadacristales presentan formas anhedrales a subhedralas con bordes irregulares.

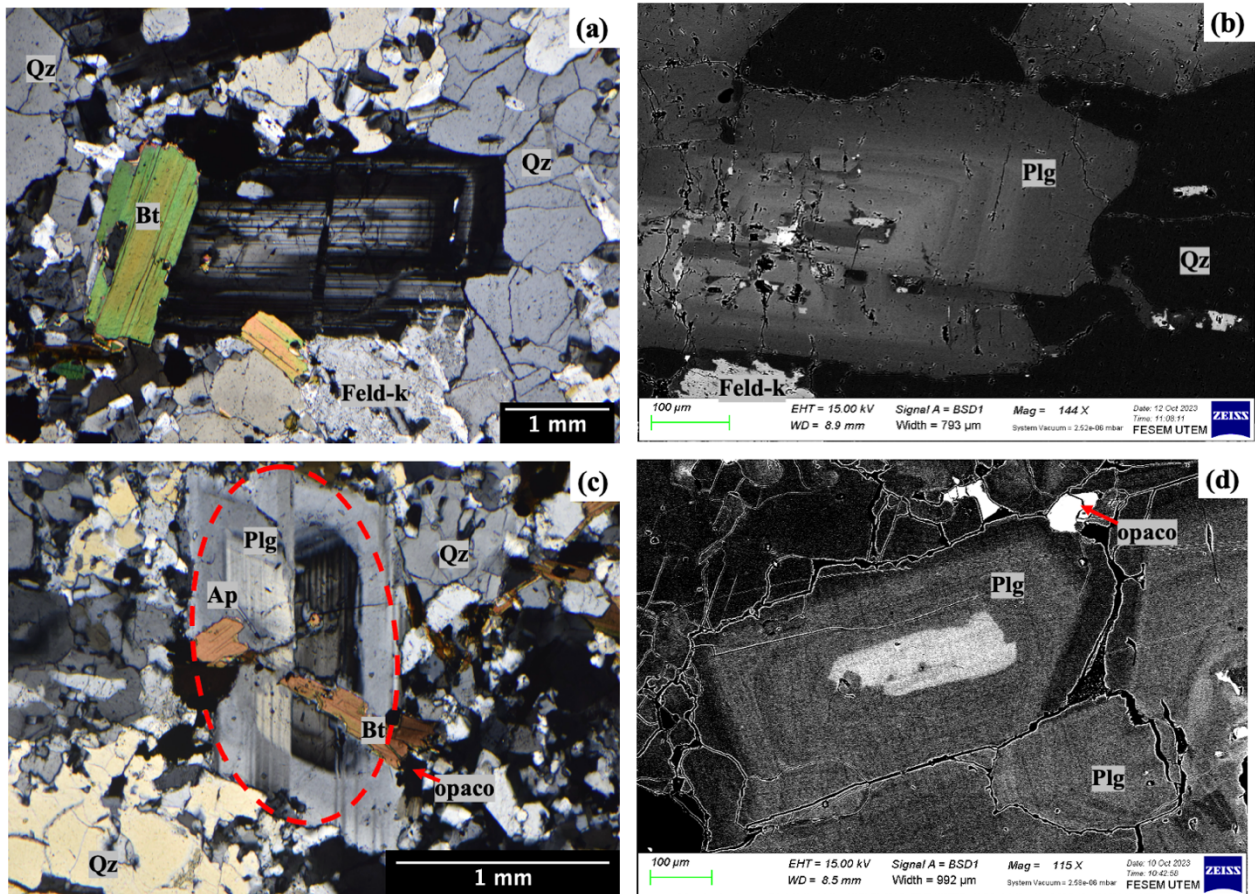


Figura 32. Zonación normal en cristales de plagioclasa en líticos graníticos. (a) Fotomicrografía de zonación normal a nicoles cruzados en grupo 1. (b) Imagen SEM de zonación normal en grupo 1. (c) Fotomicrografía de zonación normal a nicoles cruzados en grupo 2. (d) Imagen SEM de zonación normal en grupo 2.

5.3.3.4 Textura consertal

Textura presente tanto en el grupo 1 como en el grupo 2, en donde se observan bordes de los cristales con forma irregular y aspecto “aserrado”. Por un lado, en el grupo 1, se identifica bordes irregulares de fenocristales asociado, principalmente, a cuarzo (Fig. 33a) y en algunos casos a feldespatos (Fig. 33c). Por otro lado, en el grupo 2, se observan fenocristales con bordes de aspecto “aserrados” asociado, principalmente, a cristales de cuarzo (Fig.33b y 33d).

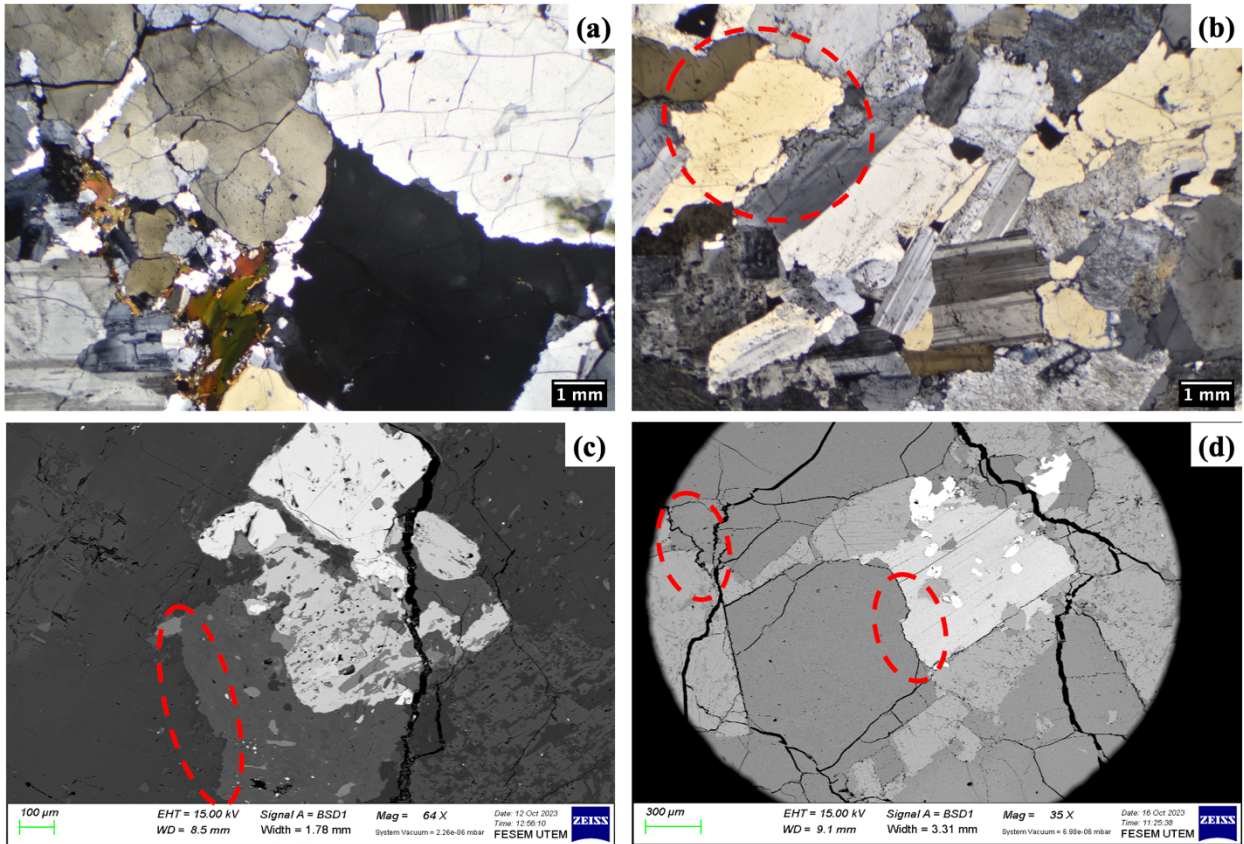


Figura 33. Fotomicrografías textura consertal en líticos graníticos. (a) Fotomicrografía a nícoles cruzados de bordes irregulares en grupo 1. (b) Fotomicrografía a nícoles cruzados de bordes irregulares en grupo 2. (c) Imagen SEM bordes irregulares en feldespato, grupo 1. (d) Imagen SEM bordes irregulares en cristales de cuarzo, grupo 2.

Capítulo 6: Geoquímica de roca total

6.1 Elementos mayores

Los resultados químicos para elementos mayores (detalle de valores en Anexos C) señalan que los líticos graníticos obtenidos en los depósitos de la Ignimbrita Laguna del Maule son clasificados, según su composición, como granitos.

Estos resultados han sido normalizados para obtener datos anhidros (Tabla 5). Los granitos del grupo 1 tienen contenidos anhidros de sílice entre 72,93 – 75,21 %wt. de SiO_2 a excepción de una muestra (*rdm-N-02*) la cual presenta 63,58 %wt. SiO_2 y corresponde a una cuarzo-monzonita. Por otro lado, el grupo 2 presenta una composición de 73,14 – 73,34 %wt. SiO_2 . Se observa una tendencia polinómica en el grupo 1. Mientras, que el grupo 2, las muestras presentan %wt de SiO_2 constante.

En cuanto a los contenidos de potasio (K_2O) estos oscilan entre 4,34 – 5,10 %wt. y 4,27 – 5,14 %wt. para los grupos 1 y 2, respectivamente. Además, los álcalis (potasio sumado a sodio, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) cuentan con valores que van desde los 8,25 – 8,99 a 8,63 – 9,16 % en peso para los grupos 1 y 2, respectivamente. Además, se observa una tendencia lineal de los valores wt% de álcalis en el grupo 2. Mientras que el grupo 1, los valores %wt. de álcalis son constantes.

Los valores obtenidos para la muestra *rdm-N-02* se excluyen de la determinación de rangos en el grupo 1. Esto debido a que los valores difieren de la tendencia que siguen las muestras de este grupo.

Los valores de álcalis en función del contenido de sílice de los líticos graníticos de la Ignimbrita Laguna del Maule son dispuestos en un diagrama de álcalis totales versus sílice (TAS, Fig. 34) según Middlemost, E.A.K (1994) a excepción de la muestra *od-02*, la cual corresponde a una cuarzo-monzonita. Por otra parte, se grafican los valores de álcalis versus hierro versus magnesio en un diagrama ternario (AFM, Fig. 35) según Rollinson, H. (1996). Todas las muestras se disponen bajo el límite calco-alcálico.

Tabla 5. Valores %wt. de óxidos mayores normalizados al 100% de líticos graníticos obtenidos en la Ignimbrita Laguna del Maule. Se excluyen valores de muestra *rdm-N-02*.

Muestra	SiO₂	TiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MnO	MgO	CaO	Na₂O	K₂O	P₂O₅
rdm-N-01	73,45	0,33	13,93	2,03	0,03	0,52	1,21	4,09	4,34	0,07
rdm-N-03	75,21	0,15	13,86	0,92	0,04	0,11	0,70	4,22	4,77	0,02
rdm-N-06	63,58	0,81	16,58	5,01	0,06	1,66	3,81	4,90	3,35	0,23
rdm-N-09	72,93	0,33	14,02	2,17	0,03	0,48	1,50	3,52	4,95	0,07
rdm-N-12	74,04	0,28	13,67	1,87	0,02	0,39	1,21	3,36	5,10	0,05
rdm-O-01	73,34	0,24	14,46	1,36	0,02	0,32	1,03	4,02	5,14	0,06
rdm-O-03	73,18	0,26	14,49	1,73	0,03	0,34	1,28	4,36	4,27	0,06
rdm-O-07	73,14	0,22	14,74	1,35	0,03	0,28	1,19	4,29	4,73	0,05

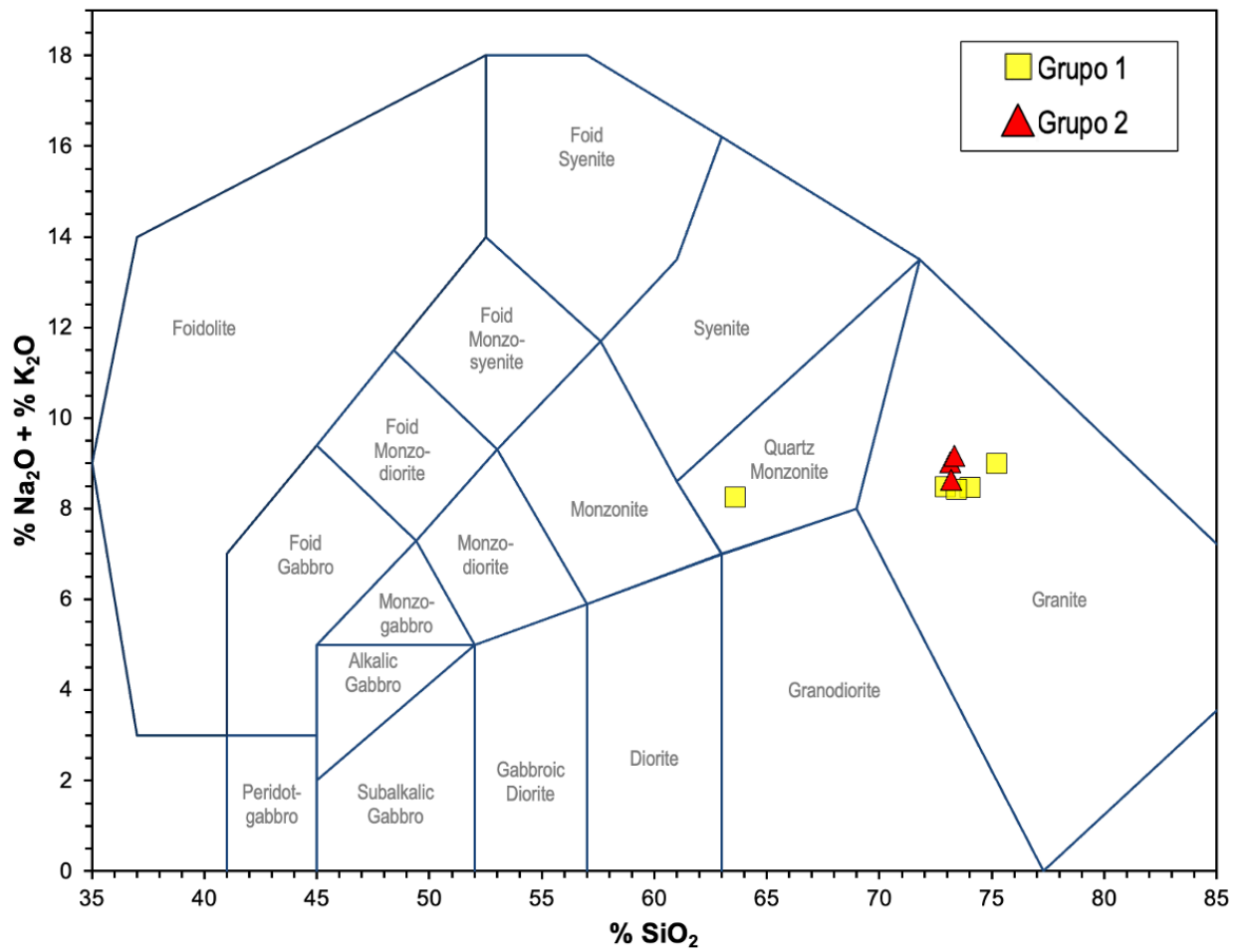


Figura 34. Diagrama TAS para líticos graníticos grupos 1 (cuadrados) y 2 (triángulos). Valores de óxidos mayores utilizados normalizados al 100%. Modificado de Middlemost, E.A.K (1994).

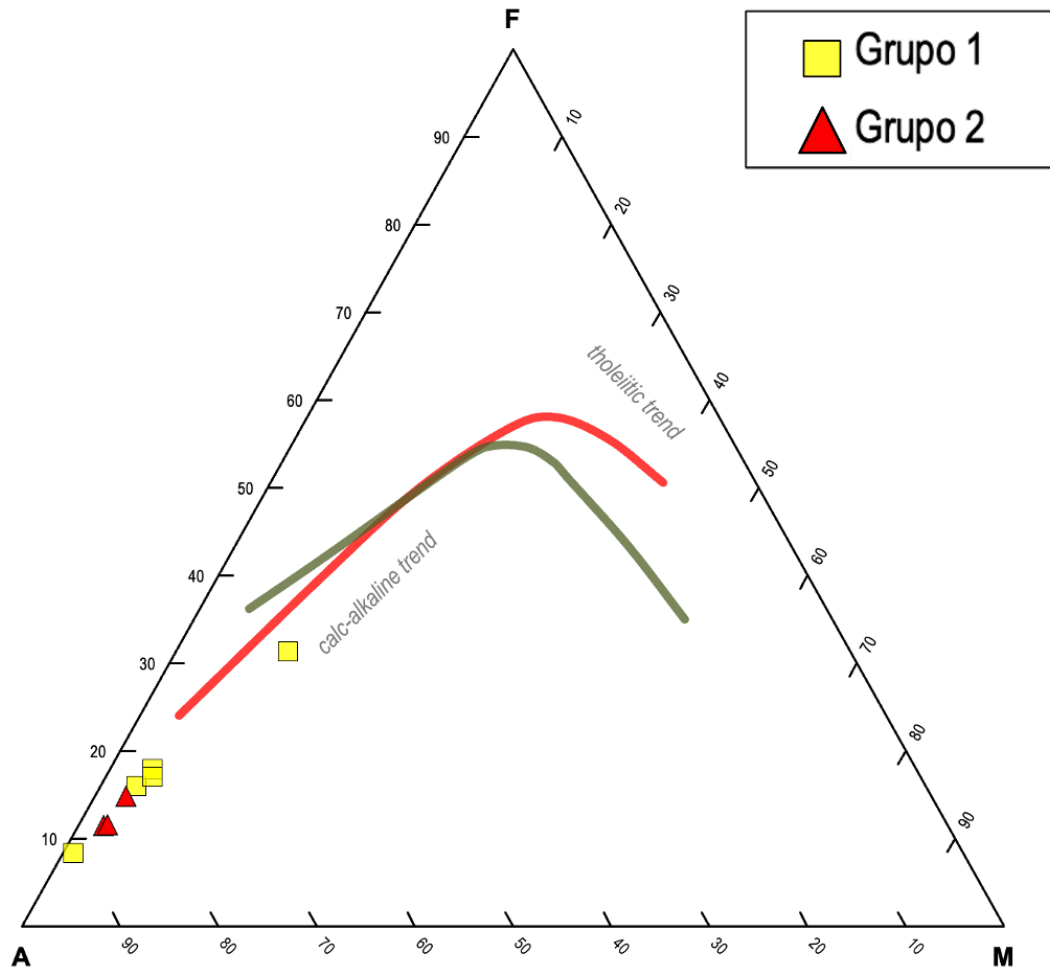


Figura 35. Diagrama AFM para líticos graníticos grupos 1 (cuadrados) y 2 (triángulos). Valores de óxidos mayores utilizados normalizados al 100%. Modificado de Rollinson, H. (1996).

6.2 Diagramas de variación

En la Figura 36, se observan las tendencias que siguen los óxidos versus el contenido de SiO_2 dispuestos en diagramas Harker. Los valores %wt. obtenidos para los óxidos Al_2O_3 y P_2O_5 se encuentran en la zona de *rn*. Mientras que MgO , MnO , CaO y SiO_2 decrecen con el aumento del contenido de SiO_2 , Na_2O y K_2O son directamente proporcionales al %wt. de SiO_2 .

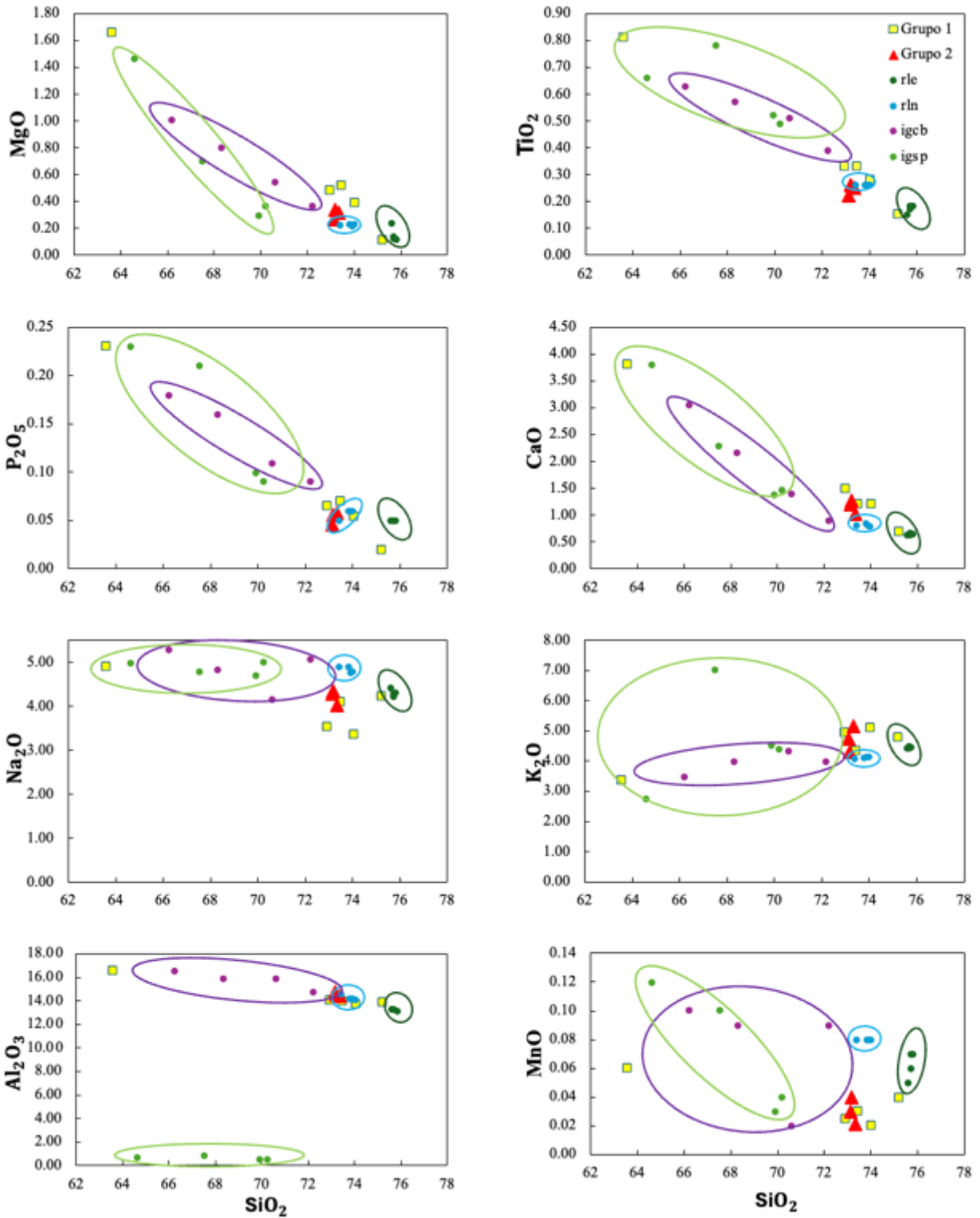


Figura 36. Diagrama Harker para valores %wt. de óxidos mayores normalizados al 100% de muestras de la Ignimbrita Laguna del Maule para grupo 1(cuadrados) y 2 (triángulos). Valores para Riolita Lomas Los Espejos (*rle*), Riolita Las Nieblas (*rln*), Riodacita Cajones de Bobadilla (*igcb*) y Riodacita Laguna Sin Puerto (*igsp*) obtenidos de Hildreth *et al.* (2010) (detalle en Anexos C)

Capítulo 7: Composición mineral

Para relacionar los datos geoquímicos y petrográficos, se realizó un análisis mineralógico de algunas muestras de líticas graníticas de la Ignimbrita Laguna del Maule. Para esto, se utilizó microsonda electrónica EMPA del Laboratorio *Electron Microbeam* de la Universidad de Bristol, Inglaterra. La composición de cada cristal ha sido determinada a través del cálculo de fórmulas estructurales. En este sentido, las plagioclasas presentes en el grupo 1, son principalmente albitas. Mientras que en el grupo 2, son oligoclasas. Por otro lado, el porcentaje de ortoclasa en feldespatos potásicos del grupo 1 es mayor que el grupo 2 (mayor % de pertita).

Se realizaron muestreos de fenocristales de feldespatos y anfíboles para ver evoluciones y distinciones composicionales. Además, estas fases minerales son utilizadas para termobarometría de las muestras estudiadas. Estas corresponden a *rdm-N -02*, *rdm-N -09*; para el grupo 1 y *rdm-O-06*, *rdm-O-07*; para el grupo 2.

7.1 Feldespatos

Se analizaron 318 puntos de muestreo en fenocristales de feldespatos presentes en las muestras analizadas tanto del grupo 1 como del grupo 2. En la Figura 37, se disponen los datos composicionales según parámetros An, Ab y Or. Los fenocristales de feldespato de líticas graníticas de la Ignimbrita Laguna del Maule muestran dos modas composicionales principales, según grupo (Tabla 6).

Tabla 6. Número de feldespatos cálcicos (a) y potásicos (b) en líticas graníticas de la Ignimbrita Laguna del Maule. Análisis de un total de 318 puntos, de los cuales 272 fueron usados para la identificación de feldespatos.

Grupo	1	2
Albita	17	8
Oligoclasa	12	19
Andesina	6	1
Labradorita	0	1

(a)

Grupo	1	2
Ortoclasa	8	2
Pertita	3	17
Sanidina	4	1

(b)

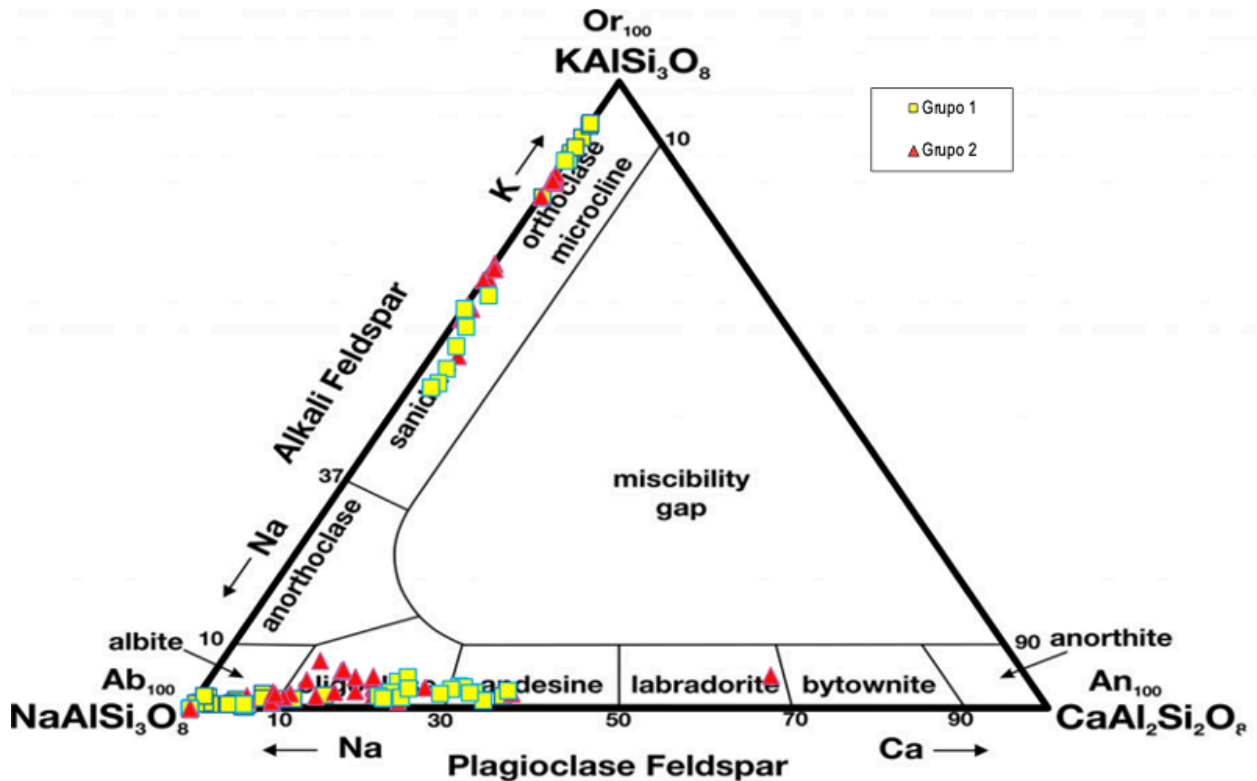


Figura 37. Diagrama ternario de composición de feldspatos Ab-An-Or. Miembros límites y solución solida son identificados con formula química. Composición y grupo de muestras analizadas (grupo 1, cuadrado y grupo 2, triángulo) están indicados en el diagrama. Modificado de Greenwood & Earnshaw (1998).

7.1.1 Plagioclasa

En el grupo 1, los cristales de plagioclasa presentan una composición de 99%-62% de Ab, 36%-0,3% de An y 5%-0,3% de Or. Mientras que en el grupo 2, la composición varía de 93-30% de Ab, 65-6% de An y 8-1% de Or. Según estos valores, el grupo 1 presenta una variabilidad desde albitas a andesinas, predominando las composiciones más albiticas. Por otro lado, en el grupo 2 presenta albitas a labradorita, predominando las composiciones más oligoclásicas (Tabla 6)

En cuanto a la variación de estos parámetros de borde a núcleo en plagioclasas, el contenido de An aumenta hacia el núcleo (Fig. 38) en ambos grupos de estudio. Esta variación permite determinar texturas de desequilibrio en ambos grupos, en particular, zonación normal (Fig.39). En este sentido, se observa una variación núcleo-borde de An_{36-1} y An_{63-98} , en el grupo 1 y de An_{36-19} y Ab_{61-77} , en el grupo 2.

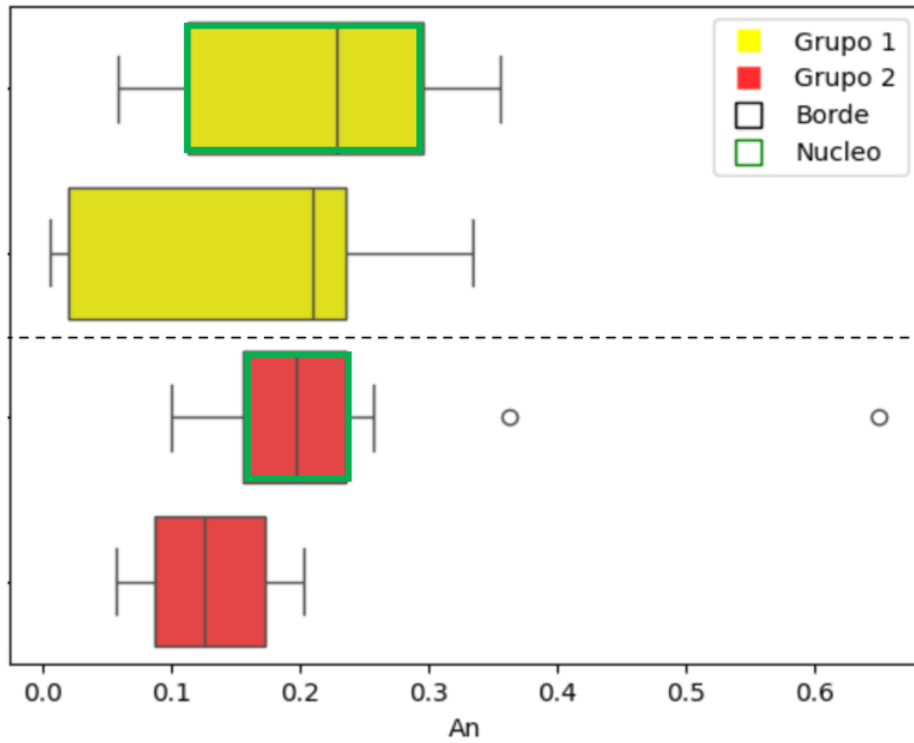


Figura 38. Variación porcentaje An núcleo-borde para plagioclasas en líticos graníticos.

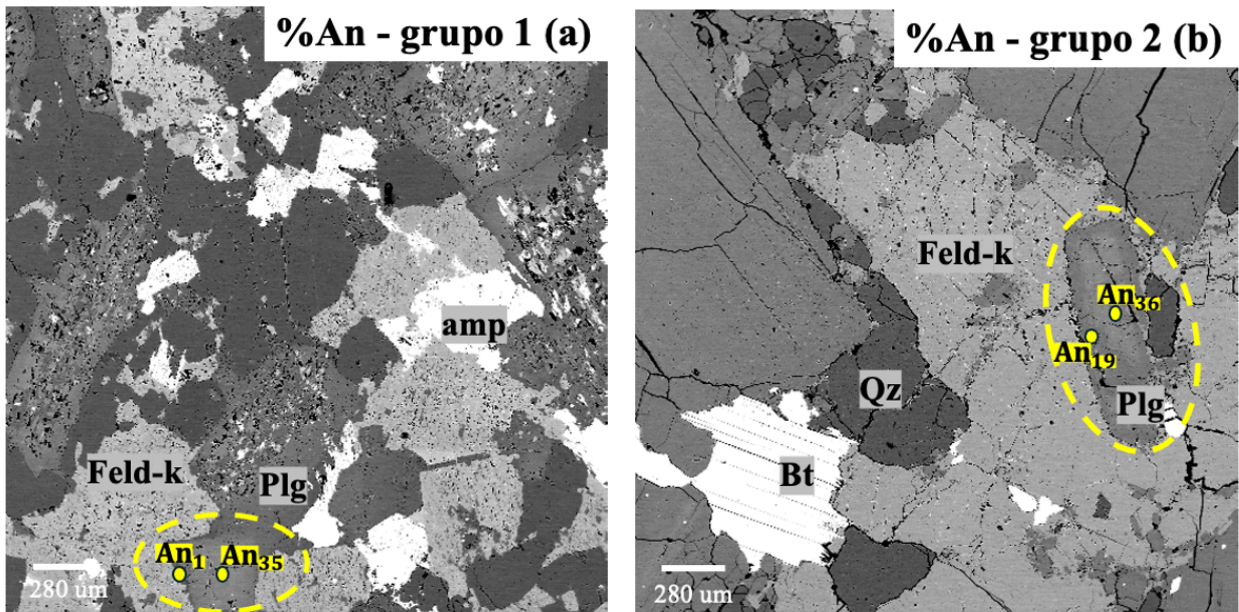


Figura 39. Variaciones composicionales borde-núcleo de An en plagioclasas zonadas en grupos de estudio. (a) Plagioclasa zonada del grupo 1 con variación borde-núcleo de An_{1-35} . (b) Plagioclasa zonada del grupo 2 con variación borde-núcleo de An_{19-36} .

7.1.2 Feldespato potásico

En el grupo 1, los cristales de feldespato potásico presentan una composición de 46 –5% Ab, <3% An y 95 – 51% Or. Mientras que para el grupo 2, las composiciones varían de 41 – 15% Ab, <3% An y 85 – 56% Or. Según estos valores, tanto el grupo 1 como el grupo 2, presentan una variabilidad desde ortoclasa hasta sanidina. Sin embargo, en el grupo 1 predominando las composiciones más ortoclásicas y en el grupo 2, composiciones más pertíticas (Tabla 6).

En cuanto a la variación de estos parámetros de borde a núcleo en plagioclasas, el contenido de Or no presenta una tendencia en los cristales analizados en el grupo 1 (Fig. 40 y 41a). Por otro lado, en el grupo 2, existe una disminución del contenido de Or hacia el borde de los cristales (Fig.40 y 41b).

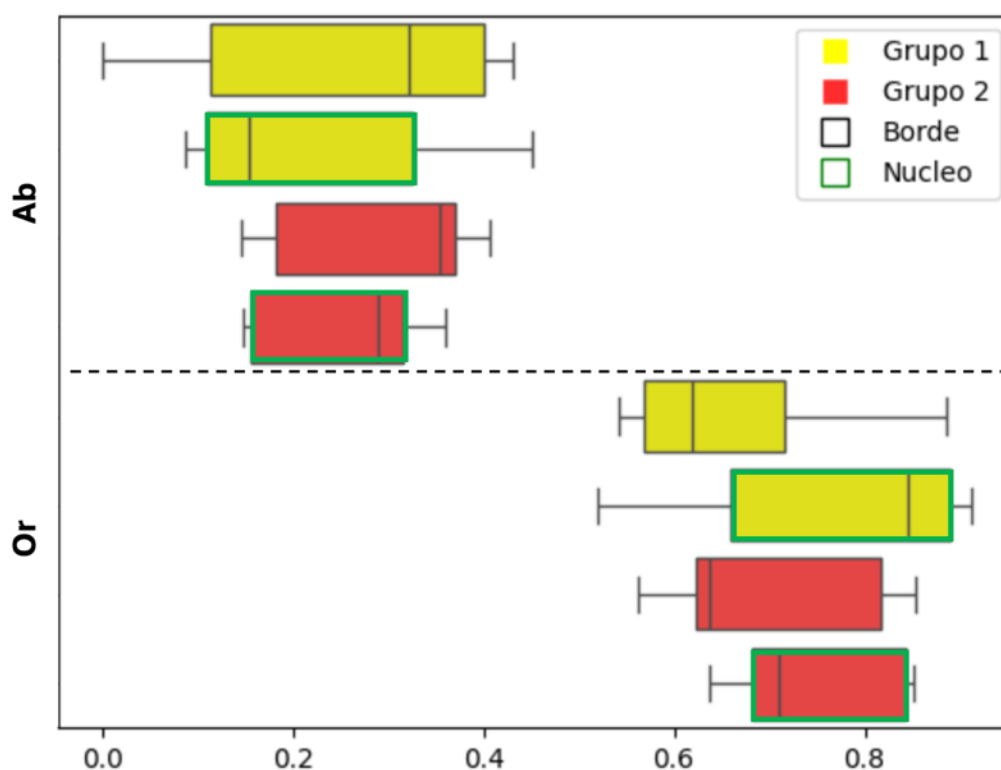


Figura 40. Variación porcentaje Ab y Or núcleo-borde para feldespato potásico en líticas graníticas.

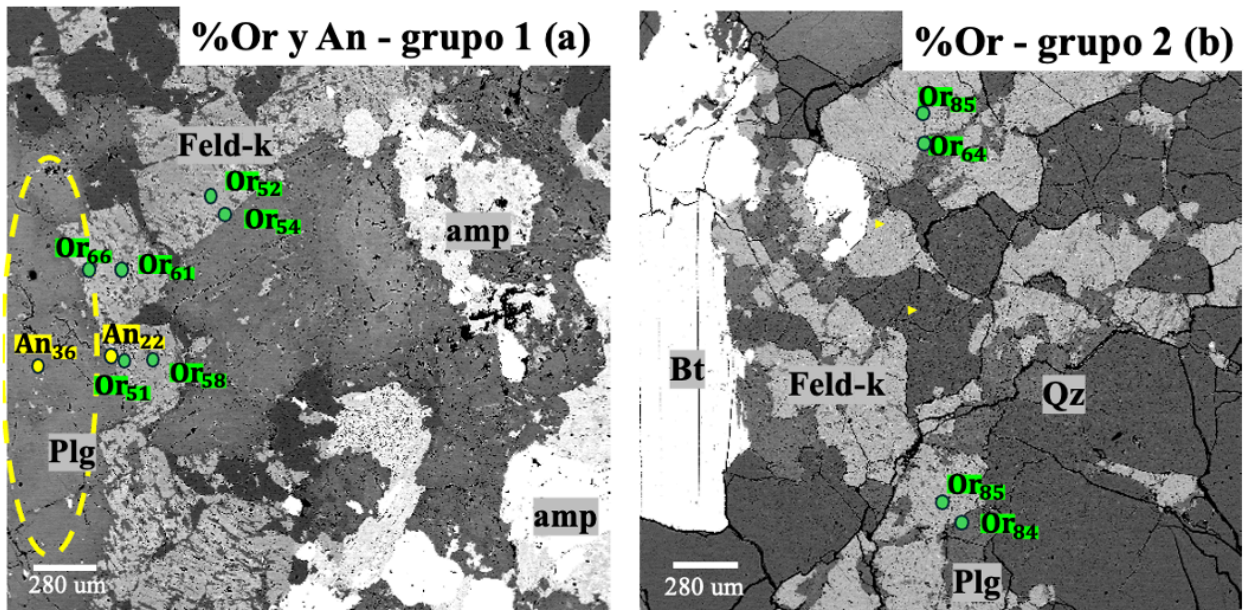


Figura 41. Variaciones composicionales borde-núcleo de An en feldespatos potásicos en grupos de estudio. (a) Cristales de feldespato potásico del grupo 1 con variación borde-núcleo de Or₅₁₋₅₈, Or₅₄₋₅₂, Or₆₆₋₆₁. (b) Cristales de feldespato potásico del grupo 2 con variación borde-núcleo de Or₆₄₋₈₅ y Or₈₄₋₈₅

7.2 Anfíboles

Se analizaron 107 puntos de muestreo en fenocristales de anfíboles presentes en líticos graníticos. Del total de puntos, se utilizaron 11 cristales para clasificar esta fase mineral, tal que el porcentaje total de óxidos mayores en peso estuvieran en el rango 95-98 wt%. Esta fase mineral puede subclasificarse en subgrupos según sus elementos mayores, es decir, Ca, Na, Fe⁺² y Mg en los sitios cristalográficos según formulas estructurales. La Figura 41 muestra la clasificación de los anfíboles analizados según el esquema de Leake *et al.* (1997).

En las muestras del grupo 1, se reconocen anfíboles cálcicos (Fig. 42). Como se observa en la Tabla 7, estos corresponden a anfíboles del tipo tremolita, actinolita a magnesio-hornblenda (Si = 9,148 – 6,885; Ca = 1,980 – 0,201; Na = 0,387- (-0,79); K = 0,159 – 0,004).

De núcleo a borde en los cristales de anfíboles se observa una disminución en el contenido de Al, Na y K. Por otro lado, un aumento del % de Si y Ca de núcleo a borde (Fig. 43 y 44).

Tabla 7. Número de anfíboles en líticos graníticos de la Ignimbrita Laguna del Maule. Análisis de un total de 107 puntos, de los cuales 55 fueron usados para la identificación de anfíboles.

Grupo	1
	Cálcica
Actinolita	2
Magnesio-hornblenda	8
Tremolita	1

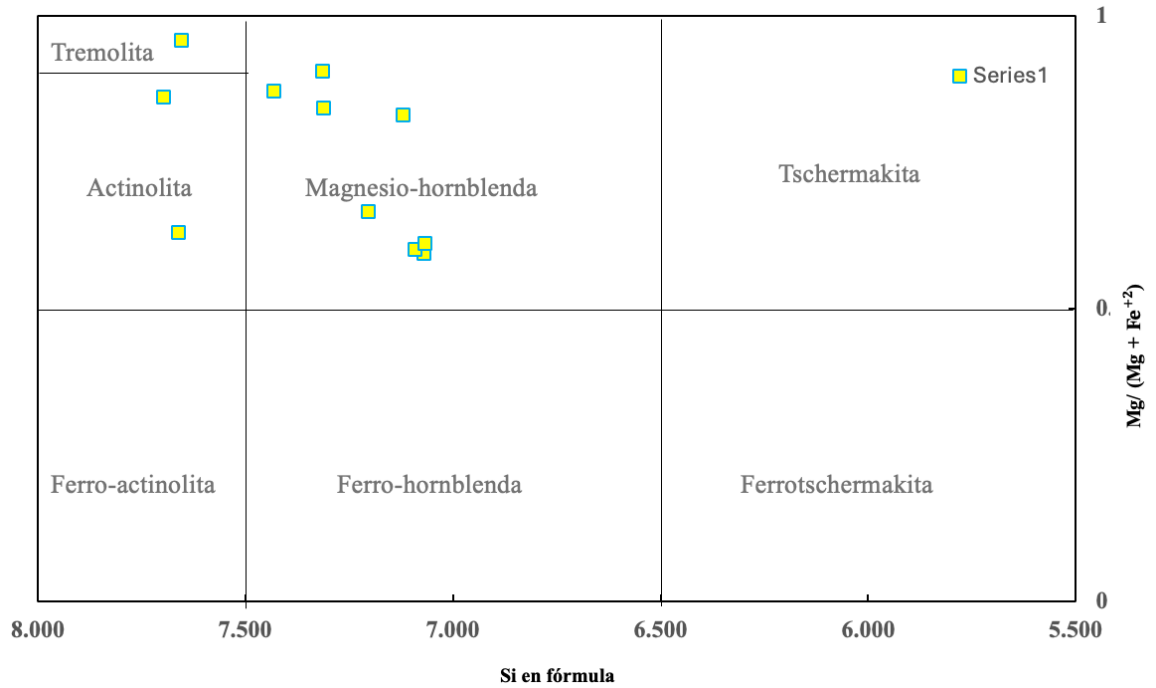


Figura 42. Diagrama composición de anfíboles cálcicos. Miembros son definidos por el número de átomos en los sitios cristalográficos A, B, C, T, -OH. Composición y grupo de muestras analizadas (grupo 1, cuadrado) están indicados en el diagrama. Modificado de Leake *et al.* (1997).

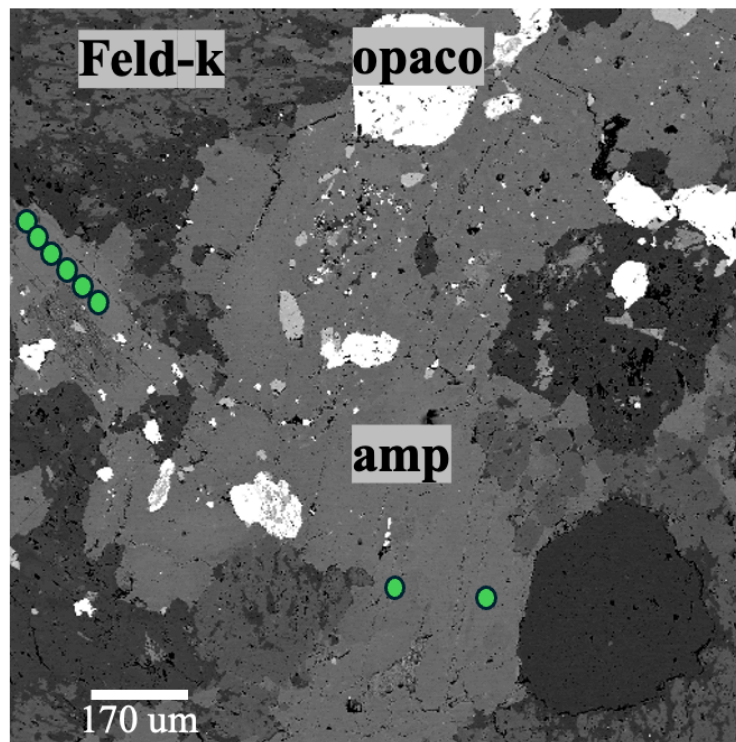


Figura 43. Fotomicrografía SEM con puntos de muestreo (círculos verdes) para análisis composicional de anfíboles.

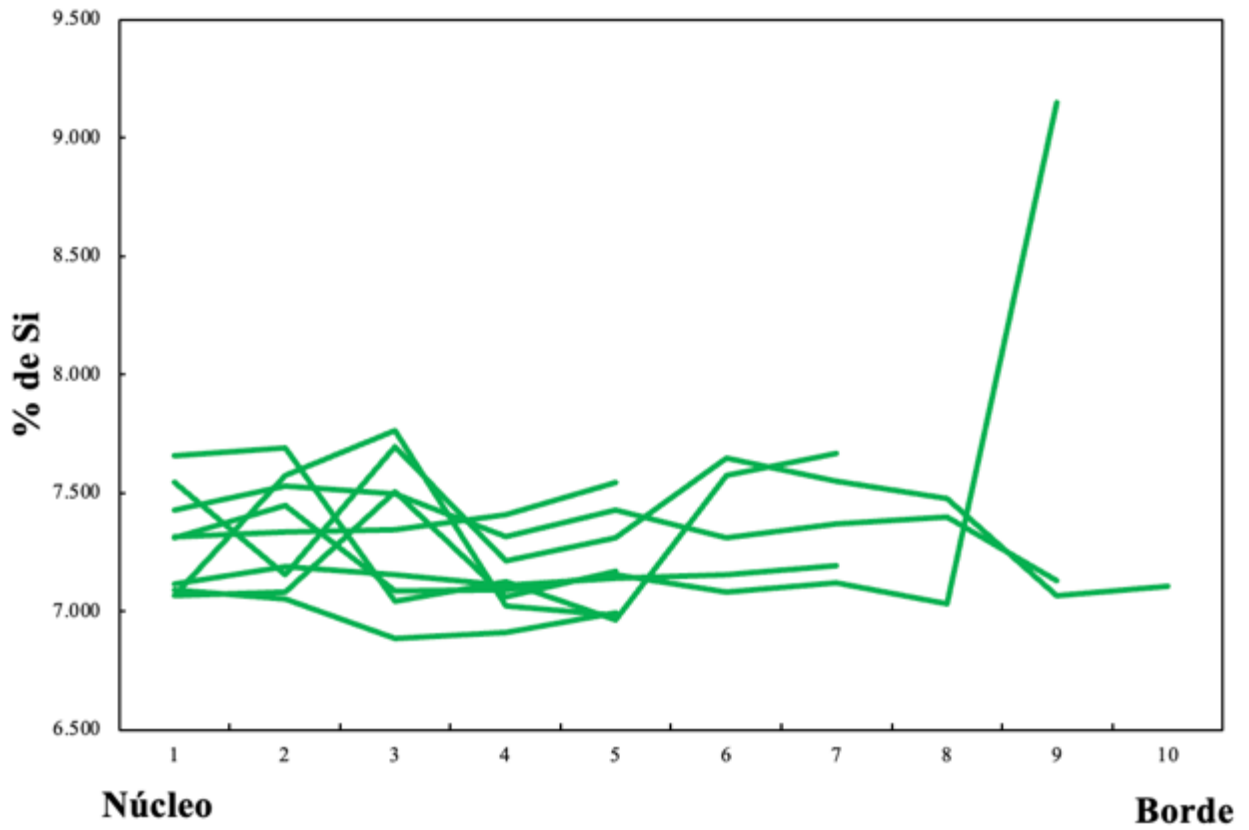


Figura 44. Variación núcleo-borde de % de Si en cristales de anfíboles grupo 1.

Capítulo 8: Discusión

En el siguiente capítulo se aplican diversos termobarómetros para determinar las condiciones intensivas en que estos cuerpos graníticos cristalizaron y se emplazaron, luego se interpretan las texturas intra- e inter-cristalinas para determinar una historia de formación que sea consistente con los datos termobarométricos. Finalmente, se evalúa el origen de los líticos graníticos considerando tres opciones: vestigios del *mush* silíceo, autolíticos de la cámara magmática, o cuerpos intrusivos menores formados previamente.

8.1 Termobarometría

Los resultados de la termobarometría son organizados según el mineral involucrado. Esta es utilizada para determinar las condiciones de almacenamiento (P - T - H_2O - fO_2) del magma gracias a la formación de anfíboles junto a feldespatos. Para el cálculo del contenido de agua se utiliza el higrómetro en anfíboles según Ridolfi *et al.* (2010) y en plagioclasa-vidrio según Waters & Lange (2015). Para este último, se utiliza la composición de vidrio de *rln* y *rdm* (Anexo 4C) según Contreras *et al.* (2022), asumiendo que los bordes de los fenocristales de plagioclasa y la composición de vidrio están en equilibrio. Para detalles de los cálculos, ver el Material Suplementario.

8.1.1 Anfíboles

Se aplicaron métodos termobarométricos en 11 pares de cristales núcleo-borde en anfíboles presentes en el grupo 1 (Tabla 8). El contenido de SiO_2 del fundido que coexiste con esta fase mineral en las muestras (Putirka, 2016) indica que las condiciones de formación de los cristales de hornblenda (#Mg de ~75%, propio de hornblendas magmáticas) se dan en magmas de composición riolítica (entre 70,0 a $77,7 \pm 3,6$ wt% SiO_2). Rangos de temperatura y presión estimados para anfíboles formados en estos magmas riolíticos indican temperaturas de $825 - 712 \pm 30$ °C y $0,03 - 1,2 \pm 3$ [kbar], respectivamente. Contenido de agua y fugacidad de oxígeno son estimados usando ecuaciones de Ridolfi *et al.* (2010) con valores de $2,4 - 7,29 \pm 0,4$ %wt. H_2O y $0,51 - 3,18 \pm 0,4$ ΔNNO , respectivamente.

Presión y temperatura disminuyen con el contenido de SiO_2 . Mientras que, la fugacidad de oxígeno y el contenido de agua están negativamente correlacionados.

El termómetro de Holland & Blundy (1994) fue aplicado en 2 pares de hornblenda-plagioclasa con rangos de temperatura entre $851 - 725 \pm 40$ °C. Siendo mayor que la temperatura calculada usando solamente anfíbol.

La presencia de anfíboles en el grupo 1 indica que este grupo es anterior (Serie de Bowen) al grupo 2, el cual no presenta esta fase mineral.

Tabla 8. Valores de termobarometría para anfíboles mediante geotermobarómetro de Putirka (2016) y Ridolfi *et al.* (2010).

	SiO ₂ [%wt.]	T[°C]	<i>f</i> O ₂	H ₂ O [%wt.]	Presión [kbar]
Máximo	77,74	825,69	3,18	7,29	1,22
Mínimo	70,01	712,41	0,51	2,04	0,03
Promedio	74,86	765,79	1,83	3,12	0,48

8.1.2 Feldespato

El termobarómetro de Putirka (2016) fue utilizado en cristales de feldespato-vidrio y plagioclasa- vidrio. Rango de temperaturas de bordes estimados en feldespato potásico (Tabla 9) indican temperaturas de formación levemente mayores en el grupo 1 (rango de 708,3 – 861,3 y promedio de 811,4 ± 30 °C) que en el grupo 2 (rango de 734,6 – 853,8 y promedio de 807,5 ± 30°C). Temperaturas de esta fase mineral en el grupo 1 indica una cristalización simultánea con cristales de anfíboles. En este sentido, rango de temperatura de bordes estimados en plagioclasa (Tabla 10) indican temperaturas de formación mayores en el grupo 1 (rango de 754,9 – 808,1 y promedio de 771,5 ± 30 °C) que en el grupo 2 (rango de 755,06 – 794,53 y promedio de 760,24 ± 30 °C).

Los contenidos de agua estimados según el higrómetro de Waters & Lange (2015) (Tabla 11), indican %wt. menores en el grupo 1 (rango de 3,73 – 6,04 ± 0,35 %wt. H₂O y promedio de 5,64 ± 0,35 %wt. H₂O usando composiciones de vidrio de *rln* ; rango de 3,06 – 5,74 ± 0,35 %wt. H₂O y promedio de 4,98 ± 0,35 %wt. H₂O, usando composiciones de vidrio de *rle*) que el grupo 2 (rango de 5,69 – 6,37 ± 0,35 %wt. H₂O y promedio de 6,06 ± 0,35 %wt. H₂O, usando composiciones de vidrio de *rln*; rango de 5,02 -5,7 ± 0,35 %wt. H₂O y promedio de 5,4± 0,35 %wt. H₂O, usando composiciones de vidrio de *rle*).

La presión es calculada mediante el termobarómetro de Gualda & Ghiorso (2012) en plagioclasa, con valores menores a 1,2 [kbar] en ambos grupos de estudio (presión de saturación de cuarzo en riolitas de LdM < 2 [kbar]; Contreras *et al.*, 2022 y Klug *et al.*, 2020).

Los datos termobarométricos anteriormente expuestos, señalan que en el grupo 1 existe una mezcla de fenocristales, masa fundamental y líquido intersticial con rangos de An_{30-0.6}, similares a composición de magmas riodacíticos a riolíticos (Contreras *et al.*, 2022). En cambio, los contenidos de anortita más acotados en el grupo 2 (An₂₀₋₅), permiten asociarlos a magmas con composición riolítica (Contreras *et al.*, 2022). Esta variación en el contenido de anortita junto a los datos de temperatura en plagioclasas y feldespatos potásicos para ambos grupos (Fig. 45), señalan una trayectoria de formación más larga en el grupo 1 que en el grupo 2. Esta historia magmática se corrobora con datos de %wt. de SiO₂ donde el grupo 1 presenta mayor concentración de SiO₂ que el grupo 2. Este mayor porcentaje de sílice en el grupo 1, viene dada por la cristalización previa de

las fases minerales en un magma parental menos evolucionado (modelo transcristal de LdM, propuesto por Hildreth *et al.*, 2010), dejando el líquido residual enriquecido en sílice. Por otro lado, el ligeramente menor porcentaje de sílice presente en el grupo 2 indica que el líquido residual se encuentra menos enriquecido en sílice, como resultado de la cristalización previa de plagioclasa sódica (grupo 1). Este fenómeno es corroborado por los valores inferiores de temperatura en el grupo 2, obtenidos a través del análisis termobarométrico.

Las temperaturas medidas en las plagioclasas pueden ser superiores a las obtenidas para los anfíboles (Fig. 46), lo que sugiere que una fracción de las plagioclasas del grupo 1, corresponderían a antecristales. Estos últimos presentan contenidos de An >50, asociado a temperaturas entre 890-940 °C, presiones de ~3[kbar] y contenidos de SiO₂ entre 64-67% wt, los cuales son consistentes con una cristalización previa de la plagioclasa en magmas intermedios, siendo incorporada, luego, en fundidos riolíticos ricos en sílice (Contreras *et al.*, 2022).

Tabla 9. Valores de temperatura máximo, mínimo y promedio de feldspatos potásicos mediante geotermobarómetro feldespato-vidrio de Putirka (2008).

	Grupo 1		Grupo 2	
	Borde	Nucleo	Borde	Nucleo
T[°C]	861,27	867,25	853,83	838,44
T[°C]	708,27	683,68	734,62	735,12
T[°C]	811,44	761,69	807,51	786,28

Tabla 10. Valores de temperatura máximo, mínimo y promedio de plagioclasas mediante geotermobarómetro plagioclasa-vidrio de Putirka (2008).

	Grupo 1		Grupo 2	
	Borde	Nucleo	Borde	Nucleo
T[°C]	808,09	772,39	767,54	794,53
T[°C]	754,97	753,71	755,06	755,30
T[°C]	771,50	762,68	760,24	763,77

Tabla 11. Valores de composición de agua máximo, mínimo y promedio utilizando plagioclasas mediante higrómetro de Waters & Lange (2015).

	<i>rln</i>		<i>rdm</i>	
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 1	Grupo 2
[%wt.]	6,40	6,37	5,74	5,70
[%wt.]	3,73	5,69	3,06	5,02
[%wt.]	5,64	6,06	4,98	5,40

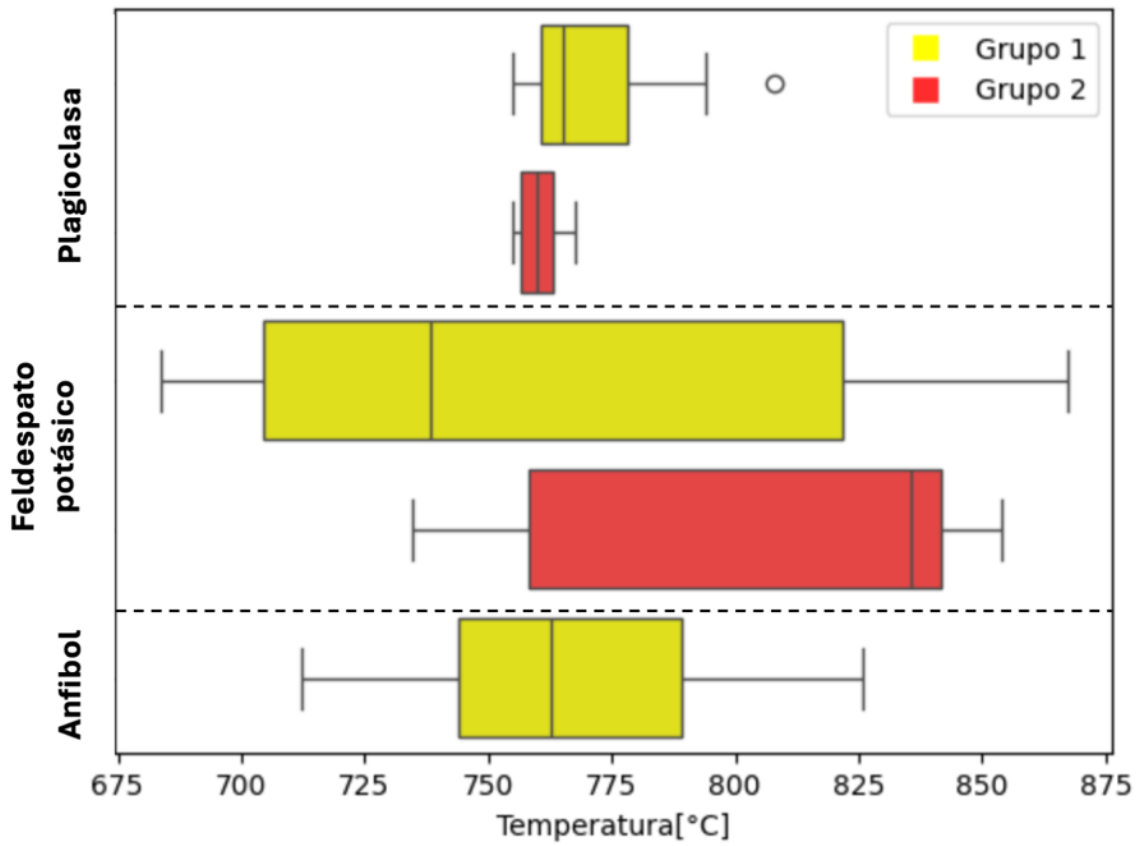


Figura 45. Datos de temperatura usando borde de cristales de plagioclasa y pares núcleo-borde en anfíboles mediante geotermobarómetro de Putirka (2008) para plagioclasa-vidrio, feldespato-vidrio y Putirka (2016) para anfíbol.

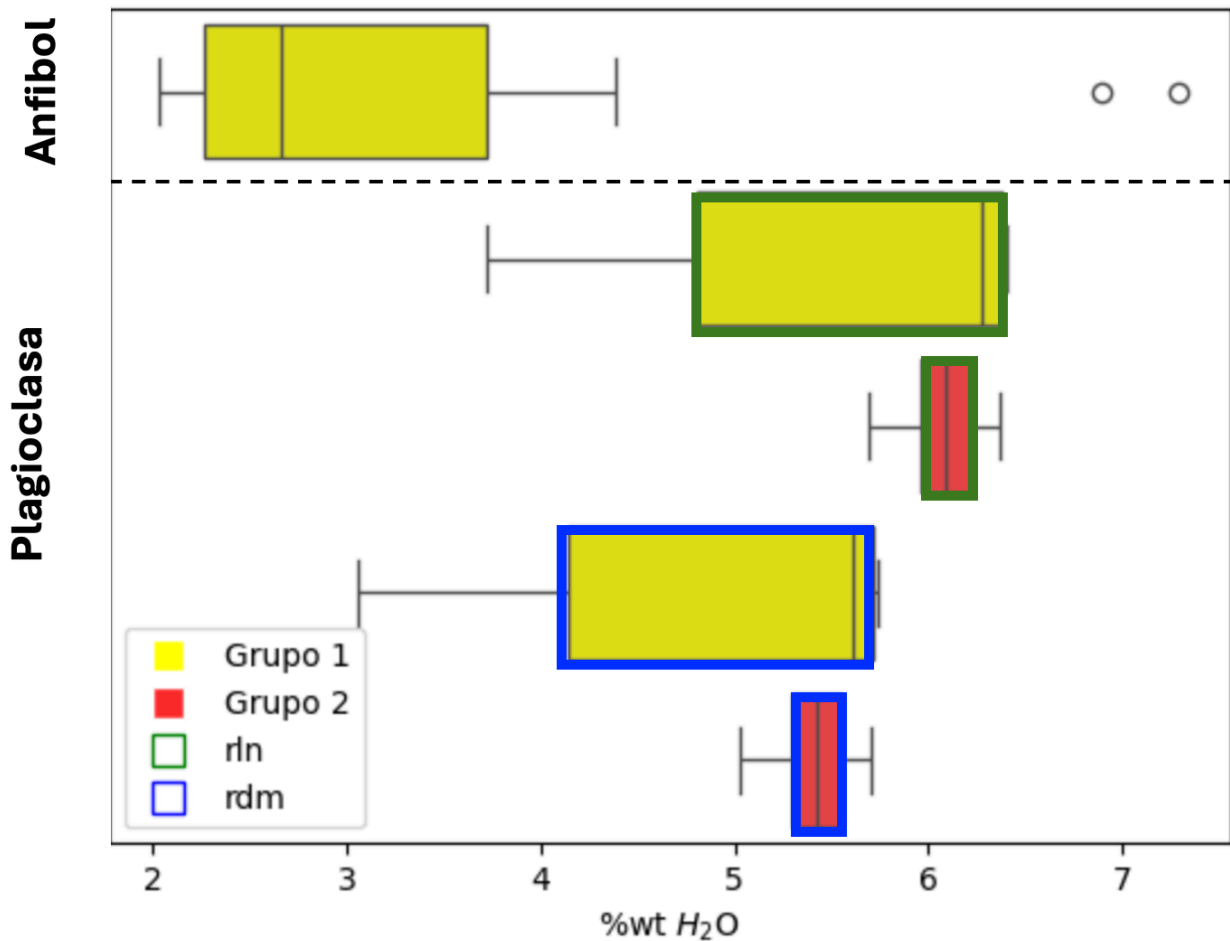


Figura 46. Datos de contenido de agua utilizando higrómetro de Ridolfi *et al.* (2010) en anfíboles del grupo 1 e higrómetro de Waters & Lange (2015) en plagioclasas del grupo 1 y 2.

Tabla 12. Resumen de valores composicionales y termobarométricos promedios de grupos de estudio de *rdm*.

Grupo	1	2
%wt. SiO ₂	73,62	72,75
An	36-1	65-6
%Microlito/Fenocristales	78/22	32/68
Temperatura[°C]		
Plagioclasa-vidrio	771,5	760,2
Feldespato potásico-vidrio	811,4	807,5
Anfíboles	765,79	-
Presión[kbar]		
Plagioclasa-vidrio	<1,2	<1,2
Anfíboles	0,48	-
%wt H₂O		
Plagioclasa-vidrio	5,64	6,06
Anfíboles	3,12	-

8.2 Texturas ígneas

Los datos termobarométricos anteriormente expuestos, para ambos grupos de estudio, muestran temperaturas y presiones de emplazamiento entre 760° a 810°C y 0,03-1,2 [kbar], respectivamente. De acuerdo con los modelamientos termodinámicos realizados para composiciones silíceas del Complejo Volcánico Laguna del Maule (Andersen *et al.*, 2018; Contreras *et al.*, 2022), sugieren que los líticos graníticos de *rdm* se formaron sobre el *mush* silíceo en la zona donde se alojan las riolitas efímeramente previo a alcanzar la superficie, o en la zona superior del *mush* silíceo correspondiente a la esponja rígida de alta cristalinidad. La textura inequigranular e inequigranular porfídica (Fig. 27) que se observa en ambos grupos de estudio es consistente con una historia de cristalización con al menos dos etapas, una temprana comparable con la formación de los fenocristales de riodacitas y riolitas, el ascenso a presiones <1,2 kbar, y una segunda etapa que da origen a los microfenocristales con características similares a cuerpos hipoabisales (Grogan & Reavy, 2002).

En detalle, la primera población de cristales (fenocristales) se asocian a un origen más profundo y riodacítico del magma el cual se evidencia con el contenido de anortita (An_{20} , Contreras *et al.* 2022) presente en cristales de plagioclasa y los tamaños mayores a 1 [mm] de estos cristales. Por otro lado, a medida que el magma asciende a profundidades menores de 1,2 [kbar], se evidencia la segunda población de cristales (microlitos), la cual presenta tamaños menores a 1[mm]. Esta textura, en donde se observa tanto fenocristales como microlitos en una misma masa fundamental con presiones de emplazamiento someras menores a 1,2 [kbar], lo cual se comprueba con la textura mesopértítica presente en feldespatos potásicos en ambos grupos de estudio, muestra condiciones similares a pórfidos hipoabisales (Cooke *et al.*, 2014 y Gill, 2010). Estas condiciones se ven reflejadas en la zonación normal presente en los núcleos de fenocristales de plagioclasa (Fig.32). En estos, existe una disminución del contenido de anortita (Fig. 38), debido a una velocidad de enfriamiento más rápida, la que limita las condiciones de equilibrio necesarias para una composición uniforme en el cristal debido a los cambios en la temperatura y composición del magma durante al ascenso. Al contrario de rocas plutónicas más profundas en donde un enfriamiento lento, logra una homogenización en la composición de los cristales (Bennett *et al.*, 2019; Shcherbakov *et al.*, 2014 y Ustunisik *et al.*, 2014).

Estas condiciones similares a cuerpos porfídicos inequigranulares son similares a pórfidos de Chile central, en donde los yacimientos que destacan, debido a su cercanía con el complejo volcánico, son El Teniente y Don Manuel.

En cuanto a las rocas expuestas en El Teniente (Fig. 47a), estas presentan tendencias tholeíticas a calco- alcalinas, firmas isotópicas de $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ (0,704 – 0,706) y mineralogía similar a líticos graníticos del grupo 1 debido a la presencia de hornblenda y dos feldespatos. Sin embargo, estas rocas presentan una composición riodacítica, con menores porcentajes de sílice que los granitos de *rdm* (~50 – 68 %wt. de SiO_2) y características metaluminosas, lo cual difiere con los valores obtenidos para el grupo 1 (Canell *et al.*, 2005; Camus *et al.*, 2001).

Las rocas presentes en Don Manuel (DMIC, ~3,6 – 4 Ma, Gilmer *et al.*, 2018, Fig. 47b) exhiben características químicas y petrológicas similares a granitos del grupo 1 debido a la presencia de cristales de anfíbola cloritizados (Fig.48). Estas rocas presentan tendencias calco-alcalinas con características meta- y peraluminosas ($^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ entre 0,7042 – 0,7045) y composición félsica (60 – 75 %wt. de SiO_2). En cuanto a las fases minerales, los granitos presentan plagioclasas albíticas con zonación normal y An_{28-6} (Gilmer *et al.*, 2017); anfíboles ricos en calcio y magnesio, predominando las magnesio-hornblendas; biotitas cloritizadas (hidrotermales) y óxidos de Fe y Fe – Ti, en particular magnetita e ilmenita (Gilmer *et al.*, 2018). En cuanto al porcentaje de agua, estas rocas presentan entre un 5 a un 10 %wt. de H_2O . Temperaturas y presiones de emplazamientos mediante termobarómetro de anfíbol – plagioclasa de Holland & Blundy (1994) son similares a grupo 1 con valores entre 700 – 800°C y ~ 1,2 [kbar] (Gilmer *et al.*, 2018).

Con base en las características señaladas tanto de El Teniente como de DMIC así como a las texturas ígneas y fabricas presentes en las rocas analizadas (Fig.47), los líticos graníticos de *rdm*, en particular, los pertenecientes al grupo 1, son comparables con rocas félsicas encontradas en Don Manuel (Tabla 13 y 14), lo que sugiere una historia de cristalización comparable con la de pórfidos hipoabisales. A diferencia de las rocas presentes en DMIC que presentan mineralización supérgena (sulfuros) evidenciada por venas y fracturas mineralizadas, los cuerpos intrusivos de Laguna del Maule asociados con los líticos graníticos no fueron afectados por recargas de magmas máficos y/o de volátiles ricos en metales (Chiaradia, 2022). Producto de lo anterior y a la edad más joven de *rdm* (~2,3 Ma; Contreras *et al.*, 2022), los granitos de Laguna del Maule podrían ser considerados como porfidos infértiles que están en una etapa de premineralización consistente con la cristalización de ilmenita, magnetita y titanita. Esta etapa de premineralización es comparable más específicamente con la formación de las cuarzo-monzonitas de DMIC, la cual presenta una etapa preliminar de alteración hidrotermal con el intercrecimiento de clorita en cristales de biotita (Gilmer *et al.*, 2017).

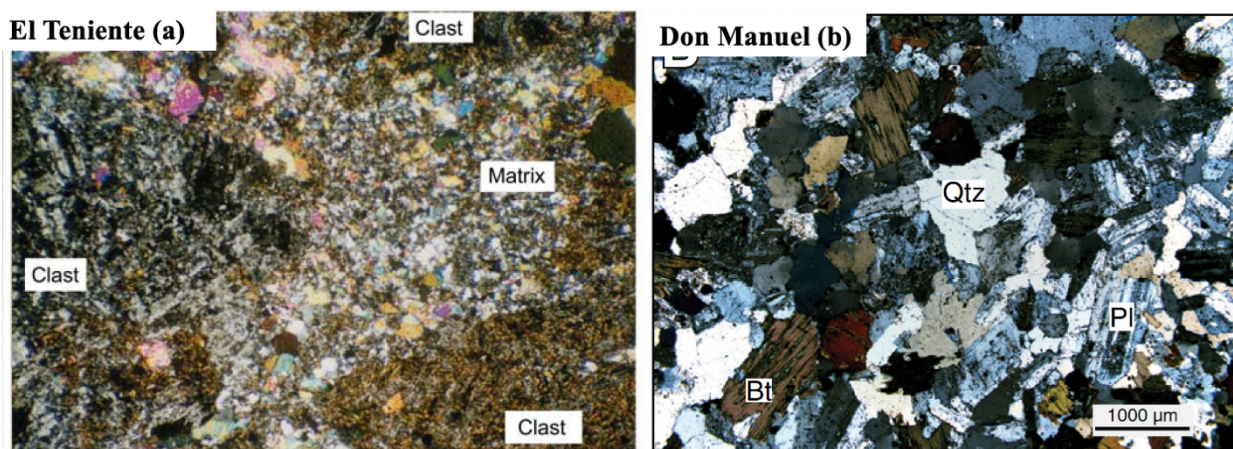


Figura 47. Fotomicrografías rocas ígneas. (a) Mineralogía de rocas ígneas a nicoles cruzados en depósito El Teniente (Stewes *et al.* 2005). (b) Mineralogía de roca ígneas a nicoles cruzados en depósito Don Manuel (Gilmer *et al.*, 2017).

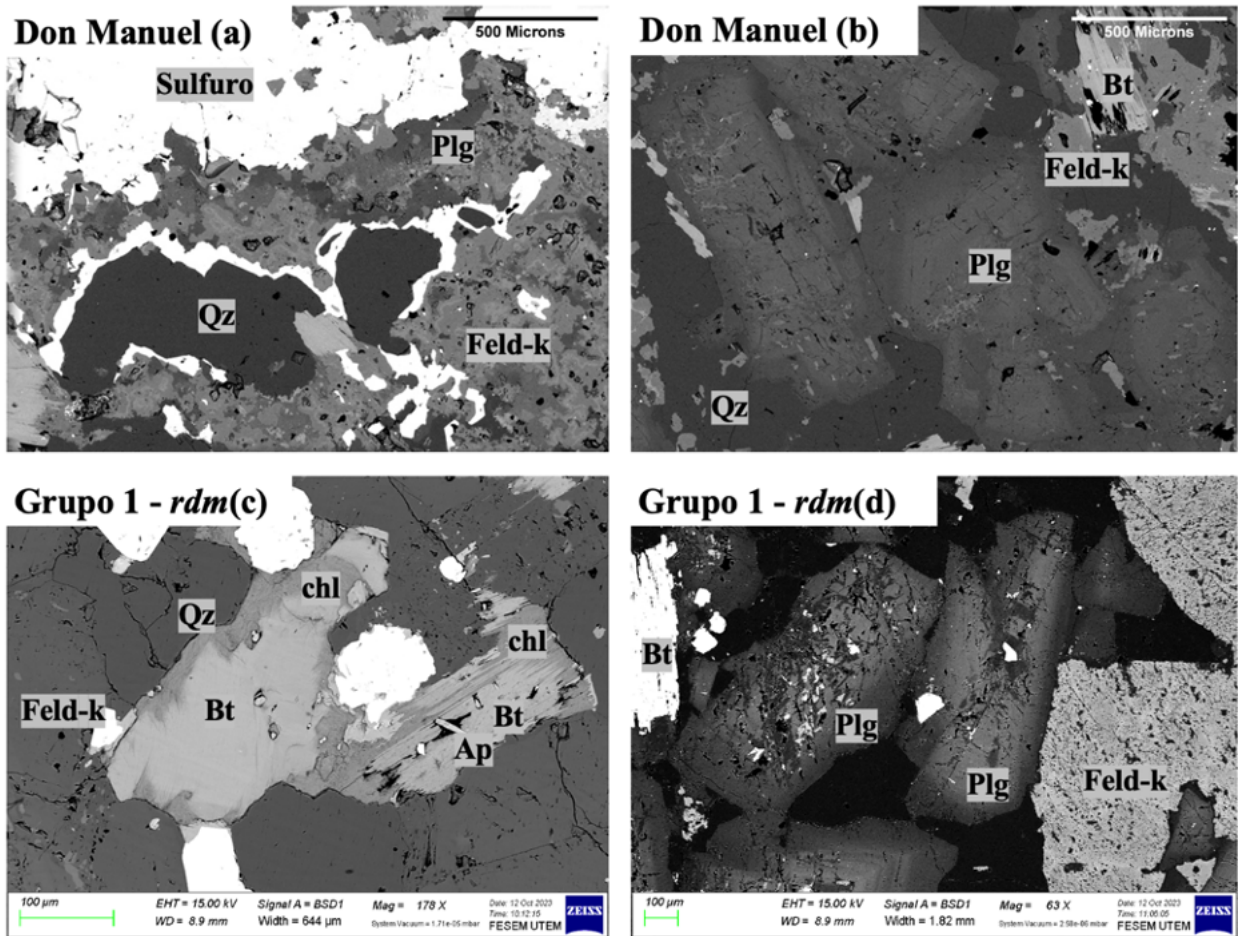


Figura 48. Fotomicrografía SEM rocas félsicas. (a) y (b) Fotomicrografías de rocas félsicas en DMIC (obtenidas de Hannah Ellis). (c) y (d) Fotomicrografía de rocas pertenecientes a grupo 1 en *rdm*.

Tabla 13. Comparación entre pórfidos fértiles, El Teniente y Don Manuel con los grupos de estudio de *rdm*.

	El Teniente	Don Manuel	Grupo 1	Grupo 2
Sr/Sr	0,704-0,706	0,7042-0,7045	0,7043	0,7044
%wt. SiO ₂	50-68	60-75	73,62	72,75
ASI	Metaluminoso	Meta- y peraluminoso	Peraluminoso	Peraluminoso
Mineralogía				
Cuarzo	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Feldespato potásico	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Plagioclasa	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Anfibol	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Clorita	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Tabla 14. Comparación de pórfido fértil Don Manuel con grupos de estudio de *rdm*.

	Don Manuel	Grupo 1	Grupo 2
Mineralogía			
Plagioclasa(An)	28-6	36-1	20-6
Anfiboles	Ricos en Ca y Mg	Cálcicos	-
Biotita	Cloritizadas	Cloritizadas	-
Óxidos de Fe-Ti	☑	☑	☑
% wt H ₂ O	5-10	5,64	6,06
Temperatura [°C]	700-800	771,5	760,2
Presión [kbar]	~1,2	<1,2	<1,2

Finalmente, la cristalización localizada de microcristales en bandas o vetillas determina una tercera etapa (Fig. 29 y 30), en donde el fundido silicatado intersticial fluye a través de la red de feno- y microfeno-cristales, alcanza el subsolidus, y cristaliza antes de enfriarse como vidrio rico en sílice (Winter, 2001). En consecuencia, los microcristales están asociados a relictos del flujo del fundido silicatado a través del cuerpo ígneo emplazado a baja profundidad. Por otro lado, la presencia de microcristales asociados a poros intergranulares (Fig. 28e-f y 29d), evidencia que los magmas supersaturados en volátiles (particularmente en agua) generan una presión suficiente en el fundido para separar o romper la red conformada por fenocristales y microcristales (1° y 2° etapa). Este proceso es consistente con la evidencia de que las riolitas, con un contenido estimado de 4,6-6,2 %wt. de H₂O (Contreras *et al.*, 2022), presentan condiciones de sobresaturación en volátiles a presiones bajas (~1,2 [kbar] y 5-6 %wt. de H₂O). Esto también es consistente con las texturas gráficas (Fig.31) y consertal (Fig. 33), observada en los líticos graníticos. Por un lado, los bordes irregulares de los cristales de cuarzo (textura consertal), indica el crecimiento cristalino en equilibrio y difusión entre cristales debido a la saturación de agua que presenta el fundido (Bachmann & Bergantz, 2004; Philpotts & Ague, 2009; Cashman & Blundy, 2013; Holness, 2018). Por otro lado, la textura gráfica, además de evidenciar las condiciones de supersaturación de agua, ratifica la existencia de un líquido residual el cual se extrajo en la última etapa de cristalización (intercrecimiento de cuarzo; Barker, 1970 y Cox *et al.*, 1979).

8.3 Origen de los líticos graníticos

En esta sección, se analizarán los antecedentes previamente expuestos para determinar cuáles de ellos son consistentes o no, con la interpretación del origen de los líticos graníticos de *rdm*, es decir, si corresponden a fragmentos del *mush*, autolíticos, o cuerpos ígneos previamente emplazados.

Los líticos graníticos de *rdm* exponen texturas inequigranulares e inequigranulares porfídicas con presiones de emplazamiento someras menores a 1,2 [kbar] y texturas mesopertíticas, habituales en ambientes someros. Estas características, además del análisis y comparación con pórfidos fértiles en Chile central, permite determinar que estos líticos graníticos corresponden a granitos porfídicos

hipoabisales. Lo anteriormente expuesto, junto a la presencia de minerales máficos hidratados como biotita y anfíboles son características típicas de autolíticos o autoxenolitos (Fershtater *et al.*, 1977). Además, se espera que los autolíticos, cristalizados en los bordes de las cámaras magmáticas, tengan composiciones menos silícicas que los fundidos silicatados remanentes, comparables con la composición del magma parental. Los líticos graníticos de *rdm* presentan contenidos de sílice mayor al 72%wt., temperaturas de emplazamiento entre 700°- 800°C y plagioclasas con contenido de An entre 3-30. Características que, aunque menos félsicas que las riolitas postglaciales tempranas (75-77 %wt. SiO₂), son más evolucionados que el magma parental de las riolitas (68 %wt. SiO₂; Contreras *et al.*, 2022). Debido a estas características, particularmente plagioclasas sódicas y composiciones félsicas de los líticos graníticos de *rdm*, estos podrían corresponder a autolíticos formados por magmas formados en el *mush*, fraccionados, y emplazados a una presión <1,2 kbar. La muestra *rdm*-N-02 (cuarzo-monzonita) presenta composiciones menos félsicas con ~62%wt. de SiO₂ y texturas de desequilibrio como zonación de plagioclasa, lo que podría corresponder a las características de autolíticos formados en las condiciones de riocacitas (Andersen *et al.*, 2017).

Los granitos de Laguna del Maule presentan una mineralogía primaria de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, biotita y ± anfíboles, emplazados a presiones menores a 1,2 [kbar] y temperaturas entre 760°-800°C. Según estas características, los líticos graníticos de *rdm* son similares a cuerpos ígneos previos localizados en el basamento y cercanías del Complejo Volcánico Laguna del Maule. En este sentido, destacan las rocas plutónicas del Cretácico, en particular la Granodiorita de los Indios con presiones de emplazamiento de 2-3[kbar], temperaturas de 750°-850°C, presencia de plagioclasa (An₂₈₋₆₀), y mineralogía comparable con los granitos de Laguna del Maule. Además, de texturas mesoperfíticas y gráficas en feldespatos (presentes en grupos de estudios, Fig.30 y 31). Sin embargo, los líticos graníticos presentan composiciones de sílice superiores a las de la Granodiorita de los Indios (54-68 %wt. SiO₂) y plagioclasas con contenido de anortita inferior al 50%. Estas evidencias sugieren, que los líticos graníticos de *rdm* no pueden ser clasificados como rocas accidentales provenientes de un cuerpo ígneo similar a la granodiorita. Por otro lado, las rocas plutónicas del Terciario presentan presiones de emplazamiento de 1-2,5 [kbar], temperaturas de 700°-800°C y presencia de plagioclasa con contenidos de An entre 20-34, y mineralogía similar a los grupos de estudio. Además, de texturas porfídicas y zonación en plagioclasas (presente en líticos graníticos, Fig.27 y 32). Sin embargo, debido a su contenido menor de sílice (<68 %wt. SiO₂), los líticos graníticos de *rdm* no pueden ser clasificados como rocas accidentales provenientes de cuerpos plutónicos del Terciario. Por último, los granitos erráticos presentes en LdM presentan una mineralogía similar a líticos graníticos de Laguna del Maule. Sin embargo, presentan composiciones inferiores de sílice (60-65 %wt. SiO₂), mayores temperaturas y presiones de emplazamiento. Es por esto, que las probabilidades de que los líticos graníticos de *rdm* sean piroclastos accidentales provenientes de cuerpos plutónicos erráticos son bajas (Dungan *et al.*, 2001; Hildreth *et al.*, 2010; Contreras *et al.*, 2022).

La presencia de texturas gráficas y porfídicas, sugieren una evolución magmática más compleja, caracterizada por la extracción de fundido residual en granitos altamente cristalinos y silícicos. En

este contexto, los líticos graníticos presentan tres etapas de cristalización: fenocristales a nivel del *mush* silíceo, microfenocristales al nivel del emplazamiento de riolitas (Fig.27) y localizaciones de microcristales en vetillas y rellenando poros intergranulares (3° población, Fig.28 y 29). Esto indica que los cristales se formaron gracias al enfriamiento del fundido intersticial, cristalizando en microlitos de cuarzo en vez de formar vidrio remanente. Además, las localizaciones asociadas a porosidad evidencian una sobresaturación del fluido, que se abre espacio a través de la red cristalina previamente formada. En consecuencia, los microcristales se desarrollan en los poros intergranulares, lo que demuestra que el líquido remanente intersticial está directamente vinculado a un fundido sobresaturado en volátiles. Esta extracción de fundido residual se evidencia, también, en las texturas gráficas presentes en ambos grupos de estudio (Fig.31). Estas texturas permiten determinar que existe una extracción de fundido residual en granitos altamente cristalinos (>90% de cristales) y silíceos (~72 %wt. SiO₂) emplazados en profundidades someras (profundidad del *mush* cristalino entre 2-8[km]). Esta historia evolutiva es consistente con la formación del *mush* cristalino emplazado debajo de LdM. Además, modelos geológicos determinan que plagioclasas con contenidos de An₂₀, se forman gracias al continuo enfriamiento hasta 750°C de magma riodacítico, originando reservorios magmáticos ricos en cristales con fundido intersticial de composiciones félsicas (72-78 %wt. SiO₂, Contreras *et al.*, 2022). En este sentido, los líticos graníticos serían el fundido intersticial debido a las composiciones félsicas (~72 %wt. SiO₂) y temperaturas entre 760°-800°C que presenta. Además, presentan contenidos de sílice superiores a los del magma parental (~68 %wt. SiO₂) lo que sugiere una trayectoria evolutiva en la que estos granitos, altamente enriquecidos en sílice, podrían corresponder al fundido riolítico extraído de este magma riodacítico.

Tabla 15. Resumen de evidencias que comprueban el origen de los líticos graníticos de *rdm*.

	Líticos graníticos <i>rdm</i>	Autolíticos	Cuerpos ígneos previos	Testimonios <i>mush</i>
%wt de SiO ₂	~72	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Temperatura [°C]	760°-800	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Presión[kbar]	<1,2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
% de An	<30	>50	20-60	-
Pórfidos				
hipoabisales	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Texturas ígneas				
Mesopertítica	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gráfica	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Inequigranular	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Zonación	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vetillas/poros intergranulares	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Capítulo 9: Conclusión

En el presente trabajo se ha determinado el origen de líticos granitoides de la Ignimbrita Laguna del Maule, a través de características petrográficas, geoquímicas y texturales de las muestras obtenidas en este depósito volcánico. Para esto, se utilizaron diferentes metodologías que permitieron identificar, por un lado, los distintos procesos que gobernaron la formación de estos granitos hipoabisales. Y, por otro lado, estimar sus condiciones intensivas.

Estas características determinadas, junto con la comparación con las distintas riolitas postglaciales en LdM (*rdm*, *rle* y *rln*), permite evidenciar que el *mush* riódacítico que alimentó a *rdm* es la primera y más profunda de las tres etapas de formación. Este *mush* se encuentra a 1,5-2,5 kbar y es afectado por inyecciones de magmas máficos es intermedios desde niveles más profundos. A través de distintos episodios de cristalización fraccionada, el fundido silicatado intersticial experimenta segregación y ascenso, para acumularse formando lentes riolíticos más someros (<10% de cristales, fundido extraíble del *mush*). En la mayoría de los casos, los lentes se enfrían bajo superficie, formando microfenocristales. El líquido intersticial sobresaturado en volátiles se evidencia por la formación de bandas y vetillas formada por cristales y poros de unas decenas de micrones. Estos procesos evidencian que el Complejo Volcánico Laguna del Maule funciona como un sistema magmático transcortical (TMCS), integrando magmas desde diferentes niveles de la corteza (Cordell *et al.*, 2020, Klug *et al.*, 2021; Blundy *et al.*, 2021; Contreras *et al.*, 2022)

En este contexto, yacimientos de pórfidos cupríferos, como Don Manuel, y sistemas geotermales magmáticos como Kakkonda en Japón, se comportan como un TMCS al igual que LdM. En ambos casos los granitos presentes en estos sistemas geológicos exhiben una alta porosidad y se encuentra saturados en volátiles, particularmente en agua. En el caso de Don Manuel, se identifican etapas de premineralización (cloritización de biotita) e interacción de aguas magmáticas con aguas meteóricas en reservorios hidrotermales someros. Por otro lado, el sistema geotermal de Kakkonda, representa un ejemplo de sistema magmático-hidrotermal sin actividad volcánica reciente, donde las rocas félsicas se emplazan a profundidades someras tras evolucionar desde un magma félsico el cual comenzó a cristalizar a los ~850°C (Doi *et al.*, 1998; Sasaki *et al.*, 2003).

Esta comparación con otros sistemas magmáticos como Don Manuel (3.6-4 Ma; Gilmer *et al.*, 2018) y Kakkonda (0.9-2.2 Ma; Doi *et al.*, 1998), no solo resalta las similitudes en sus procesos evolutivos, sino que permite determinar que LdM es un sistema magmático joven que aún no comienza a mineralizarse o a formar un campo geotermal. Características como la cloritización de las biotitas, alto porcentaje de sílice (~72%wt. de SiO₂), emplazamiento somero (<1,2 [kbar]), temperaturas cercanas a 750°C y sobresaturación en agua observadas en los líticos graníticos; representan parámetros iniciales fundamentales en la evolución y diferenciación magmática. En este sentido, se espera que, en etapas finales, el sistema volcánico LdM, evolucione a condiciones similares a las observadas en Don Manuel o Kakkonda (Blundy *et al.*, 2021).

Bibliografía

Andersen, N., Singer, B., Jicha, B., Beard, B., Johnson, C., Licciardi, J. (2017) Pleistocene to Holocene Growth of a large upper crust rhyolitic magma reservoir beneath the active

Andersen, N., Singer, B., Costa, F., Fournelle, J., Herrin, J., Fabbro, G. (2018) Petrochronologic perspective on rhyolite volcano unrest at Laguna del Maule, Chile. *Earth and Planetary Science Letters*, No. 493, pages 57-70.

Andersen, N. L., Singer, B. S., & Coble, M. A. (2019). Repeated rhyolite eruption from heterogeneous hot zones embedded within a cool, shallow magma reservoir. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124, 2582–2600. <https://doi.org/10.1029/2018JB016418>

Anderson, J. L.; Barth, A. P.; Wooden, J. L.; Mazdab, F. (2008). Thermometers and Thermobarometers in Granitic Systems. , 69(1), 121–142. doi:10.2138/rmg.2008.69.4

Bachmann, O.; Bergantz, G. (2004) On the origin of crystal-poor rhyolites: Extracted from batholithic crystal mushes. *Journal of Petrology*, Volume 45, No. 8, pages 1565-1582. DOI: 10.1093/petrology/egh019

Bachmann. O. & Bergantz. G. (2004). On the Origen of Crystal-poor Rhyolites: Extracted from Batholithic Crystal Mushes. *Journal of Petrology*, Volumen 45, Issue 8, 1565-1582.

Bachmann, O.; Bergantz, G. (2008) Rhyolites and their source mushes across tectonic settings. *Journal of Petrology*, Volume 49, No. 12, pages 2277-2285. doi:10.1093/petrology/egn068

Bachmann, O.; Bergantz, G. (2008) The magma reservoirs that feed supereruptions. *Elements*, Volume 4, pages 17-21. DOI: 10.2113/GSELEMENTS.4.1.17

Barker, D. (1970) Compositions of granophyre, myrmekite and graphic granite. *Geological Society of America Bulletin*, Volume 81, pages 3339-3350. DOI: 10.1130/0016-7606(1970)81[3339:COGMAG]2.0.CO;2

Bennett, E.; Lissenber, C.; Cashman, K. (2019) The significance of plagioclase textures in mid-ocean ridge basalt (Gakkel Ridge, Arctic Ocean). *Mineralogy and Petrology* 149:49.

Best, M.G (2003) *Igneous and Metamorphic Petrology*. Second edition.

Blundy J, Afanasyev A, Tattitch B, Sparks S, Melnik O, Utkin I, Rust A. 2021 The economic potential of metalliferous sub-volcanic brines. *R. Soc. Open Sci.* 8: 202192

Brown, W & Parsons, I. (1984) The nature of potassium feldspar, exsolution microtextures and development of dislocations as a function of composition in perthitic alkali feldspars. *Mineralogy Petrology*, Volume 86, pages 335-341.

Camus, F.; Dilles, J. (2001) A special issue devoted to porphyry copper deposits of northern Chile. *Society of Economic Geologist*, Volume 96, No. 2.

Cannell, J.; Cooke, D.; Walshe, J.; Stein, H. (2005) Geology, mineralization, alteration and structural evolution of the El Teniente porphyry Cu-Mo deposit. Society of Economic Geologist, Volume 100, pages 979-1003.

Chappell, B.; Bryant, C.; Wyborn, D. (2012) Peraluminous I-type granites. Lithos, Volume 153, pages 142-153.

Cashman, K and Blundy, J. (2013) Petrological cannibalism: the chemical and textural consequences of incremental magma body growth.

Cashman, K.; Sparks, R.; Blundy, J. (2017) Vertically extensive and unstable magmatic systems: A unified view of igneous processes. Science, 355(6331), eaag3055. doi:10.1126/science.aag3055

Contreras-Hidalgo, C (2020) Silicic eruptive transitions of Laguna del Maule. School of Earth Sciences, Bristol University.

Contreras-Hidalgo, C., Cashman, K. V., Rust, A. C., & Cortez, M. (2022). The influence of magma storage and ascent conditions on Laguna del Maule rhyolite eruptions. Journal of Petrology, 63(12)

Cooke D.R., Hollings P., Wilkinson J.J. and Tosdal R.M. (2014) Geochemistry of Porphyry Deposits. In: Holland H.D. and Turekian K.K. (eds.) Treatise on Geochemistry, Second Edition, vol. 13, pp. 357-381. Oxford: Elsevier.

Cooper, K. (2017) What does a magma reservoir look like? The “crystal’s eye” view. Elements, Volume 13, pages 23-28. DOI: 10.2113/gselements.13.1.23

Cooper, K. (2022) What lies beneath Yellowstone? Science, Volume 378, Issue 6623, pages 945-946. DOI: [10.1126/science.ade8435](https://doi.org/10.1126/science.ade8435)

Cordell, D., Unsworth, M. J., Lee, B., Díaz, D., Bennington, N. L., & Thurber, C. H. (2020). Integrating magnetotelluric and seismic images of silicic magma systems: A case study from the Laguna del Maule Volcanic Field, central Chile. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125, e2020JB020459. <https://doi.org/10.1029/2020JB020459>

Cox, K.G., Bell, J.D., Pankhurst, R.J (1979) The interpretation of igneous rocks.

Doi, N., Kato, O., Ikeuchi, K., Komatsu, R., Miyazaki, S., Akaku, K., Uchida, T. (1998) Genesis of the Plutonic-Hydrothermal System around Quaternary Granite in the Kakkonda Geothermal System, Japan. Geothermics, Vo. 27, N° 5/6., 663-690.

Dungan, M., Wulff, A., Thompson, R. (2001) Eruptive Stratigraphy of the Tatara-San Pedro Complex, 36°S, Southern Volcanic Zone, Chilean Andes: Reconstruction Method and Implications for Magmatic Evolution at Long-lived Arc Volcanic Centers. Journal of Petrology, Vo.42, N°3, 555-626.

Ernst, W. G.; Liu, Jun (1998). Experimental phase-equilibrium study of Al- and Ti-contents of calcic amphibole in MORB; a semiquantitative thermobarometer. American Mineralogist, 83(9-10), 952–969. doi:10.2138/am-1998-9-1004 .

Frost, B.R.; Barnes, C.; Collins, W.; Arculus, R.; Ellis, D.; Frost, C. (2001). A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 42(11), 2033–2048.

Garibaldi, N., Tikoff, B., Schaen, A. J., & Singer, B. S. (2018). Interpreting granitic fabrics in terms of rhyolitic melt segregation, accumulation, and escape via tectonic filter pressing in the Huemul pluton, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 8548–8567. <https://doi.org/10.1029/2018JB016282>

Ghiorso, M.; Evans, B. (2008) Thermodynamics of rhombohedral oxide solid solutions and a revision of the Fe-Ti two-oxide geothermobarometer and oxygen barometer. *American Journal of Science*, Volume 308, No. 9. DOI:[10.2475/09.2008.01](https://doi.org/10.2475/09.2008.01)

Gill, R. (2010) *Igneous rocks and processes: a practical guide*.

Gilmer, A.; Sparks, R.; Rust, A.; Tapster, S.; Webb, A.; Barfod, D. (2017) *Geology of the Don Manuel igneous complex, central Chile: Implications for igneous processes in porphyry copper systems*. The Geological Society of America

Gilmer, A.; Sparks, R.; Blundy, J.; Rust, A.; Hauff, F.; Hoernle, K.; Spencer, C.; Tapster, S. (2018) Petrogenesis and assembly of the Don Manuel Igneous Complex, Miocene-Pliocene Porphyry Cooper Belt, Central Chile. *Journal of Petrology*, Volume 59, No.6, pages 1067-1108.

Gilmer, A.K.; Sparks, R.S.J.; Barfod, D.N.; Brugge, E.R.; Parkinson, I.J. Duration of Hydrothermal Alteration and Mineralization of the Don Manuel Porphyry Copper System, Central Chile. *Minerals* 2021, 11, 174. <https://doi.org/10.3390/min11020174>

Greenwood, N.N. and Earnshaw, A. (1998) *Chemistry of the Elements*. 2nd Edition, Butterworth-Heinemann.

Grogan, S & Reavy, R. (2002) Disequilibrium textures in the Leinster Granite Complex, SE Ireland: evidence for acid-acid magma mixing. *Mineralogical Magazine*, Volume 66, pages 929-939

Hildreth, W. (2004) Volcanological perspectives on Long Valley, Mammoth Mountain, and Mono Craters: several contiguous but discrete systems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 136, pages 169-198. doi:10.1016/j.jvolgeores.2004.05.019

Hildreth, W.; Godoy, E.; Fierstein, J.; Singer, B. (2010). Laguna Del Maule Volcanic Field: Eruptive history of a Quaternary basalt-to-rhyolite distributed volcanic field on the Andean range crest in central Chile. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín*, 63: 145 p. Santiago.

Hildreth, W. (2021) Comparative rhyolitic systems: Interferences from vent patterns and eruptive episodicities: Eastern California and Laguna del Maule. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2020JB020879.

Hildreth, W.; Fierstein, J.; Vazquez, J. (2023) Ages of the granitic basement of Long Valley Caldera, California, USA, and siting of the Quaternary granite-rhyolite pluton. *The Geological Society of America*, Volume 135, No. 11-12, pages 2753-2766. <https://doi.org/10.1130/B36589.1>

Holland, T., Blundy, J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contr. Mineral. and Petrol.* **116**, 433–447 (1994). <https://doi.org/10.1007/BF00310910>

Holness, M.B., Stock, M.J. & Geist, D. (2019). Magma chambers versus mush zones: constraining the architecture of sub-volcanic plumbing systems from microstructural analysis of crystalline enclaves. *Phil. Trans. R. Soc. A* **377**: 20180006.

Klug, J.D., Singer, B., Kita, N.T. & Spicuzza, M.J. (2020). Storage and evolution of Laguna del Maule rhyolites: insight from volatile and trace element contents in melt inclusions. *JGR Solid Earth*, Vol.125, Issue 8.

Le Maitre, R.W., Streckeisen, B., Zanettin, M., Le Bas, B., Bonin, P., Bateman, G., Ballini, A., Dudek, S., Efremova, J., Keller, J., Lameyre, P., Sabine, P.A., Schmid, R., Sørensen, H., Woolley, A.R. (2002) *Igneous rocks: A classification and glossary of terms*. Second edition.

Leake, B., Wolley, A., Arps, C.E.S., Birch, W.D., Gilbert, M.C., Grice, J.D., Hawthorne, F.C., Kato, A., Kisch, H.J., Krivovichev, V.G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J., Maresch, W.V., Nickel, E.H., Rock, N.M.S., Schumacher, J.C., Smith, D.C., Stephenson, N.C.N., Ungaretti, L., Whittaker, E.J.W., Youzhi, G. (1997) *Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral names*. *Mineralogical Magazine*, Volume 61, pages 295-321.

MacKenzie, W.S., Donaldson, C.H., Guilford, C. (1991) *Atlas of igneous rocks and their textures*.

Loewen, M. W., Bindeman, I. N., & Melnik, O. E. (2017). Eruption mechanisms and short duration of large rhyolitic lava flows of Yellowstone. *Earth and Planetary Science Letters*, **458**, 80–91. doi:10.1016/j.epsl.2016.10.034

Maguire, R.; Schmandt, B.; Li J.; Jiang, C.; Li G.; Wilgus, J.; Chen M. (2022) Magma accumulation at depths of prior rhyolite storage beneath Yellowstone Caldera. *Science*, Volume 378, Issue 6623, pages 1001-1004. DOI: 10.1126/science.ade0347

Middelmost, E. (1994) *Naming materials in the magma / igneous rock system*.

Munetake Sasaki; Koichiro Fujimoto; Takayuki Sawaki; Hitoshi Tsukamoto; Osamu Kato; Ryo Komatsu; Nobuo Doi; Masakatsu Sasada. (2003). Petrographic features of a high-temperature granite just newly solidified magma at the Kakkonda geothermal field, Japan. , *121*(3-4), 247–269. doi:10.1016/s0377-0273(02)00428-6

Mutch, E. J. F.; Blundy, J. D.; Tattitch, B. C.; Cooper, F. J.; Brooker, R. A. (2016). An experimental study of amphibole stability in low-pressure granitic magmas and a revised Al-in-hornblende geobarometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **171**(10), 85. doi:10.1007/s00410-016-1298-9

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

Putirka, K. (2016) Amphibole thermometers and barometers for igneous systems and some implications for eruption mechanisms of felsic magmas at arc volcanoes. *American Mineralogist*, Volume 101, pages 841-858.

Ridolfi, F., Renzulli, A., Puerini, M. (2010) Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contribution Mineral Petrology*, Volume 160, pages 46-66.

Rollinson, H. (1993) *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*.

Schipper, I., Jonatha, M., Tuffen, H., James, M & How, P. (2013) Shallow vent architecture during hybrid explosive-effusive activity at Cordón Caulle (Chile, 2011-12): Evidence from direct observations and pyroclast textures. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 262(), 25-37.

Shcherbakov, V; Plechov, P.; Izbekov, P; Shipman, J. (2011) Plagioclase zoning as an indicator of magma processes at Bezymianny volcano, Kamchatka. *Mineralogy Petrology* Vol. 162, pages 83-89.

Singer, B., Andersen, N., Le Mével, H., Feigl, K., DeMets, C., Tikoff, B., Thurber, C., Jicha, B. (2014) Dynamics of a large, restless, rhyolitic magma system at Laguna del Maule, southern Andes, Chile. *GSA Today*, Volume 24, No. 12.

Skewes, M.; Arévalo, A.; Floody, R.; Zuñiga, P.; Stern, C. (2005) The El Teniente megabreccia deposit, the world's largest copper deposit.

Smith, J.V.; Brown, W.(1988). *Feldspar Minerals. I. Crystal Structures, Physical, Chemical and Microtextural Properties* (2nd ed.). Springer-Verlag, Berlin, Germany.

Stern, C.; Skewes, M.; Arévalo, A. (2011) Magmatic evolution of the Giant El Teniente Cu-Mo deposit, Central Chile. *Journal of Petrology*, Volume 52, No. 7 y 8, pages 1591-1617.

Streckeisen, A.L. (1967) Classification and nomenclature of igneous rocks. *N.Jb.Mineral.* 107, page 2.

Walker, G. P. L. (1985). Origin of coarse lithic breccias near ignimbrite source vents. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25(1-2), 157–171. doi:10.1016/0377-0273(85)90010-1

Wallace, P. J., & Edmonds, M. (2011). The sulfur budget in magmas: Evidence from melt inclusions, submarine glasses, and volcanic gas emissions. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 73(1), 215-246. DOI: 10.2138/rmg.2011.73.8

Waters, L. & Lange, R. (2015) An updated calibration of the plagioclase-liquid hygrometer-thermometer applicable to basalts through rhyolites. *American Mineralogist*, Volume 100, No. 10, pages 2172-2184

Wespestad, C. E., Thurber, C. H., Andersen, N. L., Singer, B. S., Cardona, C., Zeng, X., ... Williams-Jones, G. (2019). *Magma Reservoir Below Laguna del Maule Volcanic Field, Chile*,

*Imaged With Surface-Wave Tomography. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124(3), 2858–2872.*doi:10.1029/2018jb016485

White, W. (2013) Chapter 8: Radiogenic isotope geochemistry, *Geochemistry*, second edition.

Winter, J.D (2010) *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*. Second edition

Woolley (2002) *Igneous rocks: A classification and glossary of terms*. Second edition

Ustunisik, G., Kilinc, A., Nielsen, R. (2014) New insights into the processes controlling compositional zoning in plagioclase.

Zen, E. (1988) Phase relations of peraluminous granitic rocks and their petrogenetic implications. *Review Earth Planet*, Volume 16, pages 21-51

ANEXOS

ANEXOS A : TABLAS COMPLEMENTARIAS

Tabla 1A. Abreviación utilizada para fases minerales.

Mineral	Abreviación
Actinolita	Act
Anfibol	amp
Apatito	Ap
Biotita	Bt
Clorita	chl
Cuarzo	Qz
Feldespato potásico	Feld-k
Plagioclasa	Plg
Titanita	Ttn
Zircon	zr

ANEXOS B: DESCRIPCIONES PETROLÓGICAS

Código muestra: *od-01*

Cristalinidad: Holocristalina, se observa un gran % de feno- y microcristales en una masa fundamental de < 10%.

Tamaño relativo de los cristales: inequigranulares; los cristales en la muestra presentan distintos tamaños. Se observa una población de fenocristales (~45 %) de 1-4 [mm] y una población de microfenocristales (~55%) de aproximadamente 0.05- 1 [mm].

Granularidad: Porfídica, se lograr observar la mineralogía en muestras de mano obtenidas durante terreno.

Tamaño de los cristales [0.05 – 4 mm]: la muestra presenta micro y fenocristales de feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa, biotita y óxidos de Fe-Ti; ordenados de manera decreciente de acuerdo con % de roca total.

Índice de color: Leucocrática, aproximadamente un 15 % de minerales máficos en la muestra.

Análisis roca completa

Mineralogía primaria

Mineral	Volumen (%)	Tamaño (mm)	Estructuralidad	Integridad	Observaciones generales
Cuarzo	38	0.1-4	Anhedrales con hábito granular.		Cristales con poros intersticiales incoloros a nícoles paralelos y grisáceos de 1° orden a nícoles cruzados. Se identifican dos poblaciones de tamaño con fenocristales de >1 [mm] y microlitos < 1 [mm].
Plagioclasa	7	0.3-2	Subhedrales con hábito tabular.		Cristales de tonalidades grisáceas blanquecinas a nícoles paralelos y grises de 1° orden a nícoles cruzados con maclas de tipo polisintética. Se observa,intercrecimiento

					de chadacristales de biotita y fracturas en los cristales.
Feldespatopotásico	40	< 5	Anhedrales		Se observan maclas tipo Carlsbad (ortoclasa) y cristales sin maclas de tonalidades grisáceas a nículos paralelos y grises de 1° orden a nículos cruzados. Intercrecimiento de chadacristales de cuarzo, plagioclasa y biotita.
Biotita	12	0.05-3	Subhedrales con hábito tabular.		Cristales con tonalidades marrones a nículos paralelos y marrones oscura de 1° orden a nículos cruzados con pleocroísmo fuerte en tonalidades marrones. Estos presentan dos poblaciones de tamaño. Una población como fenocristales tabulares aislados >1.5 [mm] y cristales con aspecto “astilloso” < 1.5 [mm]. Además, de intercrecimiento de óxidos de Fe.
Óxidos de Fe y Fe-Ti	~3	0.04-0.7	Anhedrales		Asociados a cristales de biotita y plagioclasa.

Descripción de texturas presentes

Texturas intercrecimiento y tamaño relativo.

- Cuarzo: fenocristales de este mineral exhiben textura consertal (bordes aserrados de los cristales).
- Feldespatopotásico: se observa textura poikilitica (chadacristales de biotita y cuarzo).
- Plagioclasa: se observan tantos fenocristales aislados con textura poikilitica (chadacristales de biotita), glomero- y cumulo porfirica (cúmulos de plagioclasa, biotita y opacos).
- Biotita: se observan texturas cumulo porfirica (cúmulos de biotita y opacos).

- Óxidos de Fe-Ti: se observan en texturas cumulo porfírica (cúmulos de biotita y opacos) y poikilítica (como chadacristales en oiocristal de biotita).

Texturas de desequilibrio.

Plagioclasa: se observa zonaciones en núcleo de los fenocristales con variación de tonalidades de forma concéntrica presente en los núcleos de los cristales.

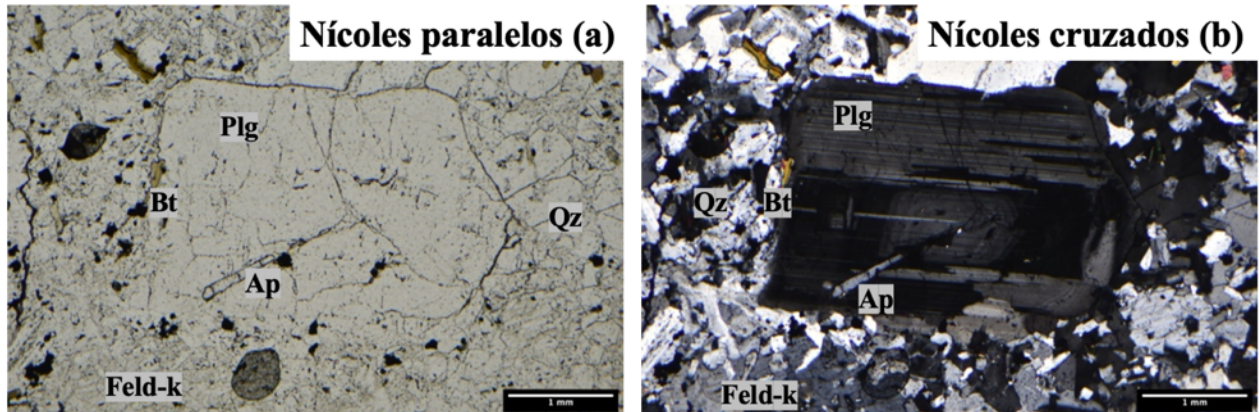


Figura 1C. Fotomicrografía a microscopio óptica y luz transmitida tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados de cristal de plagioclasa que exhibe zonación con un zoom de 5X.

Mineralogía secundaria

No se observa mineralogía secundaria en la muestra.

Imágenes muestra descrita.



Figura 2C. Muestra *od-01* de color rosáceo porfídica y tamaño de 13.7 [cm].

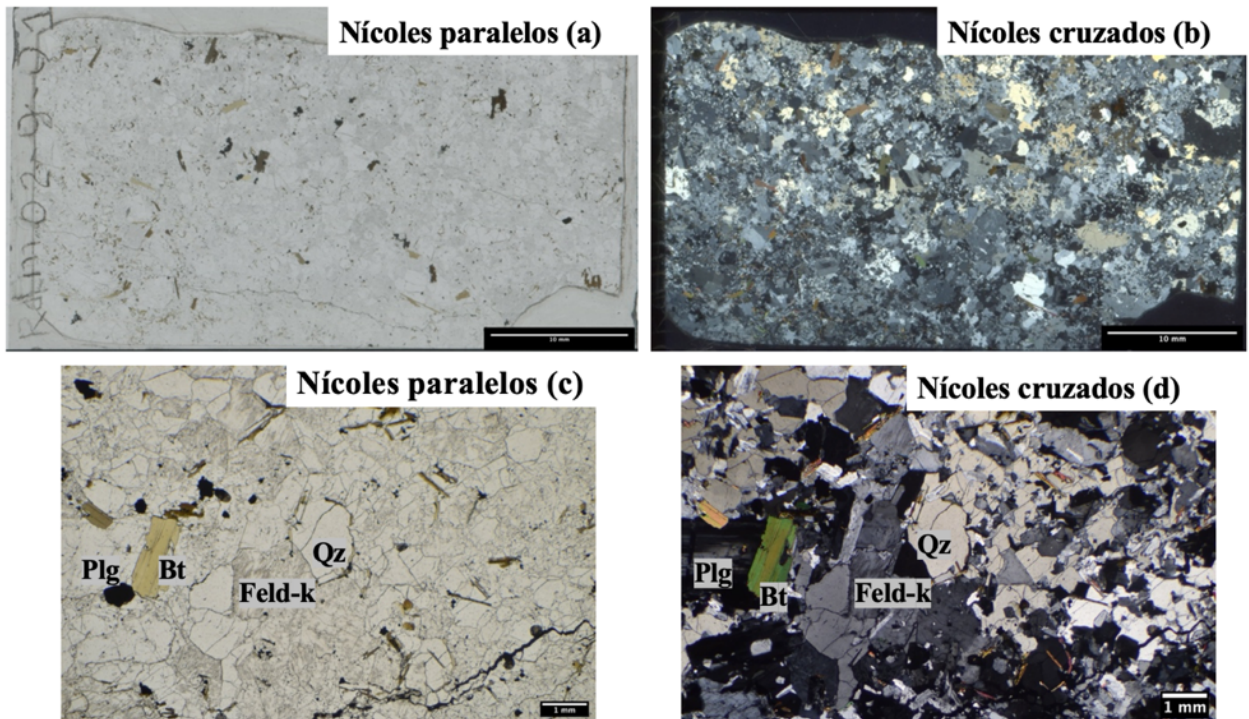


Figura 3C. Fotomicrografías muestra *od-01* tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados. (a) y (b) Corte transparente y pulido a ~30 micras de la muestra analizada. Se observa una fábrica isótropa y disposición homogéneas de los cristales. (c) y (d) Fotomicrografía microscopio óptico luz transmitida con zoom de 2.5X. Se observa parte de la mineralogía primaria descrita (cuarzo, biotita, feldspatos y óxidos de Fe y Fe-Ti).

Código muestra: *od-02*

Cristalinidad: Holocristalina, se observa un gran % de fenocristales y microfenocristales en una masa fundamental de < 10 %.

Tamaño relativo de los cristales: inequigranulares; los cristales en la muestra presentan distintos tamaños. Se observa una población de fenocristales (~30 %) de 1-6 [mm] y una población de microfenocristales (~70%) de aproximadamente 0.1- 1 [mm].

Granularidad: Porfídica, se lograr observar la mineralogía en muestras de mano obtenidas durante terreno.

Tamaño de los cristales [0.1 – 6 mm]: la muestra presenta micro y fenocristales de feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa, anfíbol, biotita, óxidos de Fe-Ti y titanita; ordenados de manera decreciente de acuerdo con % de roca total.

Índice de color: Leucocrática, se observan ~ 18% minerales máficos.

Análisis roca completa

Mineralogía primaria

Mineral	Volumen (%)	Tamaño (mm)	Estructuralidad	Integridad	Observaciones generales
Cuarzo	20	0.1 – 2	Anhedrales con hábito granular.		Cristales incoloros a nicoles paralelos y grises de 1° orde a nicoles cruzados. Presentan fracturas y poros intersticiales.
Plagioclasa	17	1-6	Subhedral con hábito tabular.	Con alteración sericítica.	Cristales incoloros de bajo relieve y con fracturas a nicoles paralelos y tonalidades grises de 1° orden con maclas tipo polisintéticas y Carlsbad a nicoles cruzados. Se observa intercrecimiento de chadacristales de anfíbol. Además, de zonaciones en el núcleo de los cristales.
Anfíbol	10	0.5- 3	Anhedrales a subhedral con hábito tabular (generalmente).	Intercrecimiento con biotita y cloritización.	Cristales de tonalidades verdosas amarillentas con relieve moderado, fracturas y clivaje en dos direcciones a nicoles paralelos. A nicoles cruzados se observan tonalidades naranjas, rosadas y moradas de 2°-3° orden. Se observa al

					menos dos tipos de anfíboles, en donde uno presenta clivaje en dos direcciones (hornblenda).
Feldespatopotásico	45	0.5-2	Anhedrales		Cristales de tonalidades grisáceas, bajo relieve y fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observa tonalidades grises de 1° orden.
Biotita	4	0.5-1	Subhedral con hábito tabular.	Alteración de intercrecimiento de anfíboles y cloritización.	Cristales de tonalidades marrones, fuerte pleocroísmo en estas mismas tonalidades, bajo relieve y clivaje en una dirección a nícoles paralelos. A nícoles cruzados, se observan tonalidades verdosas a rosadas de 1°-2° orden. Además, se observa tanto cristales frescos como cristales alterados con intercrecimiento de anfíboles y clorita (tonalidades verdosas y rosadas a nícoles cruzados). Cristales se encuentran asociados a óxidos de Fe-Ti.
Titanita	<2	0.3-2	Anhedrales a subhedral		Cristales amarillos a incoloros de alto relieve subhedral a

					euhedrales a nicoles paralelos. A nicoles cruzados se observan tonalidades marrones amarillentas de 3° orden.
Óxidos de Fe y Fe-Ti	<2	0.2-0.6	Anhedrales con hábito granular.		En asociación con biotita y anfiboles. Además, se identifican como minerales aislados.

*por los colores de interferencia hay que considerar que los anfiboles que no son hornblenda se estarían alterando a clorita (cristales con colores de interferencia más azulados).

Mineralogía secundaria

Mineral	Volumen (%)	Tamaño (mm)	Estructuralidad	Integridad	Observaciones generales
Clorita	(no se considera volumen debido a que es alteración).	0.1-1	Anhedrales	Alterando cristales de anfiboles y biotita.	Cristales verdosos amarillentos a nicoles paralelos con moderado relieve y formas anhedrales. A nicoles cruzados se observa color azul berlin.

Descripción de texturas presentes

Texturas de intercrecimiento y tamaño relativo.

- Feldespato potásico: se observa textura poikilitica, intercrecimiento de chadacristales de apatito.
- Cuarzo: se observa textura consertal con bordes aserrados de los cristales.
- Plagioclasa: se observa textura poikilitica intercrecimiento de chadacristales de anfiboles y sericita. Además, de texturas cumulo porfirica (cúmulos de plagioclasa, opacos y anfiboles).
- Anfiboles: se observan texturas cumulo porfirica (cúmulos de anfiboles, opacos y clorita).
- Biotita: se observan texturas cumulo porfirica (cúmulos de biotita y opacos) y textura poikilitica con intercrecimiento de chadacristales de apatito, óxidos de Fe y Fe-Ti.

Texturas de desequilibrio.

Cuarzo: se observa textura de embahiamiento, morfología cóncava en borde de cristal de cuarzo con reabsorción de feldespato potásico.

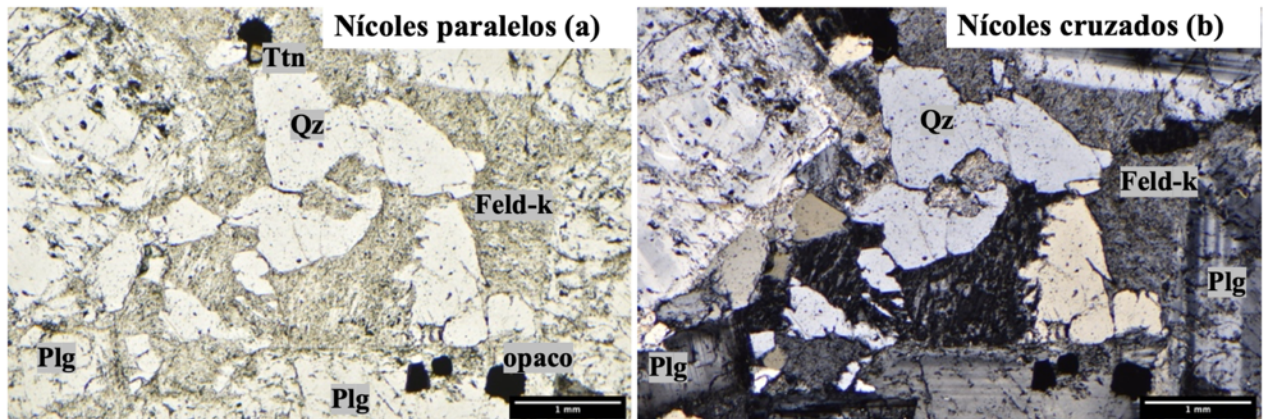


Figura 4C. Fotomicrografía a microscopio óptica y luz transmitida tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados de textura de embahiamiento en cristal de cuarzo con zoom de 5X.

Plagioclasa: se observa zonaciones en núcleo de los fenocristales con variación de tonalidades de forma concéntricas presente en los núcleos de los cristales.

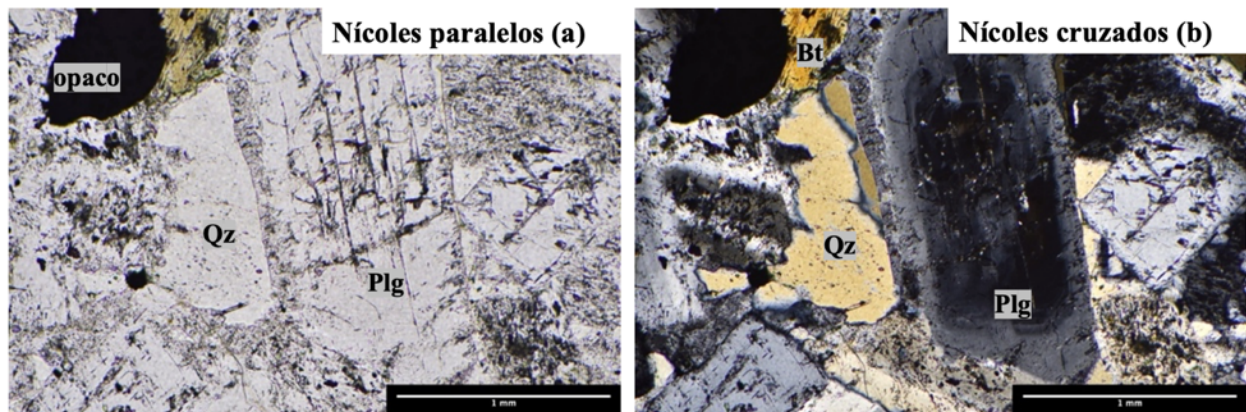


Figura 5C. Fotomicrografía a microscopio óptica y luz transmitida tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados de cristal de plagioclasa que exhibe zonación con un zoom de 10X.

Imágenes de la muestra



Figura 6C. Muestra *od-02* de color grisáceo porfídica y tamaño de 20.4 [cm].

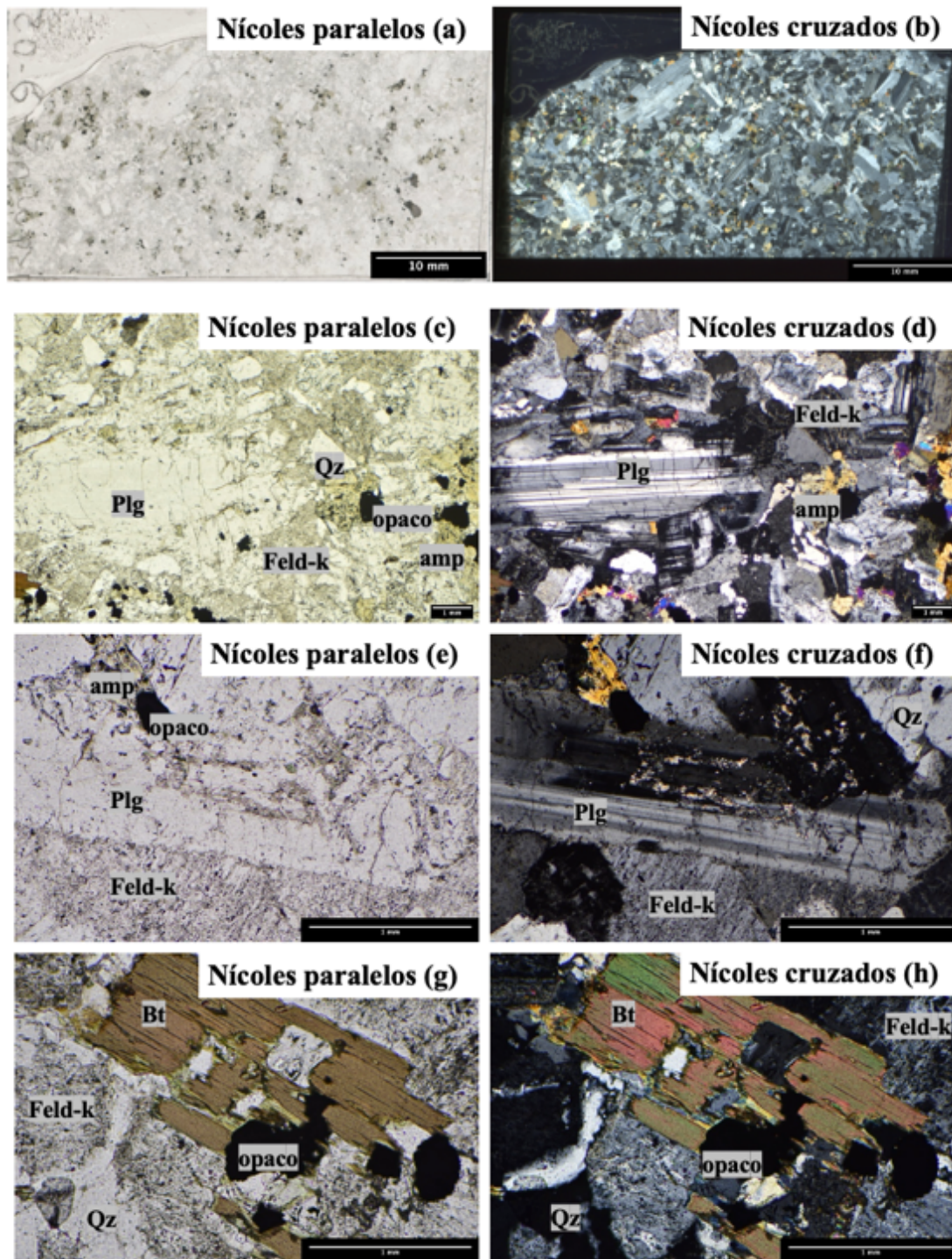


Figura 7C. Fotomicrografías muestra *od-02* tanto a nicoles paralelos como nicoles cruzados. (a) y (b) Corte transparente y pulido a ~30 micras de la muestra analizada. Se observa una fábrica isótropa y disposición homogéneas de los cristales. (c) y (d) Fotomicrografía microscopio óptico luz transmitida con zoom de 2.5X. Se observa parte de la mineralogía primaria descrita (cuarzo, biotita, feldespatos, anfíboles y óxidos de Fe-Ti). (e) y (f) Fotomicrografía microscopio óptico luz transmitida con zoom de 10X. Se observa alteración sericítica en cristal de plagioclasa. (g) y (h) Fotomicrografía microscopio óptico luz transmitida con zoom de 10X. Se observa cloritización en cristal de biotita.

Código muestra: *od-03*

Cristalinidad: Holocristalina, se observa un gran % de feno- y microcristales en una masa fundamental de < 10%.

Tamaño relativo de los cristales: inequigranulares; los cristales en la muestra presentan distintos tamaños. Se observa una población de fenocristales (~80 %) de 1-5 [mm] y una población de microfenocristales (~20%) de aproximadamente 0.07- 1 [mm].

Granularidad: Porfídica, se lograr observar la mineralogía en muestras de mano obtenidas durante terreno.

Tamaño de los cristales [0.07 – 5 mm]: la muestra presenta micro y fenocristales de feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa, biotita y óxidos de Fe-Ti; ordenados de manera decreciente de acuerdo con % de roca total.

Índice de color: Leucocrática, aproximadamente un 5 % de minerales máficos en la muestra.

Análisis roca completa

Mineralogía primaria

Mineral	Volumen (%)	Tamaño (mm)	Estructuralidad	Integridad	Observaciones generales
Cuarzo	34	0.5 – 4	Anhedral con hábito granular.		Cristales anhedrales incoloros de bajo relieve a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades grises de 1° orden. Además de poros intersticiales asociados a cúmulos de cristales.
Plagioclasa	13	0.4 -2	Anhedral a subhedral con hábitos tabulares.		Cristales incoloros, con bajo relieve y fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades grises de 1° orden con maclas de tipo polisintéticas

					(generalmente) y sin alteración hidrotermal secundaria.
Feldespatopotásico	48	2 – 5	Anhedrales		Cristales de tonalidades grises a incoloras de bajo relieve y con fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades grises de 1° orden. Se idéntica como fenocristales, así como parte de la masa fundamental.
Biotita	3	0.2 – 2	Subhedral con hábito tabular.		Cristales marrones, fuerte pleocroísmo en tonalidades marrones, moderado relieve y clivaje en una dirección nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades marrones a verdosas de 1°- 2° orden.
Óxidos de Fe y Fe-Ti	2	0.07-1	Anhedral		Se observan asociados a cristales de biotita y así como a cristales aislados.

Descripción de texturas presentes

Texturas intercrecimiento y tamaño relativo.

- Feldespatopotásico: se observa textura poikilitica, intercrecimiento de chadacristales de cuarzo en los bordes de los cristales.
- Plagioclasa: se observan textura poikilitica con intercrecimiento de chadacristales de apatito, óxidos de Fe y Fe-Ti. También, se observa texturas glomero- y cumulo porfiricas.
- Biotita: se observan texturas cumulo porfirica (cúmulos de biotita y opacos).

Texturas de desequilibrio.

Plagioclasa: se observa zonaciones en núcleo de los fenocristales con variación de tonalidades de forma concéntricas presente en los núcleos de los cristales.

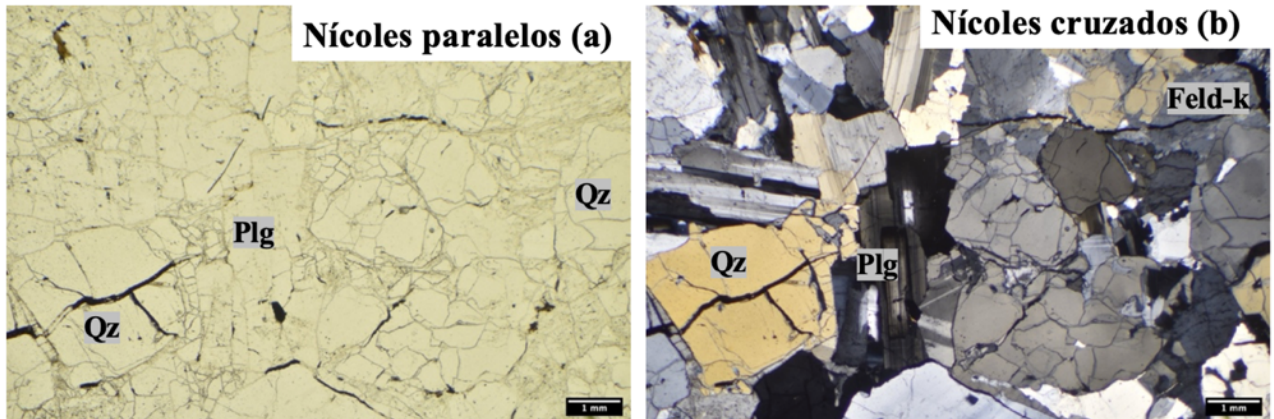


Figura 8C. Fotomicrografía a microscopio óptica y luz transmitida tanto a nículos paralelos como nículos cruzados de cristal de plagioclasa que exhibe zonación con un zoom de 2.5X.

- Feldespato potásico: textura peritítica donde se observa lamelas de plagioclasa en cristal de feldespato potásico.

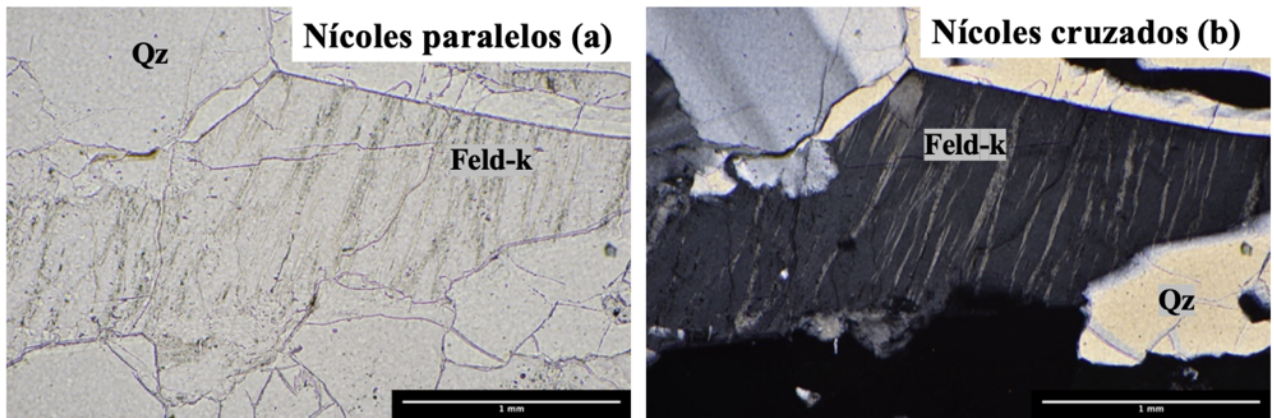


Figura 9C. Fotomicrografía a microscopio óptica y luz transmitida tanto a nículos paralelos como nículos cruzados textura peritítica en cristal de feldespato (exsolución de feldespato sódico dentro de cristal de feldespato potásico de forma lamelar o en forma de venas) con un zoom de 10X.

Mineralogía secundaria

No se observa mineralogía secundaria en la muestra.

Imágenes de la muestra



Figura 10C. Muestra *od-03* de color blanquecina porfídica y tamaño 23.3 [cm].

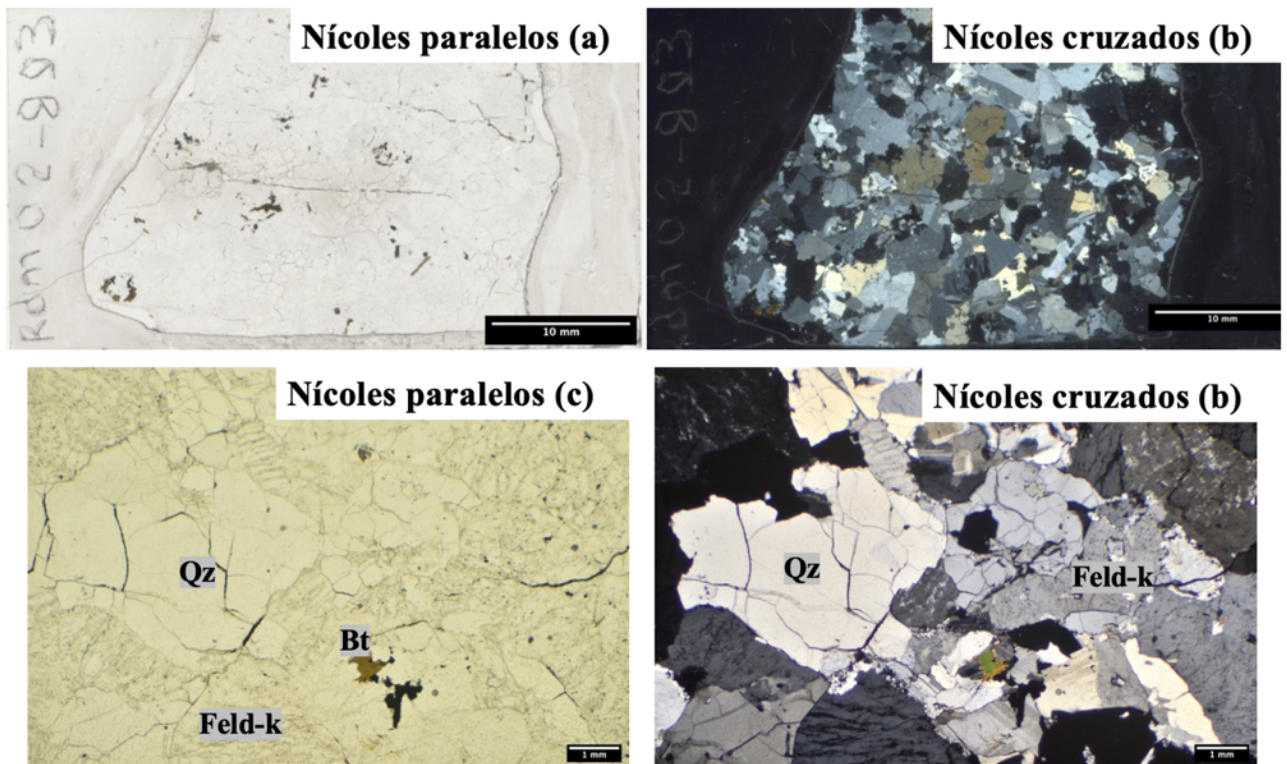


Figura 11C. Fotomicrografías muestra *od-03* tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados. (a) y (b) Corte transparente y pulido a ~ 30 micras de la muestra analizada. Se observa una fábrica isótropa y disposición homogéneas de los cristales. (c) y (d) Fotomicrografía microscopio óptico luz transmitida con zoom de 2.5X. Se observa parte de la mineralogía primaria descrita (cuarzo, biotita, óxidos de Fe, Fe-Ti y feldespatos)

Código muestra: *od-09*

Cristalinidad: Holocristalina, se observa un gran % de feno- y microcristales en una masa fundamental de < 10%.

Tamaño relativo de los cristales: inequigranulares; los cristales en la muestra presentan distintos tamaños. Se observa una población de fenocristales (~10 %) de 1-4 [mm] y una población de microfenocristales (~90%) de aproximadamente 0.05- 1 [mm]. Se observa en general que los cristales son equigranulares a excepción de los cristales de cuarzo.

Granularidad: Porfídica, se lograr observar la mineralogía en muestras de mano obtenidas durante terreno.

Tamaño de los cristales [0.05 – 4 mm]: la muestra presenta micro y fenocristales de feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa, anfíbol, biotita, titanita y óxidos de Fe; ordenados de manera decreciente de acuerdo con % de roca total.

Índice de color: Leucocrática, aproximadamente un 13 % de minerales máficos en la muestra.

Análisis roca completa

Mineralogía primaria

Mineral	Volumen (%)	Tamaño (mm)	Estructuralidad	Integridad	Observaciones generales
Cuarzo	30	0.3 - 4	Anhedrales con hábito granular.		Cristales incoloros de bajo relieve a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades grisáceas y amarillas de 1° orden. Además, de poros intersticiales y dos familias de tamaño de cristales (0.3-1 [mm] y 1- 4 [mm])

Plagioclasa	12	0.5 - 3	Anhedrales a subhedrales con hábito tabular.	Alteración con feldespato potásico, microlitos de anfíboles y alteración sericítica.	Cristales incoloros a grisáceos de bajo relieve y con fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzados de observan tonalidades grisáceas de 1° orden, maclas de tipo polisintéticas y Carlsbad.
Anfíbol	3 *fresco	0.2 - 1	Anhedrales a subhedrales con hábito pseudo-tabular.	Alteración de producto de intercrecimiento con biotita y cloritización.	Cristales de tonalidades verdosas, moderado relieve y fracturas a nícoles paralelos. Además, de un cristal que presenta clivaje en dos direcciones (hornblenda). A nícoles cruzados, se observan tonalidades marrones, naranjas, rosadas y azules de 2°-3° orden. Se identifican un ~5 % de cristales frescos. En general, se encuentran asociados a cristales de biotita.

Feldespatopotásico	45	0.5 - 3	Anhedrales		Se observan maclas tipo Carlsbad (ortoclasa) y cristales sin maclas de tonalidades grisáceas a nícoles paralelos y grises de 1° orden a nícoles cruzados. Además, forman parte de la masa fundamental.
Biotita	3 *fresco	0.1 - 1	Subhedrales con hábito tabular.	Alteración debido a intercrecimiento de biotita y cloritización.	Cristales de tonalidades marrones, fuerte pleocroísmo en estas mismas tonalidades, bajo relieve y clivaje en una dirección a nícoles paralelos. A nícoles cruzados, se observan tonalidades verdosas a rosadas de 1°-2° orden. Además, se observa tanto cristales frescos como cristales alterados con intercrecimiento de anfíboles y clorita (tonalidades verdosas y rosadas a nícoles cruzados).

					Cristales se encuentran asociados a óxidos de Fe-Ti.
Titanita	2	~0.3-0.5	Subhedrales con hábitos característico.		Se observan cristales incoloros verdosos con alto relieve a nícoles paralelos. A nícoles cruzados, se observan tonalidades marrones de 1° orden.
Óxidos de Fe y Fe-Ti.	1	0.05 0.7	Anhedrales		En asociación a cristales de biotita, anfíboles, titanita y clorita.

Mineralogía secundaria

Mineral	Volumen (%)	Tamaño (mm)	Estructuralidad	Integridad	Observaciones generales
Clorita	(alterando cristales de biotita y anfíboles).	0.1-1	Anhedrales	Alterando cristales de anfíboles y biotita.	Se observan cristales verdosos y moderado relieve a nícoles paralelos. A nícoles cruzados, con colores de interferencia “azul berlin”.

Descripción de texturas presentes

Textura intercrecimiento y tamaño relativo.

- Feldespato potásico: se observa textura poikilitica, intercrecimiento de chadacristales de anfíboles, cuarzo y plagioclasa.
- Cuarzo: se observa textura poikilitica, intercrecimiento de chadacristales de anfíboles y biotita.
- Plagioclasa: se observan textura poikilitica, intercrecimiento de chadacristales de opacos y anfíboles. Además, de textura glomero- y cumulo porfirica (cúmulos de plagioclasa, cuarzo, anfíboles, titanita y opacos).

- Biotita: se observa textura poikilitica, intercrecimiento de chadacristales de apatitos, óxidos de Fe y Fe-Ti. Además, de textura glomero- y cumulo porfirica (cúmulos de biotita, anfiboles y opacos).
- Anfíbol: se observa textura poikilitica intercrecimiento de chadacristales de óxidos de Fe y Fe-Ti. Además, de textura glomero- y cumulo porfirica (cúmulos de biotita, anfiboles, óxidos de Fe y Fe-Ti).

Textura de desequilibrio.

Plagioclasa: se observa zonaciones en núcleo de los fenocristales con variación de tonalidades de forma concéntrica presente en los núcleos de los cristales.

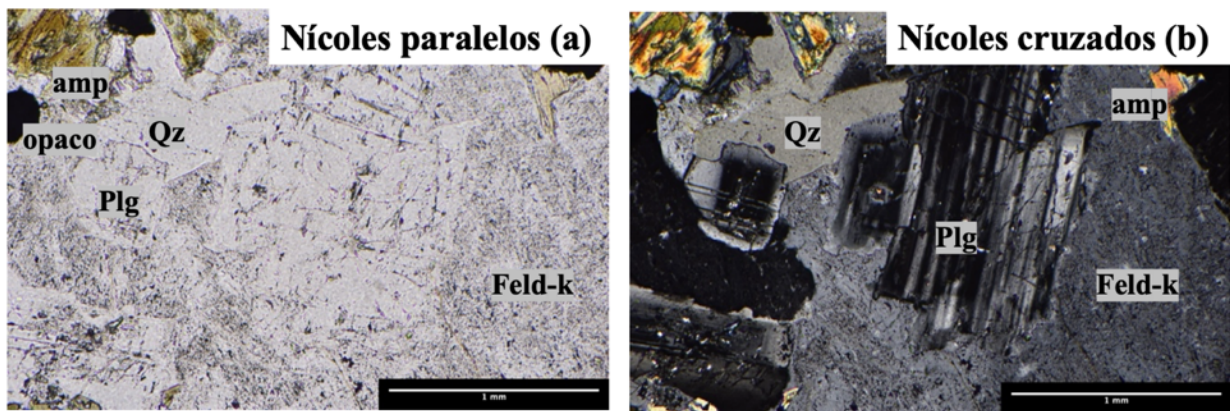


Figura 12C. Fotomicrografía a microscopio óptica y luz transmitida tanto a nícoles paralelos como a nícoles cruzados de cristal de plagioclasa que exhibe zonación con un zoom de 10X.

Biotita: bordes de reacción en fenocristales de esta fase mineral.

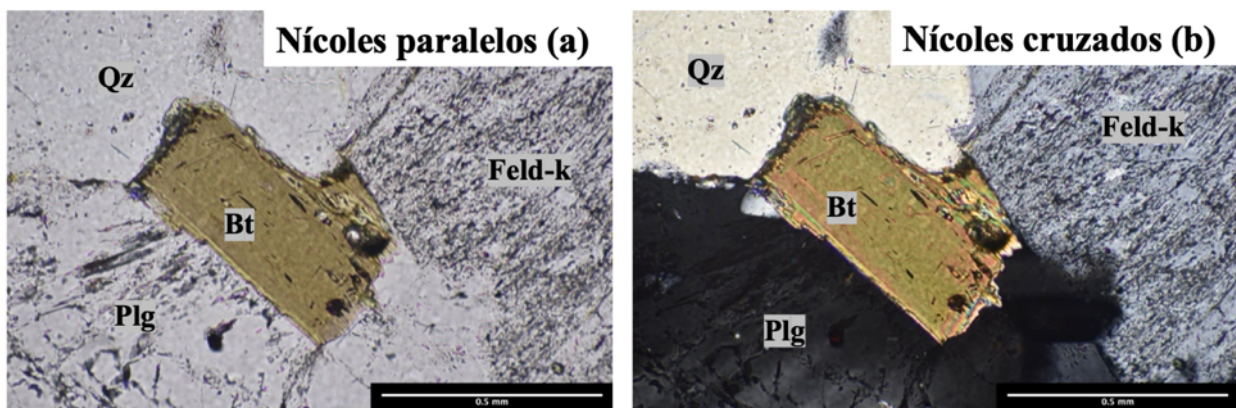


Figura 13C. Fotomicrografía a microscopio óptica y luz transmitida tanto a nícoles paralelos como a nícoles cruzados de cristal de biotita que exhibe bordes de reacción con un zoom de 20X.

Cuarzo: se observa textura de embahiamiento, morfología cóncava en borde de cristal de cuarzo con reabsorción de feldespato potásico.

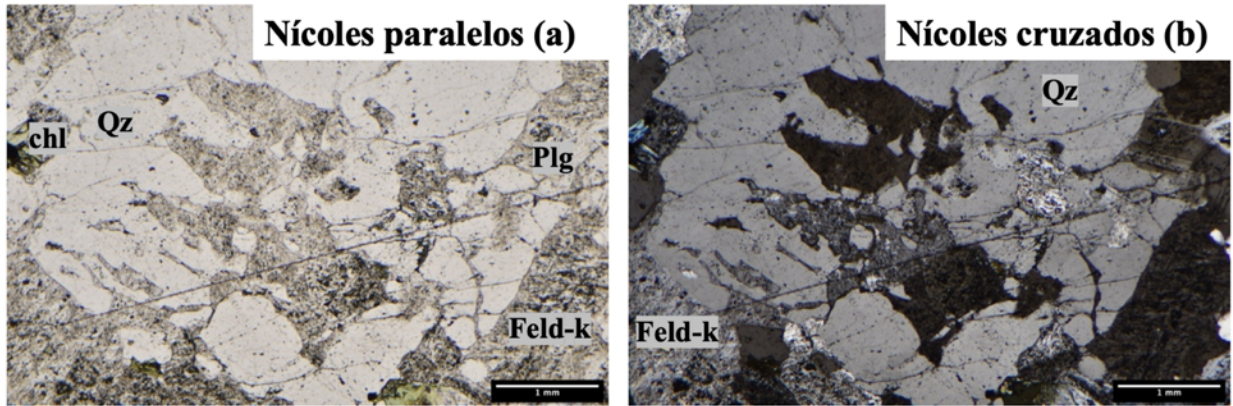


Figura 14C. Fotomicrografía a microscopio óptica y luz transmitida tanto a nícoles paralelos como a nícoles cruzados de textura de embahiamiento en cristal de cuarzo con zoom de 5X.

Imágenes de la muestra



Figura 15C. Muestra *od-09* de color grisáceo porfídica y tamaño 14.8 [cm]

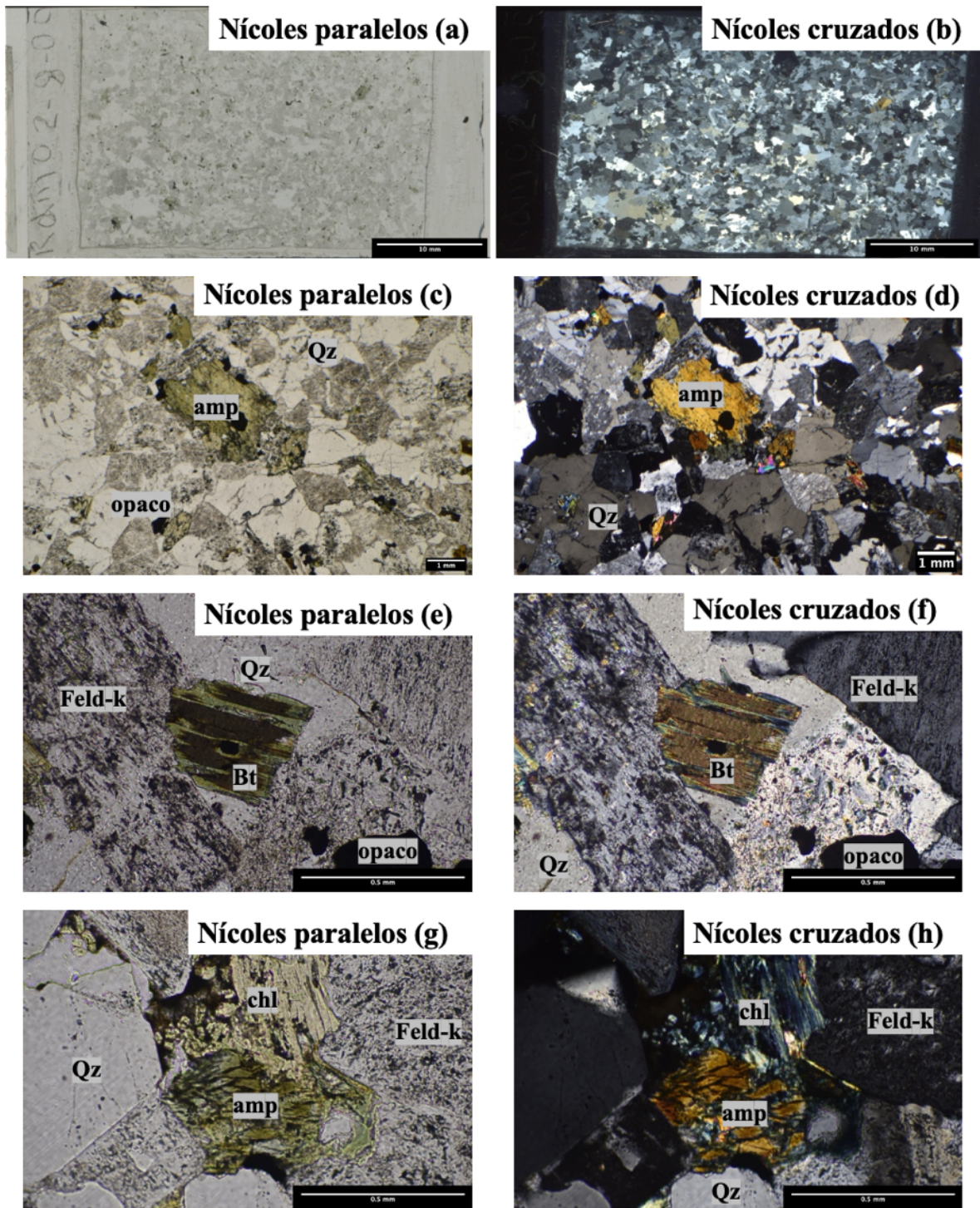


Figura 16C. Fotomicrografías muestra *od-09* tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados. (a) y (b) Corte transparente y pulido a ~30 micras de la muestra analizada. Se observa una fábrica isótropa y disposición homogéneas de los cristales. (c) y (d) Fotomicrografía microscopio óptico luz transmitida con zoom de 2.5X. Se observa parte de la mineralogía primaria descrita (cuarzo, biotita, feldspatos, anfíboles y óxidos de Fe-Ti). (e) y (f) Fotomicrografía microscopio óptico luz transmitida con zoom de 20X. Se observa alteración clorítica en cristal de biotita. (g) y (h)

Fotomicrografía microscopio óptico luz transmitida con zoom de 20X. Se observa cloritización en cristal de anfíbol.

Código muestra: *od-12*

Cristalinidad: Holocristalina, se observa un gran % de fenocristales y microfenocristales en una masa fundamental de < 10 %.

Tamaño relativo de los cristales: inequigranulares; los cristales en la muestra presentan distintos tamaños. Se observa una población de fenocristales (~40%) de aproximadamente de 5-1 [mm] y una población de microfenocristales (~60 %) de aproximadamente de 1- 0.1 [mm].

Granularidad: Porfídica, se logra observar la mineralogía en muestras de mano obtenidas durante terreno.

Tamaño de los cristales [0.1- 5 mm]: la muestra presenta micro y fenocristales de feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa, biotita, anfíboles, óxidos de Fe, óxidos de Fe-Ti y titanita; ordenados de manera decreciente de acuerdo con % de roca total.

Índice de color: Leucocrática, se observa ~ 15 % minerales máficos.

Análisis roca completa

Mineralogía primaria

Mineral	Volumen (%)	Tamaño (mm)	Estructuralidad	Integridad	Observaciones generales
Cuarzo	22	0.5 – 3	Anhedrales con hábito granular.		Cristales incoloros, bajo relieve a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades grises de 1° orden y bordes irregulares de los cristales.
Plagioclasa	21,2	1-5	Anhedrales a subhedrales con hábito pseudo-tabular.	Alteración sericítica.	Cristales incoloros a grises, bajo relieve y con fracturas a

					nícoles paralelos. A nícoles cruzados, se observan tonalidades grises de 1° orden, maclas de tipo polisintéticas y Carlsbad.
Anfíbol	4,4	1-4	Anhedrales a subhedrales con hábitos granulares a pseudo-tabulares		Cristales de tonalidades verdosas amarillentas, relieve moderado y con fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades rosadas, verdes, turquesas de 2°-3° orden.
Feldespatopotáxico	42	1-3	Anhedrales.	Se observa alteraciones visibles.	Cristales grises de bajo relieve que presentan fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades grises de 1° orden.
Biotita	7,9	0.1-3	Anhedral a subhedral con hábitos tabulares y granulares.	Se observa intercrecimiento de anfíboles y cloritización.	Cristales marrones con fuerte pleocroísmo en tonalidades marrones, relieve moderado que presentan

					fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades marrones de 1° orden y azul berlín (cloritización). Además, se identifican dos familias de tamaño.
Óxidos de Fe y Fe-Ti	3	0.1-1	Anhedrales	Sin alteraciones	Se observa generalmente en cúmulos de biotita, anfíboles y clorita.
Titanita	1	0.5- 4	Anhedrales a subhedrales	Sin alteraciones	Cristales con tonalidades verdosas amarillentas con alto relieve y que presenta fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzados, se observan tonalidades marrones de 1° orden y rosados de 2°-3° orden.

Mineralogía secundaria

Mineral	Volumen (%)	Tamaño (mm)	Estructuralidad	Integridad	Observaciones generales
Clorita	(alterando cristales de biotita)	-	Anhedrales	Alteración en cristales	Cristales con tonalidades verdosas, relieve moderado- alto a nícoles

	y anfíboles)			de biotita y anfíboles.	paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades amarillas y azul berlín. Se observan en cúmulos de biotita, anfíbol y opacos.
--	-----------------	--	--	----------------------------	---

Descripción de texturas presentes

Texturas intercrecimiento y tamaño relativo.

- Feldespato potásico: se observa textura poikilitica con intercrecimiento de chadacristales biotita,
- Cuarzo: se observa textura consertal con bordes de los cristales de aspecto aserrado.
- Plagioclasa: se observa textura poikilitica con intercrecimiento de chadacristales de apatito, clorita, óxidos de Fe y Fe-Ti. Además, de textura cumuloportírica(cúmulos de plagioclasa, clorita, óxidos de Fe y Fe-Ti).
- Biotita: se observa textura glomero- y cumuloportírica (cúmulos de biotita y opacos) y textura poikilitica con intercrecimiento de chadacristales apatito.

Texturas de desequilibrio.

Feldespato potásico: textura gráfica o pegmatítica con intercrecimiento de cristales cuneiformes de cuarzo de forma vemicular dentro de cristal de feldespato potásico.

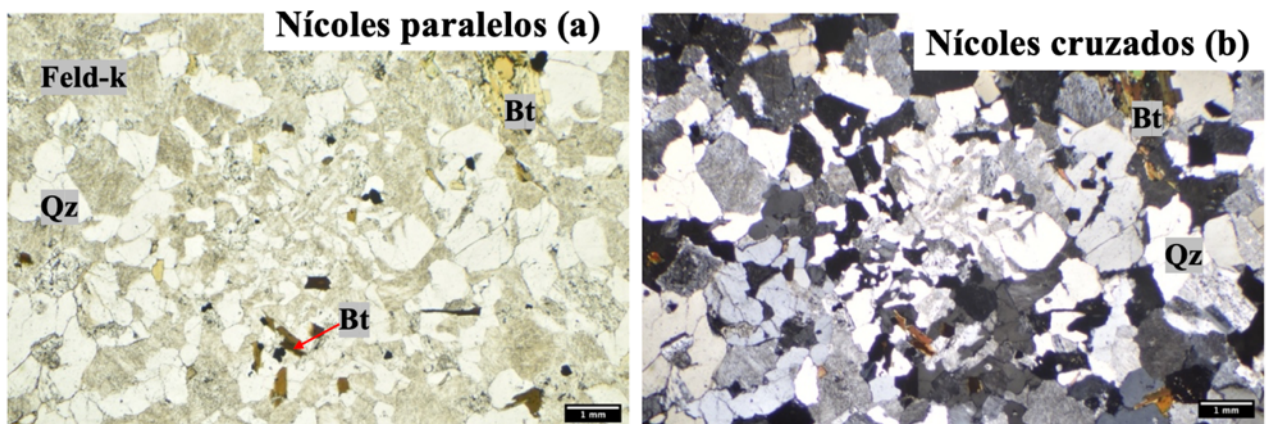


Figura 17C. Fotomicrografía a microscopio óptica y luz transmitida tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados de textura gráfica en cristal de feldespato potásico con intercrecimiento de cuarzo con zoom de 2.5X.

Cuarzo: se observa textura de embahiamiento, morfología cóncava en borde de cristal de cuarzo con reabsorción de feldespato potásico.

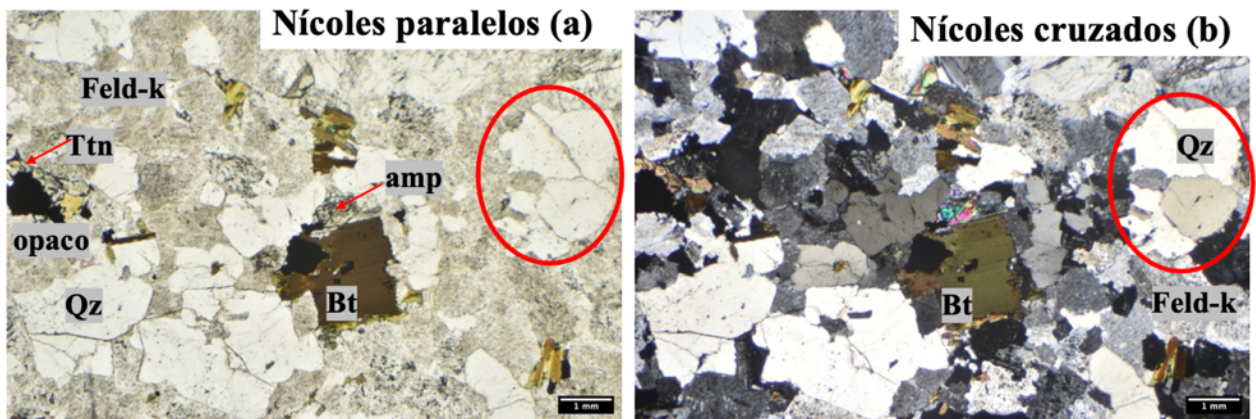


Figura 18C. Fotomicrografía a microscopio óptico y luz transmitida tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados con textura de embahiamiento en cristal de cuarzo con zoom de 2.5X.

Plagioclasa: se observa zonaciones en núcleo de los fenocristales con variación de tonalidades de forma concéntricas presente en los núcleos de los cristales.

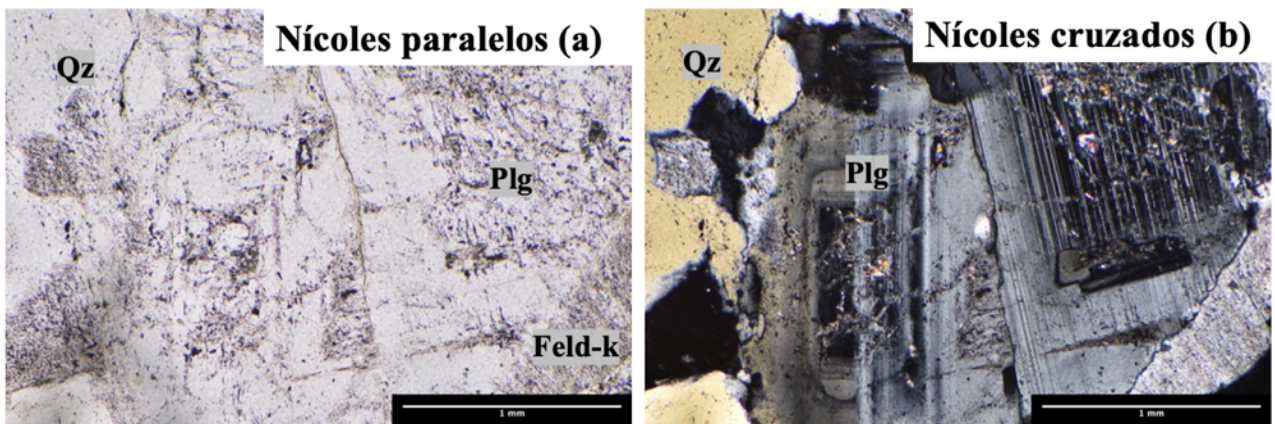


Figura 19C. Fotomicrografía a microscopio óptico y luz transmitida tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados de cristal de plagioclasa que exhibe zonación y alteración serícita con un zoom de 10X.

Imágenes de la muestra



Figura 20C. Muestra *od-12* de color grisáceo porfídica y tamaño 13.5 [cm].

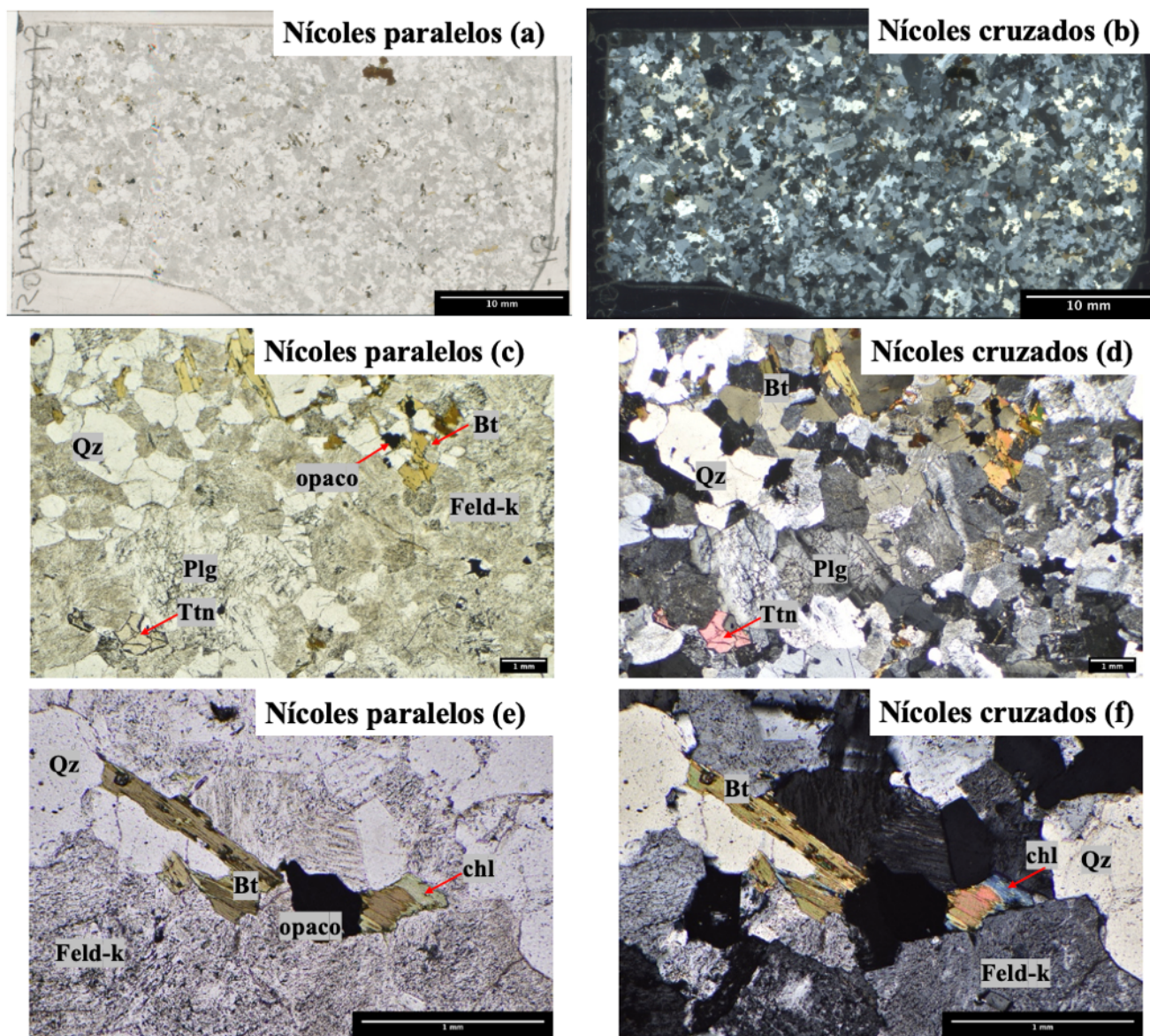


Figura 21C. Fotomicrografías muestra *od-12* tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados. (a) y (b) Corte transparente y pulido a ~ 30 micras de la muestra analizada. Se observa una fábrica isótropa y disposición homogéneas de los cristales. (c) y (d) Fotomicrografía microscopio óptico luz transmitida con zoom de 2.5X. Se observa parte de la mineralogía primaria descrita (cuarzo, biotita, feldespatos, anfíboles, titanita, óxidos de Fe-Ti y Fe (opacos)). (e) y (f) Fotomicrografía microscopio óptico luz transmitida con zoom de 10X. Se observa cloritización en cristal de biotita.

Código muestra: *od-15*

Cristalinidad: Holocristalina, se observa un gran % de feno- y microcristales en una masa fundamental de $< 10\%$.

Tamaño relativo de los cristales: inequigranulares; los cristales en la muestra presentan distintos tamaños. Se observa una población de fenocristales (~80 %) de 1-4 [mm] y una población de microfenocristales (~20%) de aproximadamente 0.05- 1 [mm].

Granularidad: Porfídica, se lograr observar la mineralogía en muestras de mano obtenidas durante terreno.

Tamaño de los cristales [0.05 – 4 mm]: la muestra presenta micro y fenocristales de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, biotita, opacos y titanita; ordenados de manera decreciente de acuerdo con % de roca total.

Índice de color: Leucocrática, aproximadamente un 15 % de minerales máficos en la muestra.

Análisis roca completa

Mineralogía primaria

Mineral	Volumen (%)	Tamaño (mm)	Estructuralidad	Integridad	Observaciones generales
Cuarzo	34	0.05 - 3	Anhedral con hábito granular		Cristales incoloros de bajo relieve con fracturas y bordes aserrados a nicoles paralelos. A nicoles cruzados se observas tonalidades grises de 1° orden. Se observan cristales con alto % de poros intersticiales. Además, de dos poblaciones de tamaño (0.05-0.5 [mm], los que rellenan la fractura; 0.5-3 [mm]).
Plagioclasa	24	1 - 3	Subhedral con hábito tabular.		Cristales incoloros con bajo relieve y fracturas a nicoles paralelos. A nicoles cruzados se observan tonalidades grisaceas de 1° orden y maclas

					tipo polisintéticas y Carlsbad.
Feldespatopotásico	26	2 - 4	Anhedral		Cristales grises de bajo relieve con fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades grises de 1° orden y maclas tipo Carlsbad.
Biotita	10	0.2 - 2	Subhedrales con hábito tabular.		Cristales marrones de moderado relieve y fuerte pleocroísmo en tonalidades marrones. Además, de clivaje en una dirección y fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades marrones amarillentas a verdosas de 1° orden.
Óxidos de Fe y Fe-Ti	4	0.1-1	Anhedrales		Se observan en asociación a cristales de biotita y aislados.
Titanita	1	~1	Euhedral con hábito piramidal		Cristales de tonalidades amarillas a verdosas con alto relieve y fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades amarillas a grises de 3° orden.

Mineralogía secundaria

No se observa mineralogía secundaria en la muestra.

Descripción de texturas presentes

Texturas intercrecimiento y tamaño relativo.

- Cuarzo: se observa textura consertal con bordes de aspecto aserrado en los cristales) y textura glomeroporfírica (cúmulos de cristales de cuarzo).
- Plagioclasa: se observa textura poikilitica con intercrecimiento de chadacristales de biotita, texturas glomero- y cumuloporfirca (cúmulos de cristales de plagioclasa, biotita, óxidos de Fe y Fe-Ti).
- Biotita: se observan en texturas glomero- y cumuloporfirica (cúmulos de biotita y opacos). Además, de textura poikilitica con intercrecimiento de chadacristales de apatitos, cuarzo, óxidos de Fe y Fe-Ti.

Texturas de desequilibrio.

No se observan texturas de desequilibrio en la muestra.

Imágenes de la muestra



Figura 22C. Muestra de color blanquecino porfídica y tamaño 15.5 [cm].

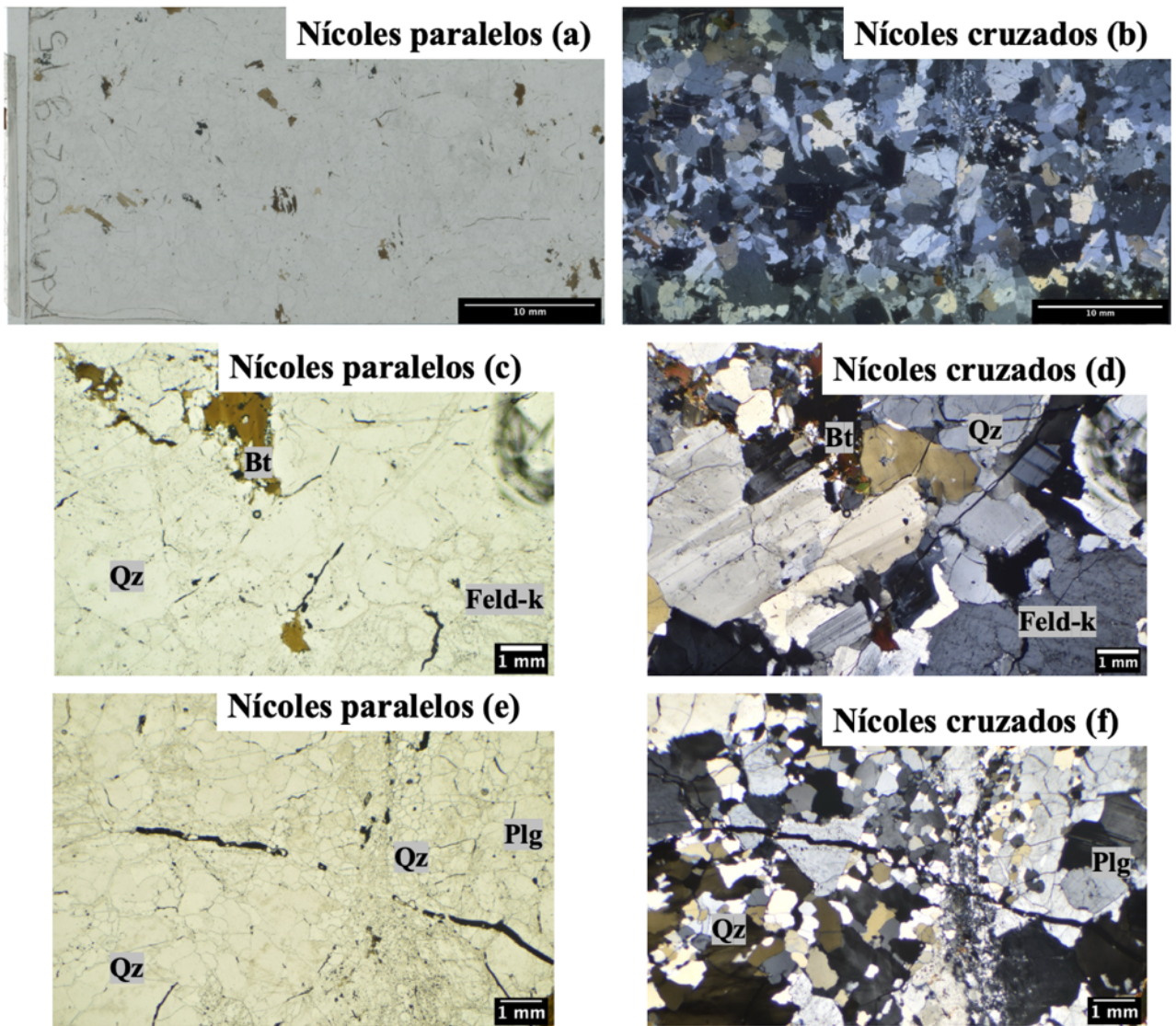


Figura 23C. Fotomicrografías muestra *od-15* tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados. (a) y (b) Corte transparente y pulido a ~ 30 micras de la muestra analizada. Se observa una fábrica isotrópica y disposición homogéneas de los cristales. (c) y (d) Fotomicrografía microscopio óptico luz transmitida con zoom de 2.5X. Se observa parte de la mineralogía primaria descrita (cuarzo, biotita y feldspatos). (e) y (f) Fotomicrografía microscopio óptico luz transmitida con zoom de 2.5X. Se observa las dos poblaciones de tamaños de cristales de cuarzo.

Código muestra: *nd-02*

Cristalinidad: Holocristalina, se observa un gran % de feno- y microcristales en una masa fundamental de $< 10\%$.

Tamaño relativo de los cristales: inequigranulares; los cristales en la muestra presentan distintos tamaños. Se observa una población de fenocristales ($\sim 80\%$) de 3-7 [mm] y una población de microfenocristales ($\sim 20\%$) de aproximadamente 0.03- 3[mm].

Granularidad: Porfídica, se lograr observar la mineralogía en muestras de mano obtenidas durante terreno.

Tamaño de los cristales [0.03 – 7 mm]: la muestra presenta micro y fenocristales de, cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, biotita, óxidos de Fe y Fe-Ti; ordenados de manera decreciente de acuerdo con % de roca total.

Índice de color: Leucocrática, aproximadamente un 13 % de minerales máficos en la muestra.

Análisis roca completa

Mineralogía primaria

Mineral	Volumen (%)	Tamaño (mm)	Estructuralidad	Integridad	Observaciones generales
Cuarzo	45	0.1-5	Anhedrales con hábito granular		Cristales incoloros de bajo relieve con presencia de fracturas y poros intersticiales a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades grisáceas de 1°orden.
Plagioclasa	18	0.5-3	Subhedrales con hábito tabular.		Cristales incoloros de bajo relieve y con presencia de abundantes fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades grises de 1° orden y maclas polisintéticas. Además, se observan zonaciones en los núcleos de los cristales.
Feldespato potásico	24	0.5 -7	Anhedrales		Cristales grises con bajo relieve y fracturas a nícoles paralelos. A nícoles

					cruzados se observan tonalidades grises de 1° orden y maclas tipo Carlsbad (ortoclasa). Se observan intercrecimiento de chadacristales de cuarzo y biotita. Además, formando parte de la masa fundamental de la roca.
Biotita	10	0.05-3	Subhedrales con hábito tabular.		Cristales marrones de relieve moderado y pleocroísmo fuerte en tonalidades marrones a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades marrones de 1°-2° orden. Algunos minerales opacos se depositan en planos de exfoliación.
Óxidos de Fe y Fe-Ti.	3	0.03-0.2-	Anhedrales		Se encuentran asociados a biotita y cuarzo

Mineralogía secundaria

No se observa mineralogía secundaria en la muestra.

Descripción de texturas presentes

Textura intercrecimiento y tamaño relativo.

- Plagioclasa: se observan texturas glomero- y cumulo porfírica (cúmulos de cristales de plagioclasa, óxidos de Fe y Fe-Ti).
- Cuarzo: textura consertal con bordes de cristales con aspecto aserrado.
- Biotita: texturas glomero- y cumulo porfírica con cúmulos de cristales de biotita, óxidos de Fe y Fe-Ti.

- Feldespato potásico: textura poikilitica con intercrecimiento de chacrtales de cuarzo y biotita.

Textura de desequilibrio.

Cuarzo: se observa textura de embahiamiento, morfología cóncava en borde de cristal de cuarzo con reabsorción de feldespato potásico.

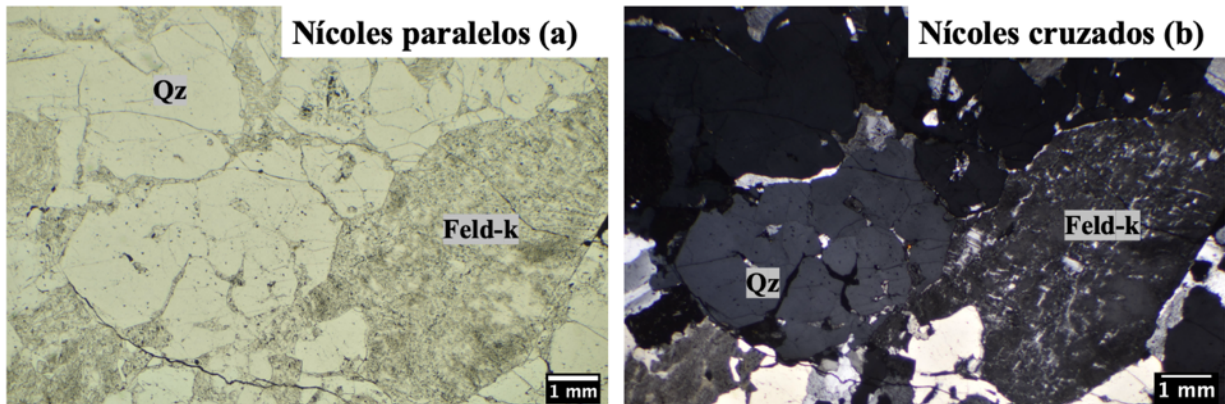


Figura 24C. Fotomicrografía a microscopio óptica y luz transmitida tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados con textura de embahiamiento en cristal de cuarzo con zoom de 2.5X.

Feldespato potásico: textura pertítica donde se observa lamelas de plagioclasa en cristal de feldespato potásico.

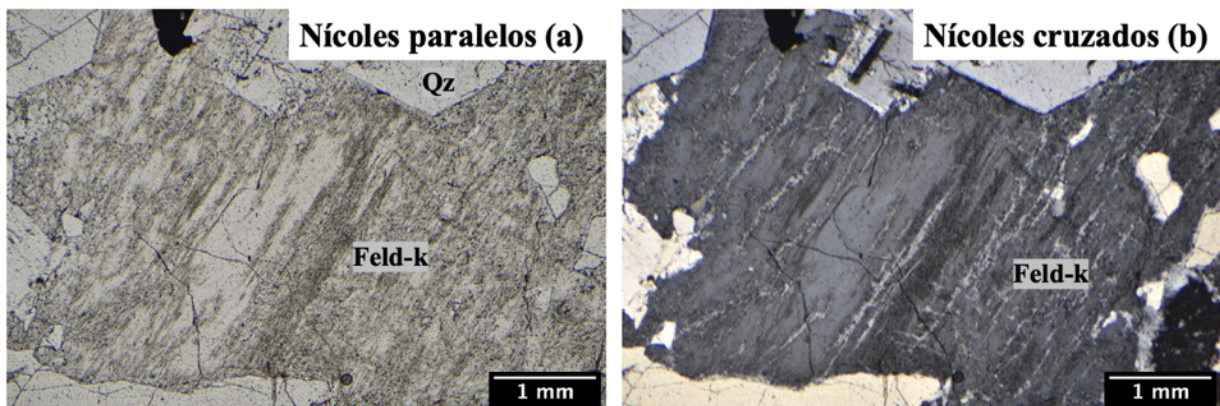


Figura 25C. Fotomicrografía a microscopio óptica y luz transmitida tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados textura pertítica en cristal de feldespato (exsolución de feldespato sódico dentro de cristal de feldespato potásico de forma lamelar o en forma de venas) con un zoom de 10X.

Plagioclasa: se observa zonaciones en núcleo de los fenocristales con variación de tonalidades de forma concéntricas presente en los núcleos de los cristales.

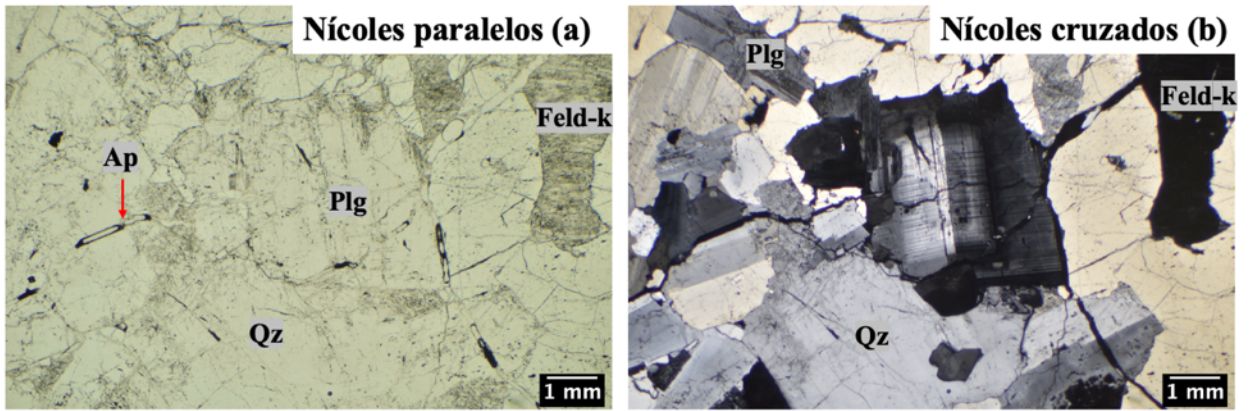


Figura 26C. Fotomicrografía a microscopio óptica y luz transmitida tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados de cristal de plagioclasa que exhibe zonación con un zoom de 2.5X.

Imágenes de la muestra



Figura 27C. Muestra de color rosáceo porfídica y tamaño de 15.9 [cm].

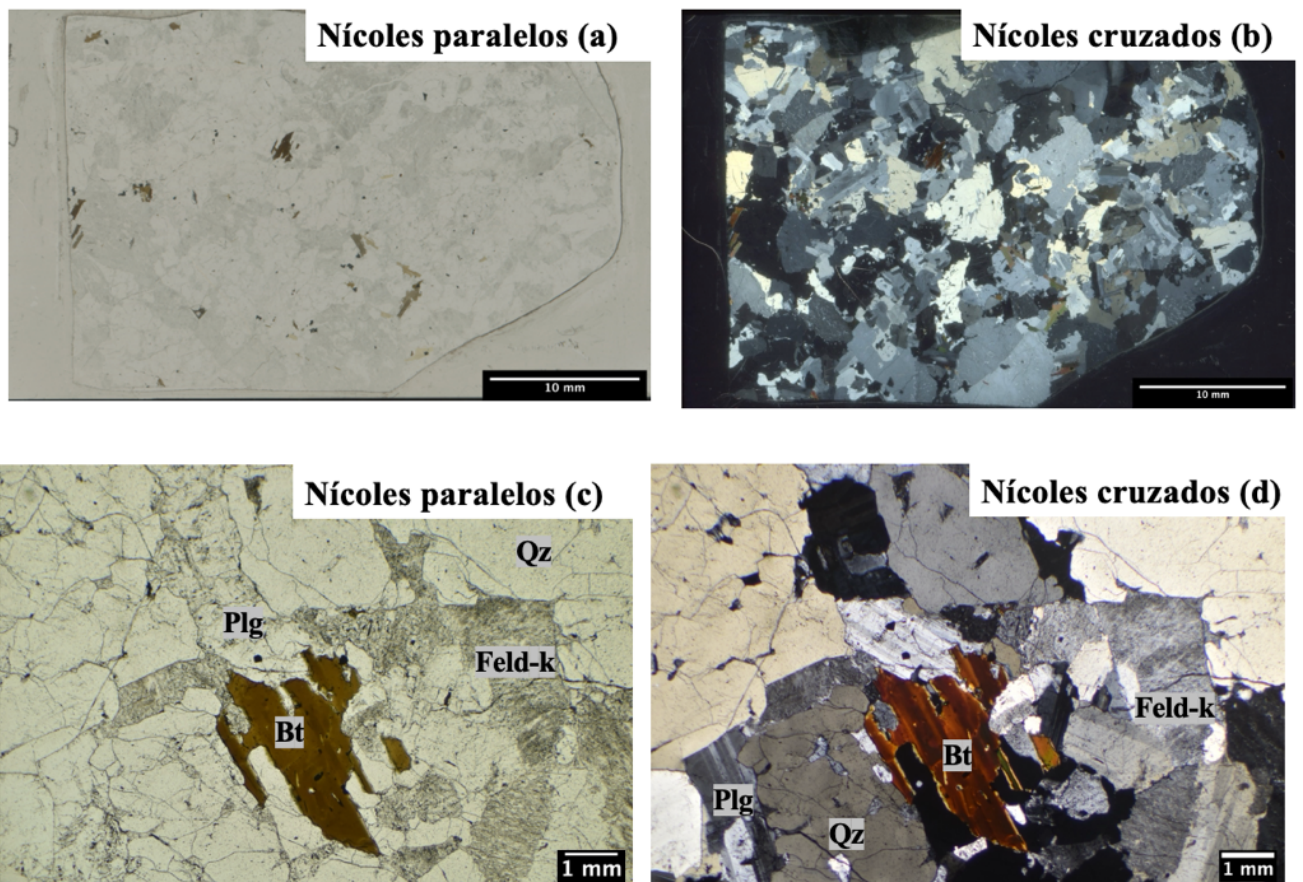


Figura 28C. Fotomicrografías muestra *nd-02* tanto a nicoles paralelos como nicoles cruzados. (a) y (b) Corte transparente y pulido a ~30 micras de la muestra analizada. Se observa una fábrica isótropa y disposición homogéneas de los cristales. (c) y (d) Fotomicrografía microscopio óptico luz transmitida con zoom de 2.5X. Se observa parte de la mineralogía primaria descrita (cuarzo, biotitay feldespatos)

Código muestra: *nd-03*

Cristalinidad: Holocristalina, se observa un gran % de feno- y microcristales en una masa fundamental de < 10%.

Tamaño relativo de los cristales: inequigranulares; los cristales en la muestra presentan distintos tamaños. Se observa una población de fenocristales (~40 %) de 1-4 [mm] y una población de microfenocristales (~60%) de aproximadamente 0.01- 1 [mm].

Granularidad: Porfídica, se lograr observar la mineralogía en muestras de mano obtenidas durante terreno.

Tamaño de los cristales [0.01 – 4 mm]: la muestra presenta micro y fenocristales de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, biotita, óxidos de Fe y Fe-Ti; ordenados de manera decreciente de acuerdo con % de roca total.

Índice de color: Leucocrática, aproximadamente un 8 % de minerales máficos en la muestra.

Análisis roca completa

Mineralogía primaria

Mineral	Volumen (%)	Tamaño (mm)	Estructuralidad	Integridad	Observaciones generales
Cuarzo	50	4	Anhedrales con hábito granular.		Cristales incoloros de bajo relieve con presencia de alto % de poros intersticiales a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades grises de 1° orden. Se identifican dos poblaciones de tamaño, una como fenocristales (>1 [mm]) y la segunda como microlitos (< 1 [mm]).
Plagioclasa	17	0.3-3	Anhedral a Subhedrales con hábito tabular		Cristales incoloros de bajo relieve y con presencia de fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades grises a amarillas de 1° orden con maclas tipo polisintéticas y periclina. Se observan zonaciones en los núcleos de los cristales e

					intercrecimiento de microlitos de biotita.
Feldespatopotásico	25	4	Anhedrales		Cristales grises de bajo relieve y con presencia de fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades grises de 1° orden. Se identifican intercrecimiento de microlitos de plagioclasa y biotita.
Biotita	6	0.05-2	Subhedrales con hábito tabular.		Cristales marrones de relieve moderado clivaje en una dirección, con presencia de fracturas y pleocroísmo fuerte en tonalidades marrones a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observa tonalidades rosadas-marrones anaranjadas de 1°-2° orden.
Óxidos de Fe y Fe-Ti	2	0.05-0.5	Anhedrales		Se observan asociados a cristales de biotita y así como a cristales aislados.

Mineralogía secundaria

No se observa mineralogía secundaria en la muestra.

Descripción de texturas presentes

Texturas intercrecimiento y tamaño relativo.

- Biotita: se observan texturas glomero- y cumuloporfírica (cúmulos de biotita, óxidos de Fe y Fe-Ti).
- Plagioclasa: se observa textura poikilitica con intercrecimiento de chadacristales de apatito, biotita, óxidos de Fe y Fe-Ti. Además, de textura glomeroporfírica (cúmulos de cristales de plagioclasa).
- Feldespato potásico: se observa textura poikilitica con intercrecimiento de chadacristales de plagioclasa y biotita.
- Cuarzo: se observa textura consertal con bordes de los cristales aserrados.

Texturas de desequilibrio.

Biotita: se observan bordes de reacciones asociados a cristales de esta fase mineral.

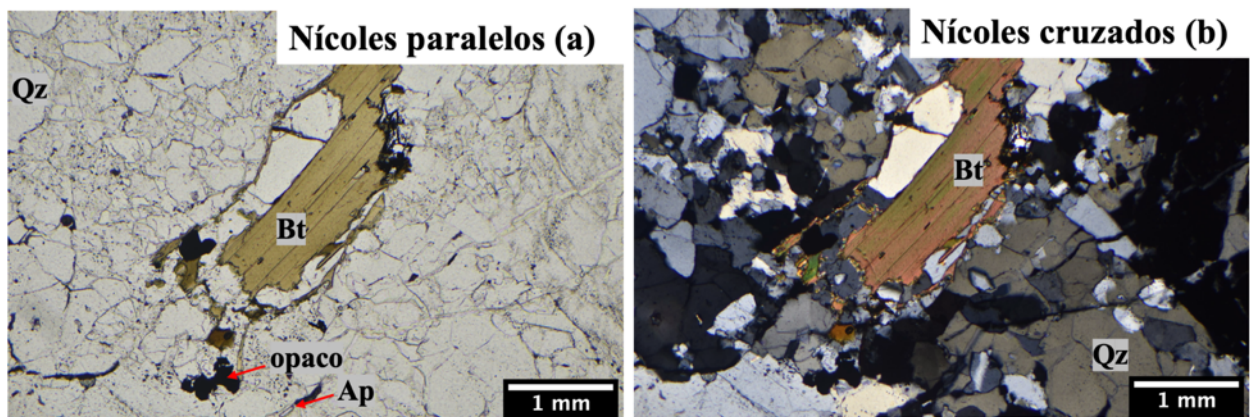


Figura 29C. Fotomicrografía a microscopio óptica y luz transmitida tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados de cristal de biotita que exhibe bordes de reacción con un zoom de 5X.

Plagioclasa: se observa zonaciones en núcleo de los fenocristales con variación de tonalidades de forma concéntrica presente en los núcleos de los cristales.

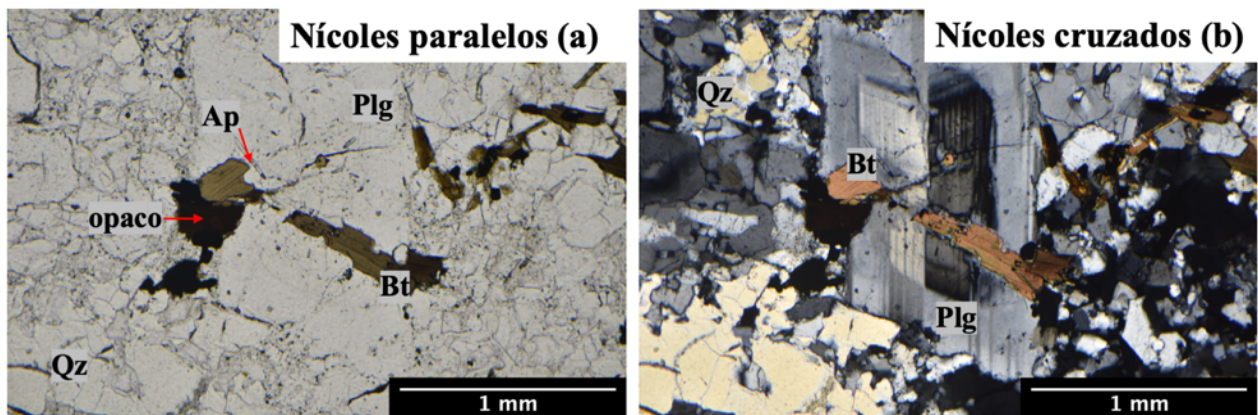


Figura 30C. Fotomicrografía a microscopio óptica y luz transmitida tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados de cristal de plagioclasa que exhibe zonación con un zoom de 5X.

Imágenes de la muestra



Figura 31C. Muestra *nd-03* de color blanquecino rosáceo porfídica y tamaño 22.3 [cm].

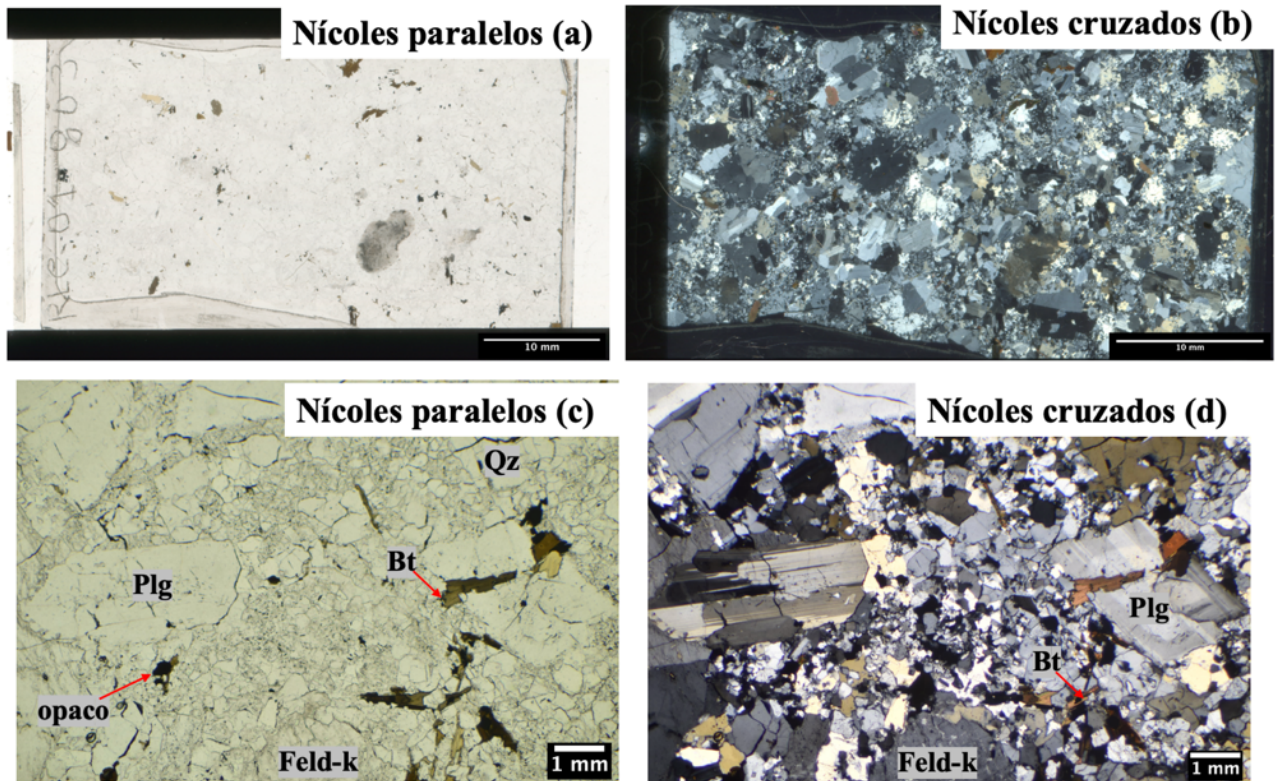


Figura 32C. Fotomicrografías muestra *nd-03* tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados. (a) y (b) Corte transparente y pulido a ~30 micras de la muestra analizada. Se observa una fábrica isótropa y disposición homogéneas de los cristales. (c) y (d) Fotomicrografía microscopio óptico luz transmitida con zoom de 2.5X. Se observa parte de la mineralogía primaria descrita (cuarzo, biotita, óxidos de Fe, Fe-Ti y feldespatos)

Código muestra: *nd-06*

Cristalinidad: Holocristalina, se observa un gran % de feno- y microcristales en una masa fundamental de < 10%.

Tamaño relativo de los cristales: inequigranulares; los cristales en la muestra presentan distintos tamaños. Se observa una población de fenocristales (~20 %) de 2-7 [mm] y una población de microfenocristales (~80%) de aproximadamente 0.07-1 [mm].

Granularidad: Porfídica, se lograr observar la mineralogía en muestras de mano obtenidas durante terreno.

Tamaño de los cristales [0.07 – 7 mm]: la muestra presenta micro y fenocristales de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, biotita, óxidos de Fe y Fe-Ti; ordenados de manera decreciente de acuerdo con % de roca total.

Índice de color: Leucocrática, aproximadamente un 5 % de minerales máficos en la muestra.

Análisis roca completa
Mineralogía primaria

Mineral	Volumen (%)	Tamaño (mm)	Estructuralidad	Integridad	Observaciones generales
Cuarzo	40	0.1-3	Anhedrales con hábito granular.		Cristales incoloros de bajo relieve y con fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades grises de 1° orden. Se observan dos familias (0.1-1 [mm] y 1-3 [mm]). También, se observan como relleno de fracturas en cristales de plagioclasa.
Plagioclasa	19	0.5-2	Anhedrales a subhedrales con hábito tabular.		Cristales incoloros de bajo relieve con alto % de fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades grises de 1° orden y maclas tipo polisintética y Carlsbad. También, se observan zonaciones en cristales más tabulares.
Feldespatopotásico	30	0.5-7	Anhedrales		Cristales grises de bajo relieve con fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades grises de 1° orden. Se

					observan fenocristales aislados inmersos en una masa fundamental que superan los >5 mm.
Biotita	8	0.07-2	Subhedrales con hábitos tabulares.		Cristales marrones de relieve moderado, clivaje en una dirección y con presencia de fracturas. A nícoles cruzados se observan tonalidades marrones a verdosas de 1°-2° orden. Debido a los tamaños, se logran identificar dos familias (0.07-0.5 [mm] y 0.5-2 [mm]).
Titanita	< 1	0.1-0.5	Anhedrales		Cristales de tonalidades amarillas a incoloras de alto relieve con presencia de fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzado se observan tonalidades amarillas anaranjadas de 2°-3° orden, posiblemente enmascarados. Los cristales se presentan en un porcentaje ~0.3 %
Óxidos de Fe y Fe-Ti	>2	0.05-1	Anhedrales		Asociados a cristales de biotita y titanita.

*3% entre cristales de titanita y óxido de Fe y Fe-Ti.

Mineralogía secundaria

No se observa mineralogía secundaria en la muestra.

Descripción de texturas presentes

Texturas intercrecimiento y tamaño relativo.

- Biotita: se observan texturas glomero- y cumulo porfirica (cúmulos de biotita y opacos).
- Cuarzo: se observa textura consertal con bordes irregulares de los cristales.
- Feldespato potásico: se observa textura poikilitica con intercrecimiento de chadacristales de cuarzo, plagioclasa, biotita, apatito, óxidos de Fe y Fe-Ti.
- Plagioclasa: se observa textura poikilitica con intercrecimiento de chadacristales de biotita, apatito, óxidos de Fe y Fe-Ti.

Texturas de desequilibrio.

Plagioclasa: se observa zonaciones en núcleo de los fenocristales con variación de tonalidades de forma concéntrica presente en los núcleos de los cristales.

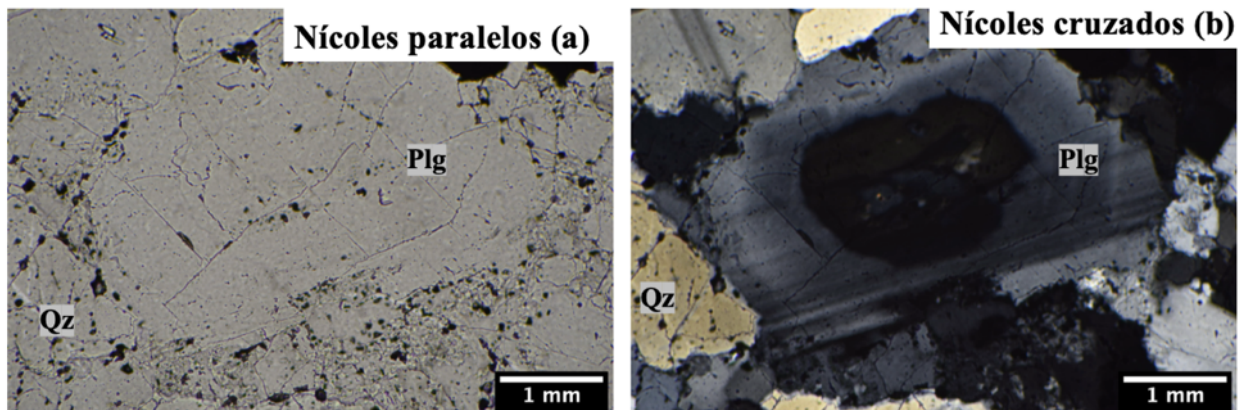


Figura 33C. Fotomicrografía a microscopio óptico y luz transmitida tanto a nicoles paralelos como nicoles cruzados de cristal de plagioclasa que exhibe zonación con un zoom de 5X.

Imágenes de la muestra



Figura 34C. Muestra *nd-06* de color blanquecino porfídica y tamaño de 14 [cm].

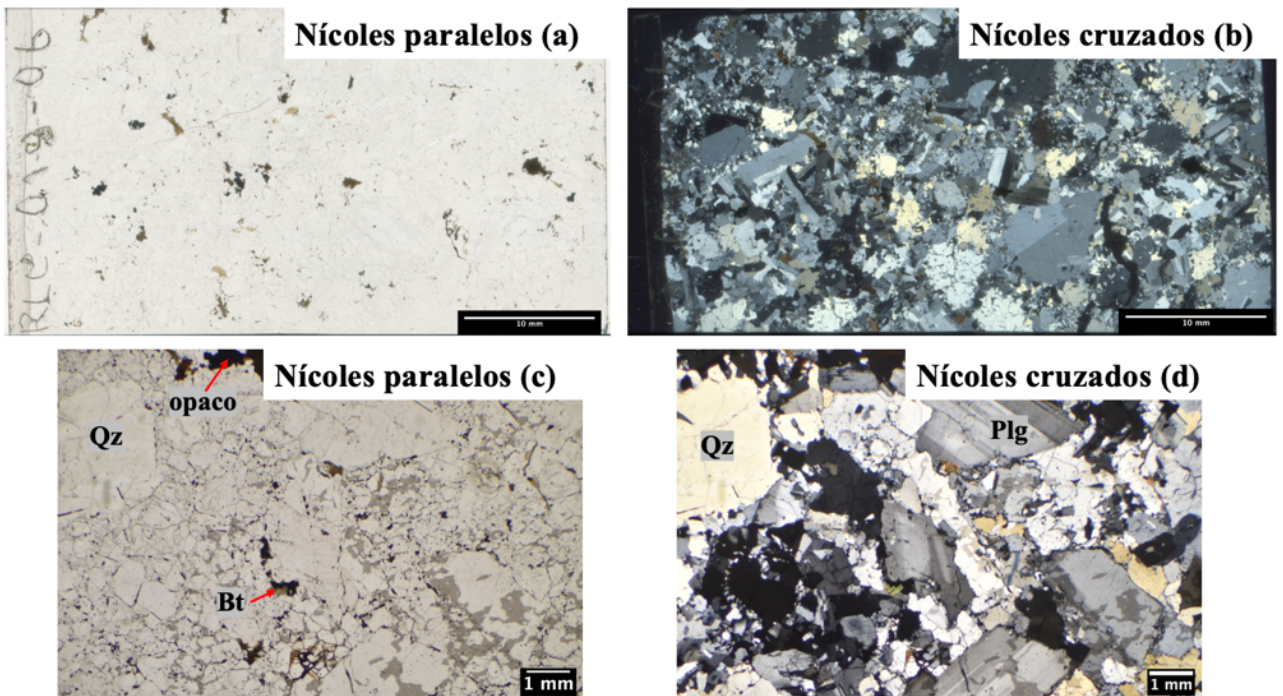


Figura 35C. Fotomicrografías muestra *nd-06* tanto a nicoles paralelos como nicoles cruzados. (a) y (b) Corte transparente y pulido a ~ 30 micras de la muestra analizada. Se observa una fábrica isótropa y disposición homogéneas de los cristales. (c) y (d) Fotomicrografía microscopio óptico luz transmitida con zoom de 2.5X. Se observa parte de la mineralogía primaria descrita (cuarzo, biotita, óxidos de Fe, Fe-Ti y plagioclasa).

Código muestra: rle-07

Cristalinidad: Holocristalina, se observa un gran % de feno- y microcristales en una masa fundamental de < 10%.

Tamaño relativo de los cristales: inequigranulares; los cristales en la muestra presentan distintos tamaños. Se observa una población de fenocristales (~40 %) de 2-4 [mm] y una población de microfenocristales (~60%) de aproximadamente 0.05- 2 [mm].

Granularidad: Porfídica, se lograr observar la mineralogía en muestras de mano obtenidas durante terreno.

Tamaño de los cristales [0.05 – 4 mm]: la muestra presenta micro y fenocristales de feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa, biotita, titanita, óxidos de Fe y Fe-Ti; ordenados de manera decreciente de acuerdo con % de roca total.

Índice de color: Leucocrática, aproximadamente un 9 % de minerales máficos en la muestra.

Análisis roca completa

Mineralogía primaria

Mineral	Volumen (%)	Tamaño (mm)	Estructuralidad	Integridad	Observaciones generales
Cuarzo	31	0.5-4	Anhedrales con hábito granular		Cristales incoloros de bajo relieve y con presencia de fracturas y alto % de poros intersticiales a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observa tonalidades grises a negros de 1° orden.
Plagioclasa	16	0.5-3	Anhedrales a subhedrales en hábito tabular.		Cristales incoloros de bajo relieve con presencia de fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades grises de 1° orden,

					maclas tipo polisintética y Carlsbad y zonaciones en los cristales.
Feldespato potásico	44	0.5-8	Anhedrales		Cristales grises de bajo relieve con presencia de fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades grises de 1° orden y maclas tipo microclina y Carlsbad.
Biotita	6	0.1-3	Anhedrales a subhedrales con hábito tabular.		Cristales marrones de relieve moderado, clivaje en una dirección, con presencia de fracturas y pleocroísmo fuerte en tonalidades marrones a nícoles paralelos. A nícoles cruzados se observan tonalidades marrones anaranjadas y verdes de 1°-2° orden.
Óxidos de Fe	~2	0.05-1	Anhedrales		Cristales asociados a biotita y feldespatos.
Titanita	~1	0.5-1	Anhedrales a Subhedrales		Cristales de tonalidades amarillas a marrones de alto relieve con

					presencia de fracturas a nícoles paralelos. A nícoles cruzados, se observan tonalidades marrones, verdes y rosadas de 2°-3° orden enmascarados.
--	--	--	--	--	---

*3 % entre minerales de titanita y óxidos de Fe.

Mineralogía secundaria

No se observa mineralogía secundaria en la muestra analizada.

Descripción de texturas presentes

Texturas intercrecimiento y tamaño relativo.

- Biotita: se observan texturas glomero- y cumuloporfírica (cúmulos de biotita, óxidos de Fe y Fe-Ti) y poikilitica con intercrecimiento de chadacrístales de apatito, zircón, óxidos de Fe y Fe-Ti.
- Plagioclasa: se observa textura poikilitica con intercrecimiento de chadacrístales de apatito, biotita, óxidos de Fe y Fe-Ti. Además, de textura glomeroporfírica (cúmulos de cristales de plagioclasa).
- Feldespato potásico: se observa textura poikilitica con intercrecimiento de chadacrístales de plagioclasa y biotita.
- Cuarzo: se observa textura consertal con bordes de los cristales aserrados.

Texturas de desequilibrio.

Biotita: se observan bordes de reacciones en fenocristales de forma tabular.

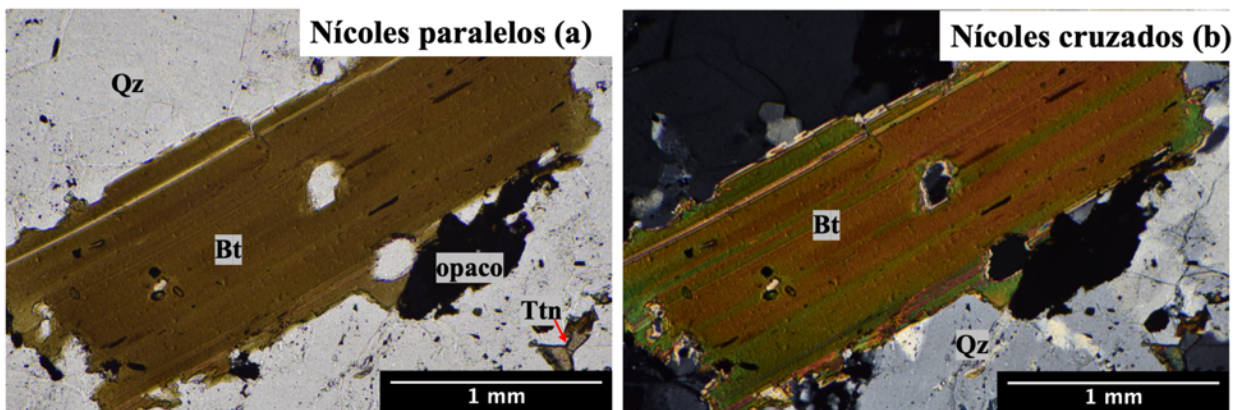


Figura 36C. Fotomicrografía a microscopio óptica y luz transmitida tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados de cristal de biotita que exhibe bordes de reacción con un zoom de 10X.

Plagioclasa: se observa zonaciones en núcleo de los fenocristales con variación de tonalidades de forma concéntricas presente en los núcleos de los cristales. Además, de textura gráfica o pegmatítica con intercrecimiento de cristales cuneiformes de cuarzo de forma vemicular dentro de cristal de plagioclasa.

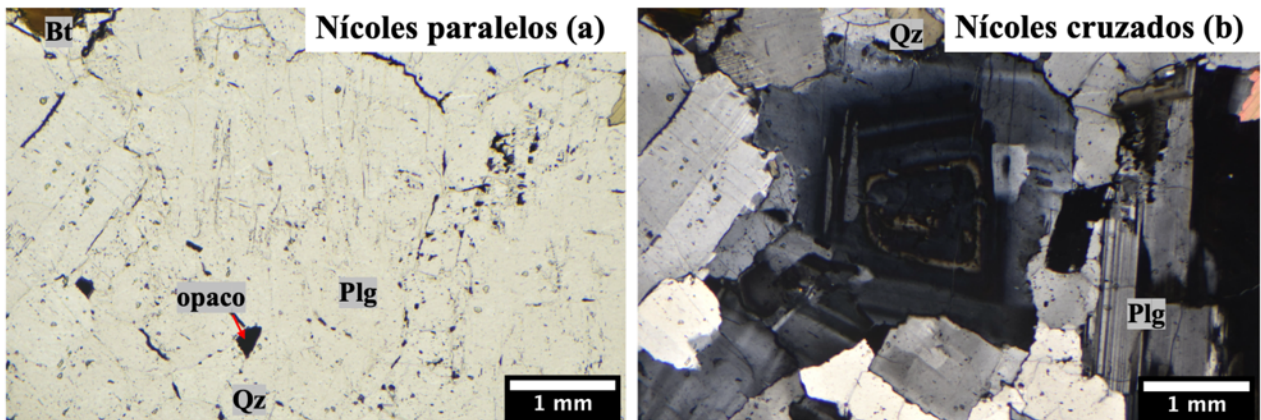


Figura 37C. Fotomicrografía a microscopio óptica y luz transmitida tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados de cristal de plagioclasa que exhibe zonación con un zoom de 5X.

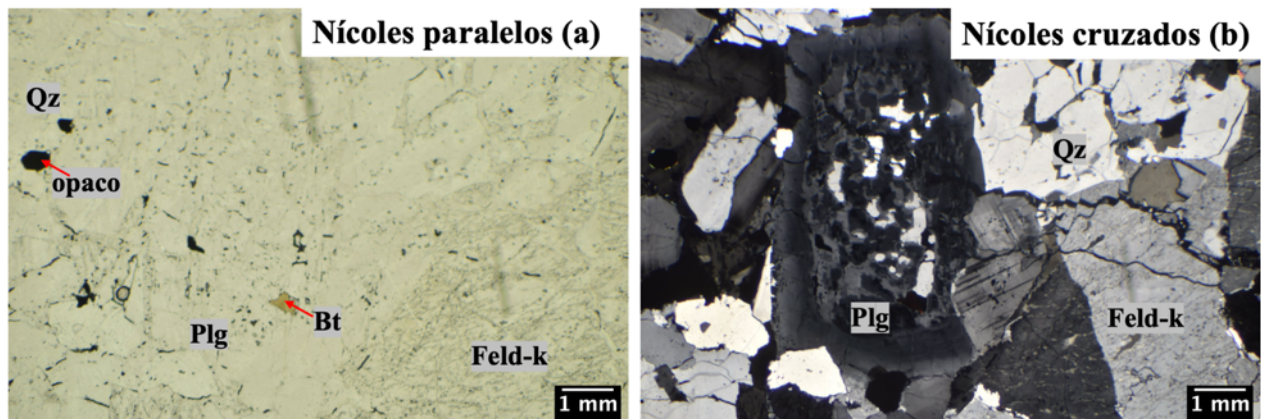


Figura 38C. Fotomicrografía a microscopio óptica y luz transmitida tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados de textura gráfica en cristal de plagioclasa con intercrecimiento de cuarzo con zoom de 2.5X.

- Feldespato potásico: textura pertítica donde se observa lamelas de plagioclasa en cristal de feldespato potásico.

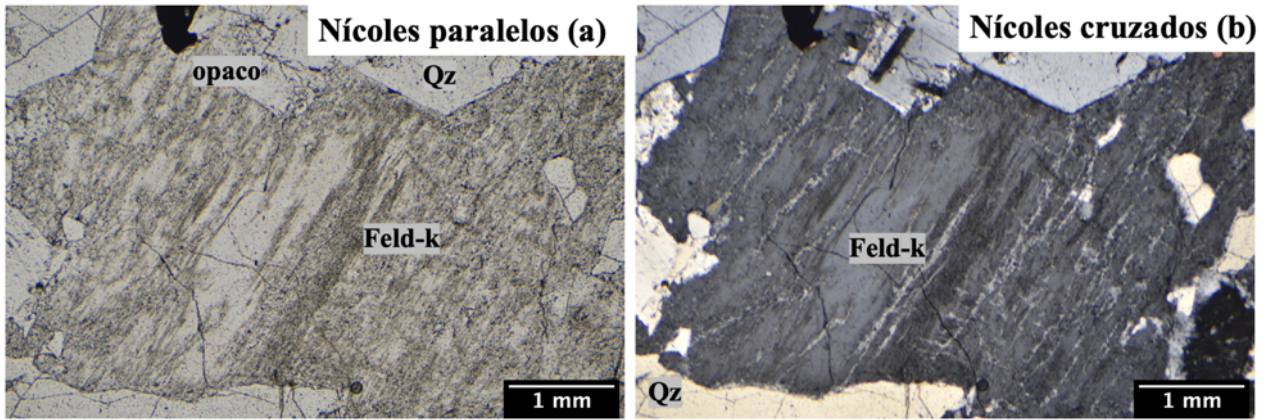


Figura 39C. Fotomicrografía a microscopio óptica y luz transmitida tanto a nícoles paralelos como nícoles cruzados textura pertítica en cristal de feldespato (exsolución de feldespato sódico dentro de cristal de feldespato potásico de forma lamelar o en forma de venas) con un zoom de 5X.

Imágenes de la muestra



Figura 40C. Muestra *nd-07* de color blanquecino poco competente porfídica y tamaño de 16.8 [cm].

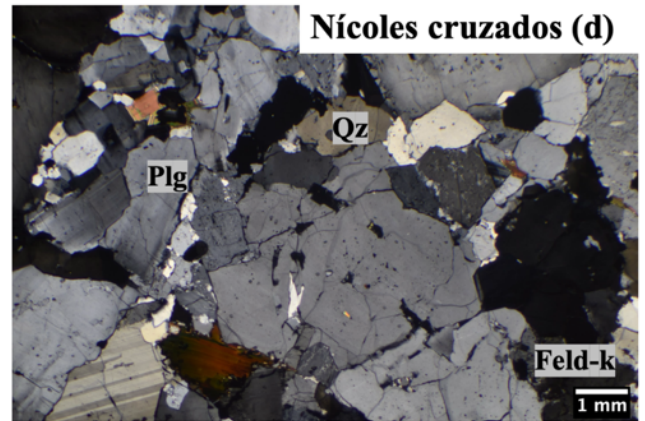
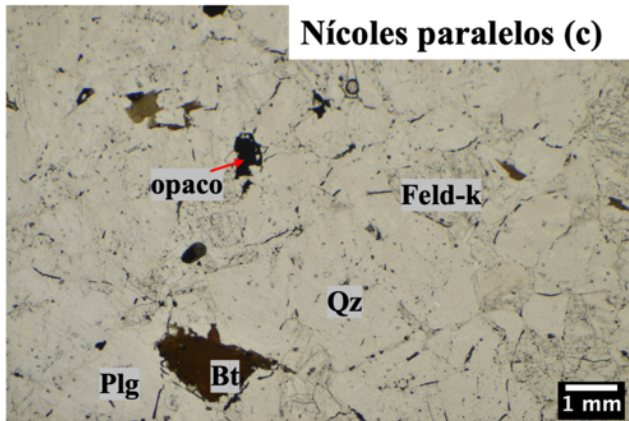
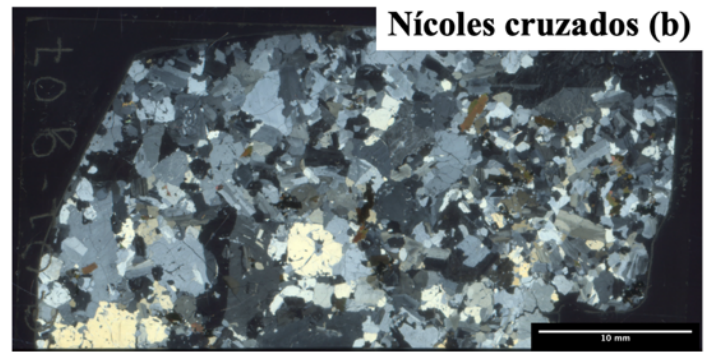


Figura 41C. Fotomicrografías muestra *nd-07* tanto a nicoles paralelos como nicoles cruzados. (a) y (b) Corte transparente y pulido a ~ 30 micras de la muestra analizada. Se observa una fábrica isótropa y disposición homogéneas de los cristales. (c) y (d) Fotomicrografía microscopio óptico luz transmitida con zoom de 2.5X. Se observa parte de la mineralogía primaria descrita (cuarzo, biotita, óxidos de Fe, Fe-Ti y plagioclasa).

ANEXOS C: DATOS GEOQUÍMICA ROCA TOTAL

Tabla 1C. Datos análisis isotopos Nd-Sr

Muestra	$^{143}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2s$ internal	Muestra	$^{87}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2s$ internal
od-01	0.512710	0.000009	od-01	0.704466	0.000011
nd-07	0.512719	0.000012	nd-07	0.704399	0.000015
nd-03	0.512708	0.000010	nd-03	0.704429	0.000010
od-03	0.512709	0.000012	od-03	0.704307	0.000017
nd-01	0.512710	0.000010	nd-01	0.704386	0.000011
od-12	0.512698	0.000014	od-12	0.704124	0.000014
od-09	0.512692	0.000012	od-09	0.704318	0.000014
od-02	0.512727	0.000009	od-02	0.704414	0.000012

Tabla 2C. Datos elementos mayores para muestras de líticos graníticos.

wt.-%	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Cr ₂ O ₃	NiO	H ₂ O-	LOI
od-01	73.14	0.32	13.87	2.02	0.03	0.52	1.20	4.07	4.32	0.07	b.d.	0.01	0.01	0.02	0.09
nd-07	72.77	0.21	14.66	1.34	0.02	0.27	1.18	4.27	4.71	0.05	b.d.	0.01	b.d.	0.00	0.03
nd-03	72.48	0.26	14.35	1.72	0.03	0.34	1.26	4.32	4.23	0.06	b.d.	0.02	0.01	0.04	0.03
od-03	74.96	0.15	13.81	0.92	0.03	0.11	0.69	4.21	4.75	0.02	b.d.	0.01	b.d.	0.02	0.01
nd-01	73.01	0.24	14.40	1.35	0.02	0.32	1.03	4.01	5.12	0.06	b.d.	b.d.	b.d.	0.02	0.11
od-12	73.87	0.28	13.64	1.86	0.02	0.39	1.20	3.35	5.09	0.05	b.d.	0.01	b.d.	0.05	0.45
od-09	72.50	0.33	13.94	2.16	0.02	0.48	1.49	3.50	4.93	0.06	b.d.	0.01	b.d.	0.09	0.42
od-02	63.03	0.81	16.44	4.97	0.06	1.65	3.78	4.86	3.32	0.22	b.d.	0.01	b.d.	0.13	0.34

Tabla 3C. Datos elementos mayores normalizados líticos graníticos *rdm*.

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
73.45	0.33	13.93	2.03	0.03	0.52	1.21	4.09	4.34	0.07
73.14	0.22	14.74	1.35	0.03	0.28	1.19	4.29	4.73	0.05
73.18	0.26	14.49	1.73	0.03	0.34	1.28	4.36	4.27	0.06
75.21	0.15	13.86	0.92	0.04	0.11	0.70	4.22	4.77	0.02
73.34	0.24	14.46	1.36	0.02	0.32	1.03	4.02	5.14	0.06
74.04	0.28	13.67	1.87	0.02	0.39	1.21	3.36	5.10	0.05
72.93	0.33	14.02	2.17	0.03	0.48	1.50	3.52	4.95	0.07
63.58	0.81	16.58	5.01	0.06	1.66	3.81	4.90	3.35	0.23

Tabla 4C. Datos de elementos mayores para vidrio en muestra *rln*. Datos obtenidos de Contreras-Hidalgo *et al.* 2022

wt% oxidos										
Muestra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	MgO	P ₂ O ₅
Vidrio-rln	73.4	14.6	1.19	0.8	4.89	4.09	0.26	0.08	0.22	0.05
Vidrio-rdm	76.7	12.93	0.72	0.58	3.71	4.62	0.15	0.05	0.1	0.07

Tabla 5C. Datos de elementos mayores para muestras de *rle*, *rln*, *igcb* y *igsp*. Datos obtenidos de Hildreth *et al.*, 2010

wt%	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
rle-1	75.6	0.15	13.28	0.79	0.05	0.24	0.62	4.41	4.42	0.05
rle-2	75.70	0.18	13.23	0.87	0.07	0.12	0.64	4.27	4.44	0.05
rle-3	75.80	0.18	13.15	0.87	0.07	0.11	0.65	4.30	4.45	0.05
rle-4	75.7	0.17	13.25	0.85	0.06	0.14	0.66	4.22	4.48	0.05
rln-1	74	0.26	14.09	1.21	0.08	0.23	0.79	4.78	4.14	0.06
rln-2	73.4	0.26	14.60	1.19	0.08	0.22	0.80	4.89	4.09	0.05
rln-3	73.9	0.26	14.18	1.16	0.08	0.21	0.81	4.76	4.12	0.06
rln-4	73.8	0.26	14.12	1.18	0.08	0.23	0.85	4.88	4.10	0.06
igcb-1	66.2	0.63	16.49	3.33	0.10	1.01	3.04	5.28	3.46	0.18
igcb-2	68.3	0.57	15.94	2.79	0.09	0.80	2.17	4.84	3.95	0.16
igcb-3	72.2	0.39	14.77	1.79	0.09	0.37	0.90	5.05	3.97	0.09
igcb-4	70.6	0.51	15.87	2.06	0.02	0.54	1.39	4.15	4.33	0.11
igsp-1	70.2	0.49	15.27	2.31	0.04	0.36	1.48	5.01	4.39	0.09
igsp-2	64.6	0.66	16.74	4.26	0.12	1.46	3.80	4.97	2.72	0.23
igsp-3	67.5	0.78	15.71	3.5	0.10	0.70	2.28	4.79	7.03	0.21
igsp-4	69.9	0.52	15.63	2.53	0.03	0.29	1.38	4.69	4.49	0.10

ANEXOS D: DATOS ELEMENTOS MINERALES OPACOS SEM

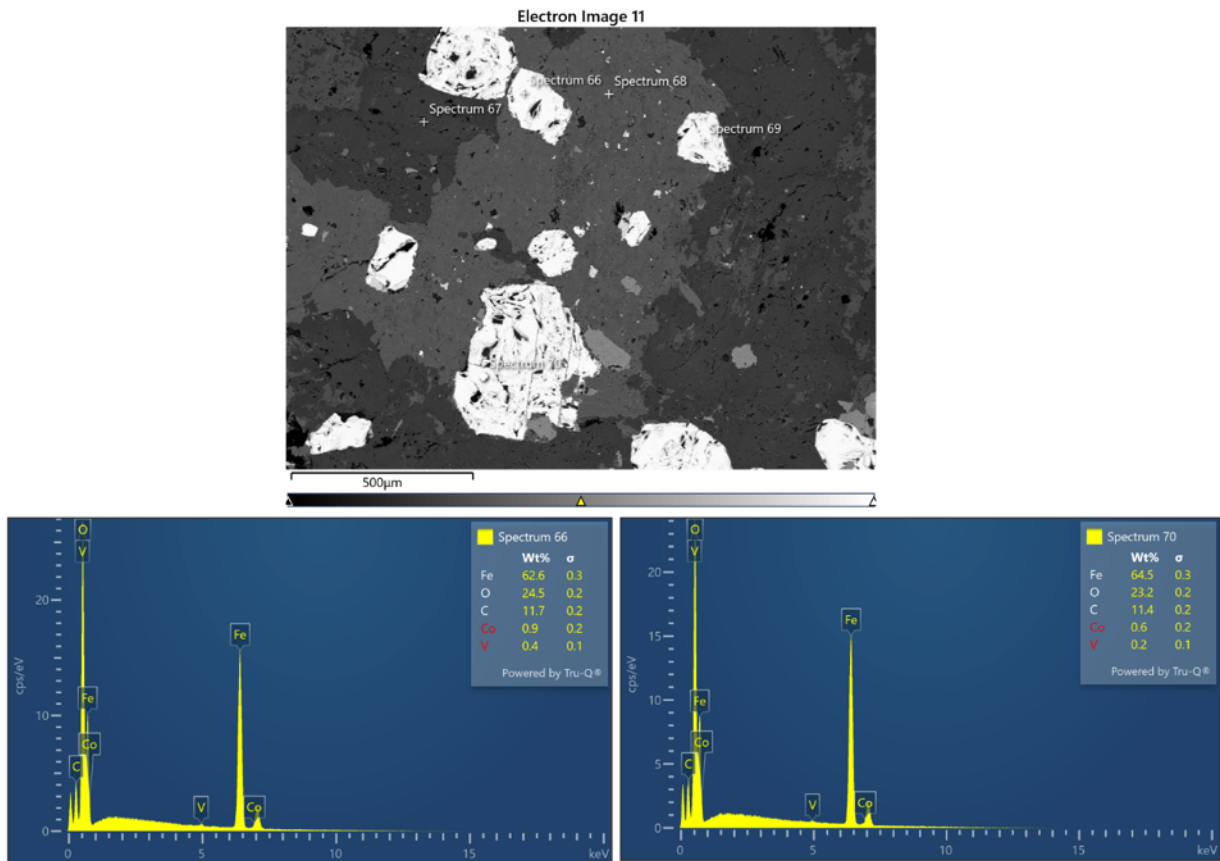


Figura 1D. Fotomicrografía SEM lítico granítico grupo 1 y análisis elemental de minerales opacos.

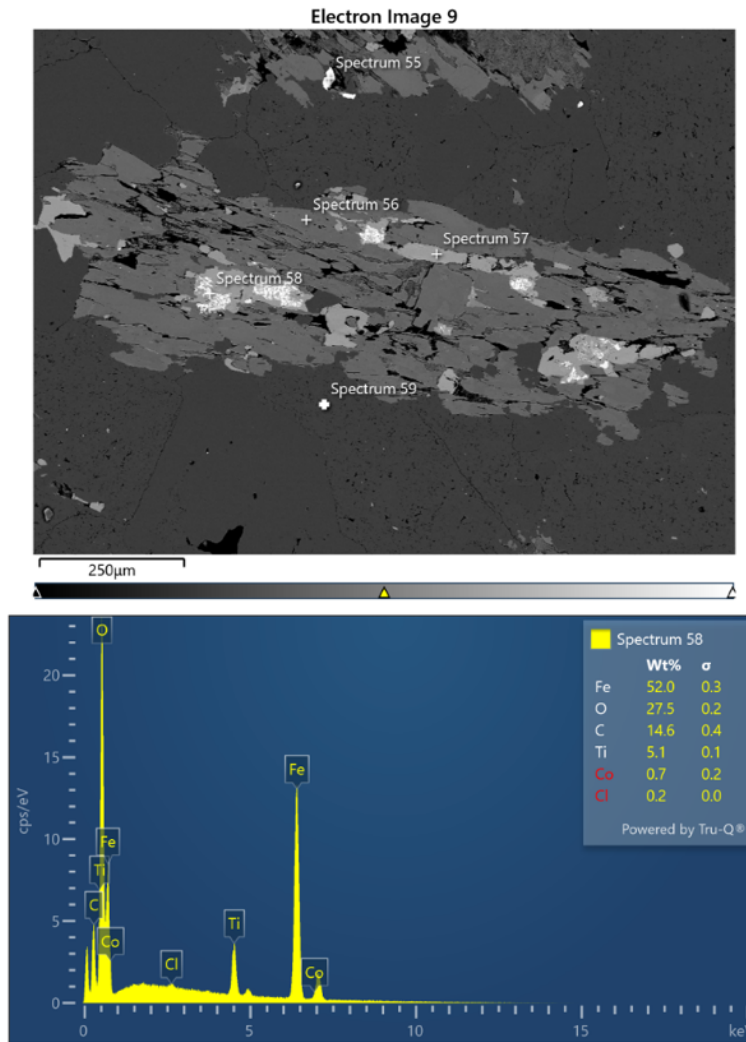


Figura 2D. Fotomicrografía SEM lítico granítico grupo 1 y análisis elemental de minerales opacos.

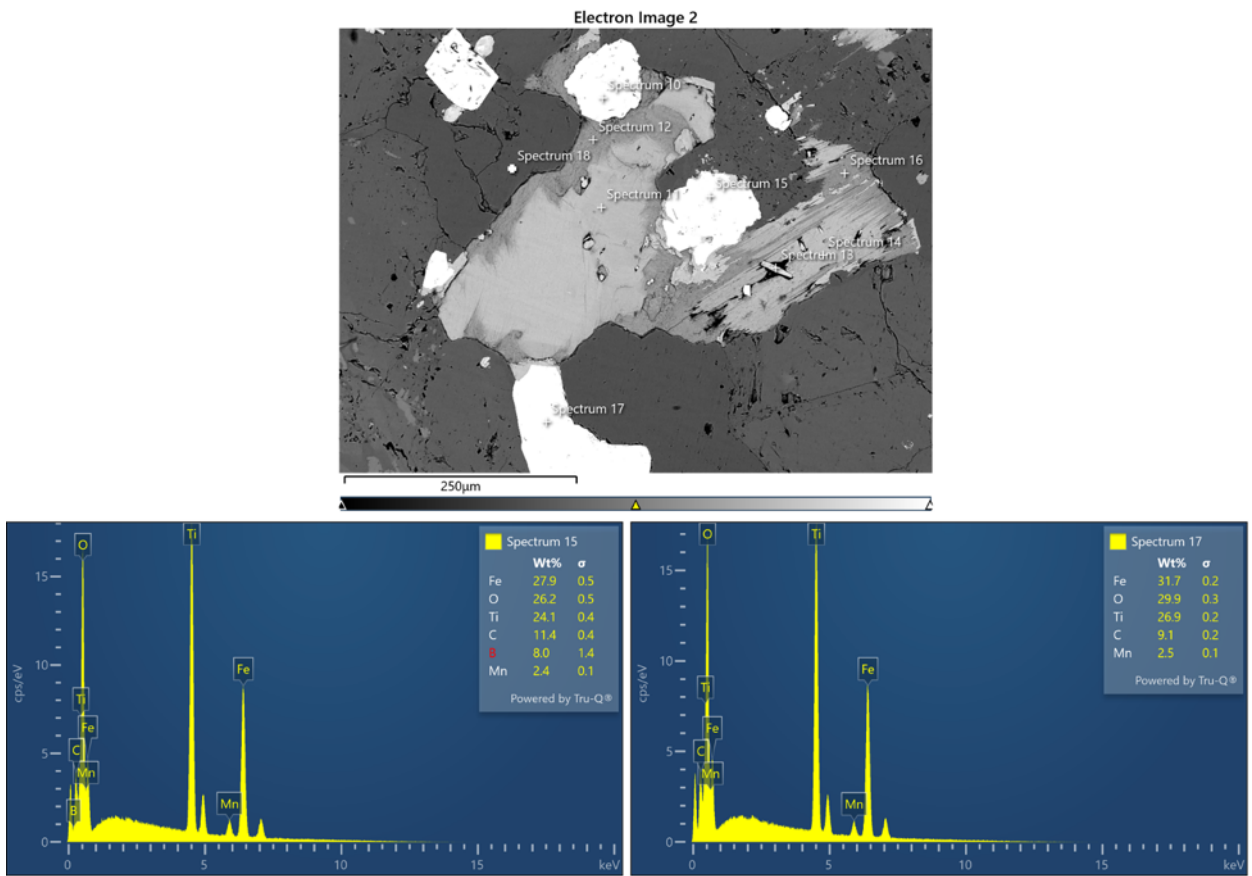


Figura 3D. Fotomicrografía SEM lítico granítico grupo 1 y análisis elemental de minerales opacos.

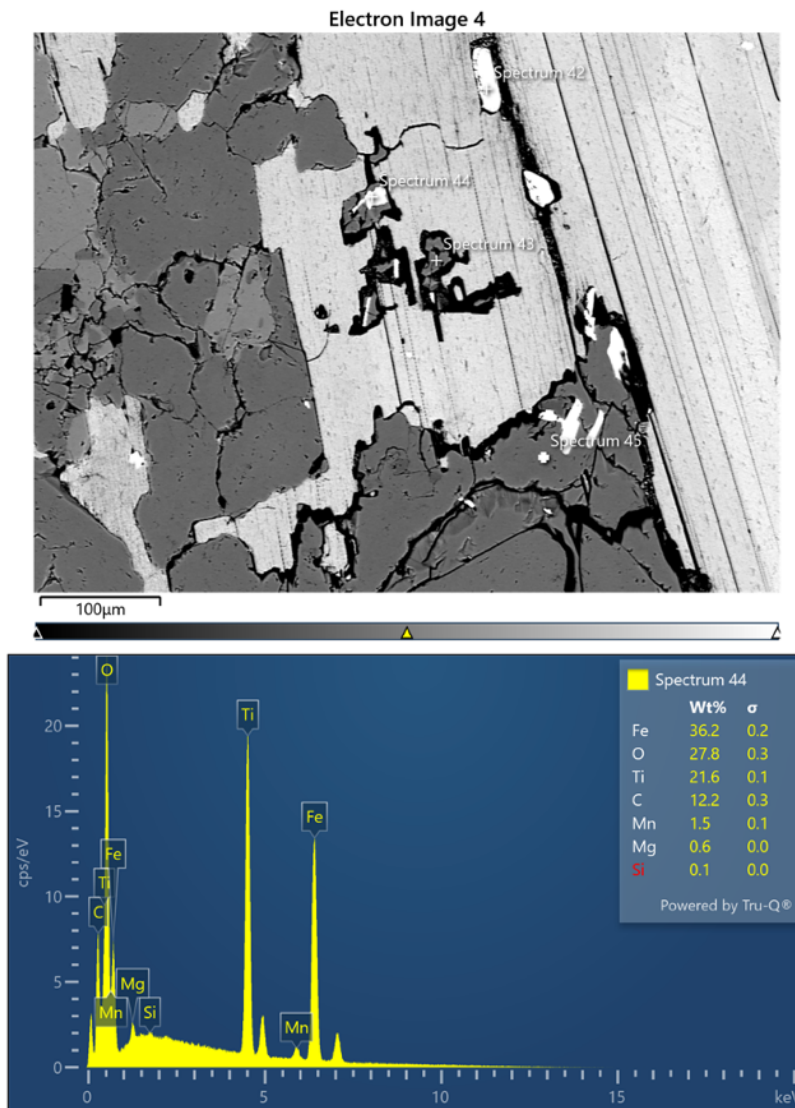


Figura 4D. Fotomicrografía SEM lítico granítico grupo 2 y análisis elemental de minerales opacos.

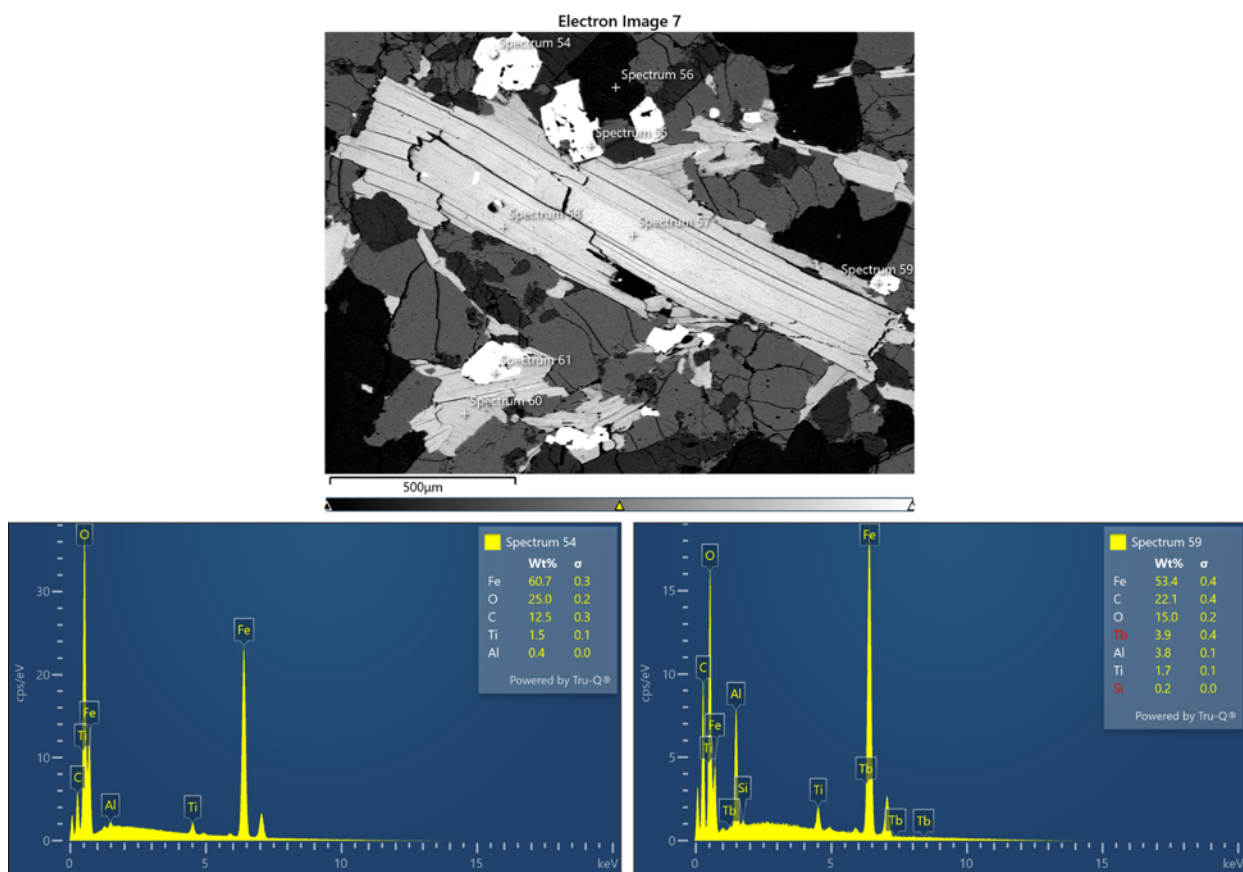


Figura 5D. Fotomicrografía SEM lítico granítico grupo 2 y análisis elemental de minerales opacos.