



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA



CRITERIOS GEOLÓGICOS USADOS PARA EL RECONOCIMIENTO DE UN DEPÓSITO DE TIERRAS RARAS EN REGOLITO, RÍO LÍA, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE

Memoria para optar al Título de Geólogo

Cristóbal Berrocal Becker

Profesor Patrocinante: Dr. Osvaldo Miguel Rabbia Dalmaso
Profesional Guía: Sra. Ximena Alejandra Valin Rivas
Profesores Comisión: Msc. Abraham Elías González Martínez
Dra. Verónica Laura Oliveros Clavijo

Concepción, 2021

A mis padres Verónica y Germain



ÍNDICE

Página

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Presentación	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Ubicación y accesos	1
1.4. Metodología de trabajo	3
1.4.1. Etapa de gabinete	3
1.4.2. Estudio petrográfico macroscópico	3
1.4.3. Estudio petrográfico de secciones delgadas	3
1.4.4. Estudio de identificación de minerales que contienen REE	3
1.4.5. Estudio geoquímico	4
1.4.6. Etapa analítica	4
1.5. Trabajos anteriores	5
1.6. Agradecimientos	7
2. TIERRAS RARAS	8
2.1. Generalidades	8
2.2. Mineralogía	10
2.3. Depósitos de REE	12
2.3.1. Carbonatitas	12
2.3.2. Rocas ígneas alcalinas	13
2.3.3. Depósitos de vetillas y skarn	14
2.3.4. Placeres	15
2.3.5. Lateritas	15
2.3.6. Bauxitas	15
2.3.7. Depósitos de REE alojado en regolito	16
2.4. Usos y aplicaciones	17
2.4.1. Imanes	18
2.4.2. Fósforos	20
2.4.3. Catalizadores de craqueo de fluidos (FCC)	20
2.4.4. Convertidores catalíticos	20
2.4.5. Almacén de energía	20
2.4.6. Medios de pulido	21
2.5. Aspectos económicos	21
2.5.1. Producción	21
2.5.2. Reservas	22
2.5.3. Reciclaje	22
3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	25

4. GEOLOGÍA LOCAL	30
4.1. Petrografía	31
4.1.1. Unidades metamórficas	31
4.1.1.1. Basamento metamórfico	31
4.1.1.2. Anfibolita	33
4.1.1.3. Migmatita	33
4.1.2. Unidades intrusivas	35
4.1.2.1. Tonalita de anfíbol y biotita	35
4.1.2.2. Tonalita de biotita	37
4.1.2.3. Dique diorítico	39
4.1.2.4. Dique de microdiorita cuarcífera	40
4.1.2.5. Dique aplítico	41
4.2. Identificación de minerales que contienen REE	42
4.2.1. Anfibolita	42
4.2.1.1. Mineralogía modal	42
4.2.1.2. Cuantificación de elementos de REE en anfíbol	44
4.2.2. Migmatita	44
4.2.2.1. Mineralogía modal	44
4.2.2.2. Cuantificación de elementos de REE en allanita	45
4.2.3. Tonalita de biotita	46
4.2.3.1. Mineralogía modal	46
4.2.3.2. Cuantificación de elementos de REE en allanita	46
4.2.4. Tonalita de anfíbol y biotita	47
4.2.4.1. Mineralogía modal	47
4.2.4.2. Cuantificación de elementos de REE en allanita	49
4.2.4.3. Cuantificación de elementos de REE en titanita	49
4.2.5. Dique diorítico	50
4.2.5.1. Mineralogía modal	50
4.2.5.2. Cuantificación de elementos de REE en allanita	51
4.2.5.3. Cuantificación de elementos de REE en apatito	52
4.3. Regolito	52
4.3.1. Clima regional y geomorfología	53
4.3.2. Perfil meteorizado	54
5. GEOQUÍMICA DE TIERRAS RARAS	57
5.1. Aspectos generales	57
5.2. Sondaje RLS-07	58
5.2.1. Caracterización	58
5.2.2. Desorciones en regolito	60
5.2.3. Diagrama de REE + Y	61
5.2.4. Análisis de datos	62
5.3. Sondaje RLS-08	63
5.3.1. Caracterización	63
5.3.2. Desorciones en regolito	65
5.3.3. Diagrama de REE + Y	67

5.3.4. Análisis de datos	68
5.4. Sondaje RLS-09	69
5.4.1. Caracterización	69
5.4.2. Desorciones en regolito	71
5.4.3. Diagrama de REE + Y	72
5.4.4. Análisis de datos	74
6. DISCUSIONES	75
6.1. Evaluación del potencial para desarrollar un depósito de REE en regolito de la unidad tonalita de anfíbol y biotita ...	75
6.2. Evaluación del potencial para desarrollar un depósito de REE en regolito de la unidad anfibolita	78
6.3. Evaluación del potencial para desarrollar un depósito de REE en regolito de la unidad migmatita	79
7. CONCLUSIÓN	80
8. REFERENCIAS	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Mapa de ubicación y accesos del área de estudio	2
2. 1. Concentración de REE que muestra el patrón “zigzag” de la regla de Oddo-Harkins	9
2. 2. Contracción lantánida	10
2. 3. Cristales de sejkoraita-(Y)	11
2. 4. Principales tipos de depósitos de REE según el contexto tectónico	12
2. 5. Diagrama de REE de muestras representativas de varios depósitos	13
2. 6. Distribución de depósitos de REE alojado en regolito en China	17
2. 7. Aplicaciones globales de REE	18
2. 8. Aplicaciones de imanes de (NdFeB) en el mercado global	19
2. 9. Participación de China en la producción global y reservas mundiales de REE	22
2. 10. Contribución de los países europeos en la generación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos	23
3. 1. Distribución general del basamento cristalino en la Cordillera de la Costa de Chile central	25
3. 2. Mapa geológico con la división de las subunidades definidas por Creixell	27
4. 1. Mapa geológico a escala 1:24.000 del área de estudio	30
4. 2. Diagrama de clasificación Q-A-P de las muestras de rocas intrusivas en río Lía	35

4.	3.	(a) Imagen en falso color de anfibolita. (b) imagen en falso color de anfibolita con mineralogía modal recalculada.	43
4.	4.	Espectro de composición de fase anfíbol en anfibolita	44
4.	5.	Imagen en falso color de migmatita	45
4.	6.	Espectro de composición de fase allanita en migmatita	45
4.	7.	Imagen en falso color de tonalita de biotita	46
4.	8.	Espectro de composición de fase allanita en tonalita biotita.....	47
4.	9.	Imagen en falso color de tonalita de anfíbol y biotita	48
4.	10.	Espectro de composición de fase allanita en tonalita de anfíbol y biotita	49
4.	11.	Espectro de composición de fase titanita en tonalita de anfíbol y biotita	50
4.	12.	Imagen en falso color del dique diorítico	51
4.	13.	Espectro de composición de fase allanita en el dique diorítico	51
4.	14.	Espectro de composición de fase apatito en el dique diorítico	52
4.	15.	Perfil meteorizado esquemático	56
5.	1.	Perfil meteorizado de sondaje RLS-07	59
5.	2.	Concentración promedio de REE de las diferentes litologías y horizontes del sondaje RLS-07	61
5.	3.	Variaciones verticales de índices de REE en sondaje RLS-07	63
5.	4.	Perfil meteorizado de sondaje RLS-08	64
5.	5.	Concentración promedio de REE de los distintos horizontes del sondaje RLS-08	67
5.	6.	Variaciones verticales de índices de REE en sondaje RLS-08	68
5.	7.	Perfil meteorizado de sondaje RLS-09	70
5.	8.	(a) Concentración promedio de REE de los distintos horizontes del sondaje RLS-09. (b) Comparativa de la concentración promedio de REE del horizonte A del sondaje RLS-09 con la concentración promedio de REE de los horizontes A y B del sondaje RLS-07	73
5.	9.	Variaciones verticales de índices de REE en sondaje RLS-09	74
6.	1.	(a) Concentración promedio de REE del horizonte B en los sondajes RLS-07, RLS-08 y RLS-09. (b) Concentración promedio de REE del horizonte C en los sondajes RLS-07, RLS-08 y RLS-09	77

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS Y MICROFOTOGRAFÍAS

Fotografía	Página
4. 1. Esquisto de biotita con bandeamiento de cuarzo y micas y trazas de granate	31
4. 2. Anfibolita de grano fino y textura granoblástica	33
4. 3. Sección delgada muestra RLS-03 de migmatita	34
4. 4. Sección delgada muestra RLS-07 de tonalita de anfíbol y biotita	37
4. 5. Sección delgada muestra RLS-02T de tonalita de biotita	38
4. 6. Sección delgada muestra RLS-02D del dique diorítico	40
4. 7. Sección delgada muestra RLS-04 del dique de microdiorita cuarcífera	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
3. 1. Cuadro resumen de las distintas unidades que afloran entre los 36°00' S y 38°00' S	28
4. 1. Análisis modal de secciones delgadas pulido transparente en muestras de roca del área de estudio	32
5. 1. Composición química de REE (ppm) en muestras de desorciones de regolito del sondaje RLS-07	60
5. 2. Composición química de REE (ppm) en muestras de desorciones de regolito del sondaje RLS-08	65
5. 3. Composición química de REE (ppm) en muestras de desorciones de regolito del sondaje RLS-09	71

RESUMEN

Hoy en día, gran parte de la población mundial utiliza dispositivos electrónicos para comunicarse, informarse y entretenerse. Todos estos dispositivos cuentan, entre sus componentes, con un grupo de elementos muy poco conocido pero imprescindible para su fabricación. Estos elementos se conocen como tierras raras (REE) y constituyen el mayor grupo de elementos químicos con propiedades fisicoquímicas similares. Debido a su importancia en la sociedad actual, el Proyecto Biolantánidos realiza campañas de exploración con la finalidad de definir áreas de interés con potencial para alojar depósitos de REE en regolito.

La gran mayoría de los depósitos de REE en regolito provienen de rocas intrusivas y la Cordillera de la Costa de Chile central presenta una larga franja de este tipo de rocas denominado Batolito Costero del Sur (Hervé y otros, 1987). Está compuesto principalmente por granitoides calcoalcalinos de edad Carbonífero superior a Pérmico (Hervé y otros, 1988) pero se registran de manera restringida diversos pulsos magmáticos mesozoicos como los cuerpos monzograníticos triásicos en la Península de Hualpén (Creixell, 2001), y plutones jurásicos que tienen un carácter bimodal ácido-básico, formado por leucogranitos, dioritas y gabros (Suazo, 2005).

La geología local está conformada tanto por rocas metamórficas (esquisto, metapelita, anfibolita y migmatita) como por rocas intrusivas (tonalita de anfíbol y biotita, tonalita de biotita, dique diorítico, dique de microdiorita cuarcífera y dique aplítico) que presentan concentraciones trazas de minerales de REE como allanita, o minerales que pueden portar REE como apatito, zircón, titanita y granate.

Debido al fuerte grado de meteorización, como consecuencia de la exposición al clima y al desarrollo de cobertura vegetal, estas rocas se encuentran como material regolítico desarrollando un perfil meteorizado que puede dividirse en 3 horizontes según diferencias texturales y composicionales.

Las muestras de desorciones en regolito analizadas mediante ICP-MS muestran que la anfibolita presenta una mayor concentración de REE en comparación con tonalita de anfíbol y biotita (únicas dos rocas analizadas) que a su vez se encuentra generalmente empobrecida tanto en horizonte B como en horizonte C en comparación con su roca parental.

El evidente empobrecimiento en REE del material regolítico procedente de la tonalita de anfíbol y biotita puede deberse a diversos factores como la falta de eficacia en la meteorización para descomponer allanita, la posibilidad de que las REE liberadas por alteración de allanita hayan precipitado como un mineral secundario o que el tipo de arcilla con gran capacidad para retener REE se concentre en un sector del perfil meteorizado y no esté desarrollado en todo el material regolítico.

Por otra parte, el regolito procedente de la anfibolita muestra un alto contenido de REE, esencialmente HREE e Y, asociado a la descomposición de granates y anfíboles.

Por último la migmatita, posee concentraciones tanto de allanita como de granate por lo que existe la posibilidad de generar zonas mineralizadas en los horizontes del perfil meteorizado.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Presentación

La presente memoria de título se realiza en el marco de la campaña de exploración del Proyecto Biolantánidos, de la empresa REE Uno SPA y surge a raíz de la búsqueda de nuevas áreas de interés con potencial para alojar depósitos de REE en regolito.

1.2. Objetivos

El objetivo general de este estudio es contribuir al conocimiento geológico para evaluar la existencia de un depósito de REE alojado en regolito en la localidad de Río Lía, región del Biobío, Chile. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Describir las distintas unidades litológicas que afloran en el área a través del estudio petrográfico tanto macroscópico como microscópico.
- Caracterizar el material regolítico de acuerdo con sus propiedades y clasificarlo en los distintos horizontes del perfil meteorizado.
- Identificar la fuente (minerales primarios) de REE en las distintas litologías presentes.
- Determinar cuál es la principal litología enriquecida en REE.

1.3. Ubicación y accesos

La posición geográfica del área de estudio (Figura 1.1) comprende las coordenadas U.T.M 674.900 - 677.700 m E y 5.874.000 - 5.879.000 m N (datum WGS84, Huso 18S) y se ubica en la comuna de Santa Juana, provincia de Concepción, región del Biobío.

El acceso principal desde la ciudad de Concepción hasta Santa Juana, se realiza a través de la Ruta 156. Desde Santa Juana la Ruta O-862 que une los poblados de Tricauco-Huallerehue-Río Maipo y varias vías secundarias rurales de ripio y tierra permiten recorrer el área de trabajo. Adicionalmente, existen caminos en predios forestales en los que en ocasiones es posible el libre tránsito.

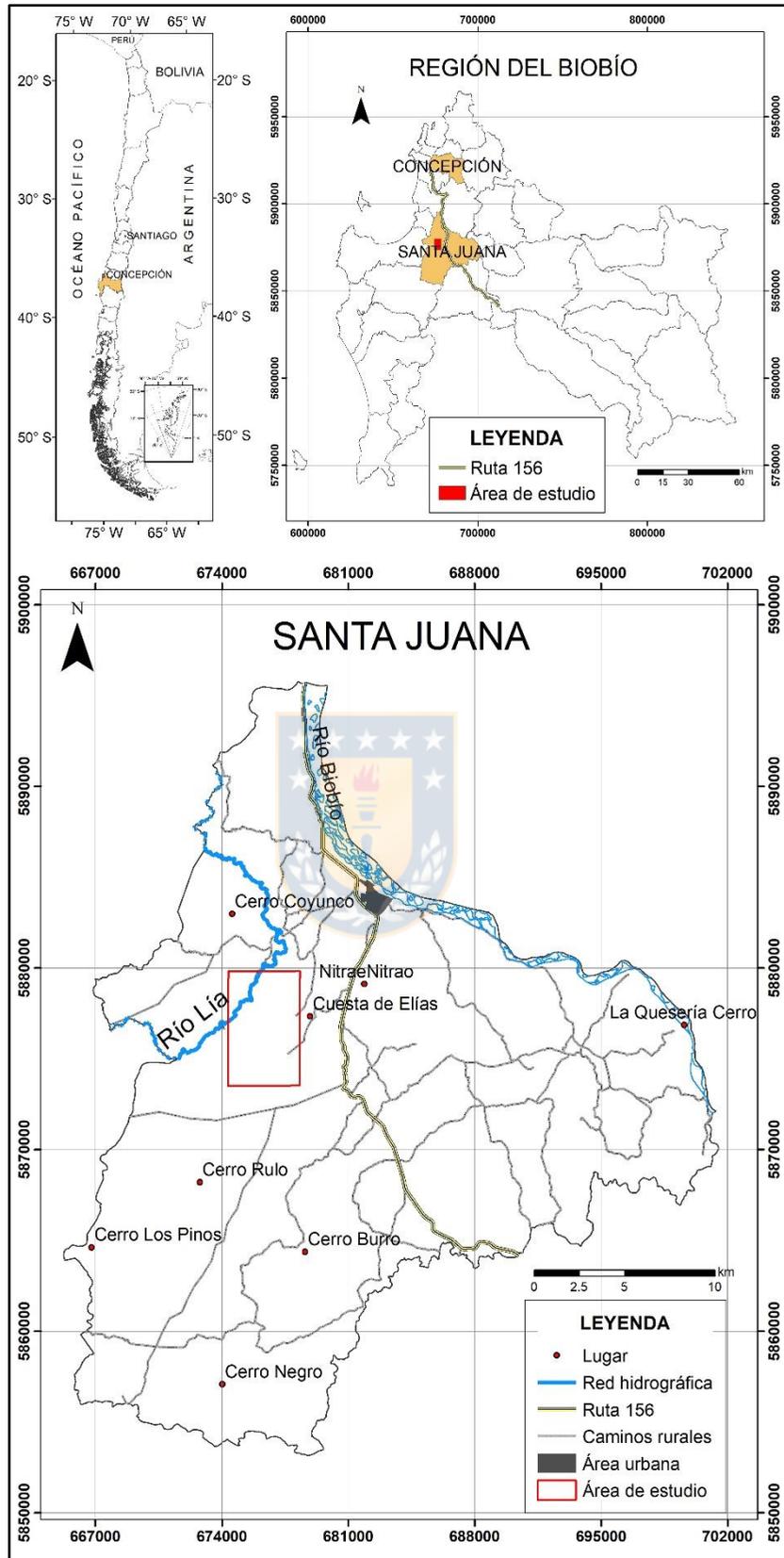


Figura 1.1. Mapa de ubicación y accesos del área de estudio.

1.4. Metodología de trabajo

1.4.1. Etapa de gabinete

Se realiza la recopilación y revisión de información bibliográfica y cartográfica relacionada al área de estudio, así como también informes internos del Proyecto Biolantánidos en fases anteriores. Además, se presentan antecedentes de depósitos de REE alojado en regolito, principalmente en China, por ser el país en el que se encuentra la gran mayoría de este tipo de depósitos.

1.4.2. Estudio petrográfico macroscópico

Recolección y descripción macroscópica (Anexo n°1) de las muestras de roca perteneciente a los 31 sondajes perforados en el área de estudio. De estos 31 sondajes 13 poseen varios metros de roca fresca que en total suman ~46 m. De manera preliminar se reconocen diferencias mineralógicas y texturales que permiten agrupar las muestras en dos unidades metamórficas y dos intrusivas.

1.4.3. Estudio petrográfico de secciones delgadas

Descripción de 13 muestras en secciones delgadas y pulidas (Anexo n°2), utilizando un microscopio petrográfico (Nikon) del Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) de la Universidad de Concepción. Esto incluyó la determinación mineralógica modal mediante estimación visual para clasificar petrográficamente las unidades intrusivas según el diagrama de clasificación Q-A-P (Streckeisen, 1976).

1.4.4. Estudio de identificación de minerales que contienen REE

Para la identificación de minerales que contienen REE en secciones de rocas (6 cortes pulidos transparentes) se utilizó la tecnología de análisis mediante mineralogía automatizada, en este caso TIMA-X (TESCAN *Integrated Mineral Analyzer*) con método SA (*Section analysis*), realizada en SGS Mineral Services. Este equipo funciona en base a un microscopio electrónico de barrido (SEM, *Scanning Electron Microscopy*) y detectores EDAX (*Energy Dispersive Spectroscopy*). Se analizó toda la superficie de los cortes con una resolución de 8x8 μm (pixel = 64 μm^2), se leyó con 1000 cuentas por pixel y cada muestra tomó 6 horas aproximadamente.

En ocasiones no reconoce minerales debido a problemas en las secciones o que en ese lugar de la muestra no se encuentra nada. Todos estos factores son reconocidos por el equipo y se cuantifican para que la muestra tenga el 100% del área medida.

Los resultados presentan la mineralogía modal (el límite de detección inferior es de 0,01%) y una imagen del panorama en falso color en donde cada color corresponde a una fase mineral. Además, un detalle de allanita, titanita, apatito o anfíbol con sus respectivas imágenes de barrido de electrones retrodispersados (BSE, *Back-Scattered Electrons*), espectro y composición.

La detección de los elementos de REE se realizó buscando Ce, La o Y. Los otros elementos presentan traslape de *peaks* que impiden su determinación. Es difícil poder estimar el límite de detección de un elemento en un espectro porque depende de los espectros adyacentes y de la altura del ruido de fondo, pero es del orden del 1%. Los minerales con contenido inferior a 1% de un elemento de tierra rara no pueden ser identificados.

1.4.5. Estudio geoquímico

Se realizaron 70 análisis de ICP-MS en muestras de desorciones de regolito provenientes de tres sondajes (RLS-07, RLS-08 y RLS-09). La desorción es el proceso por el cual una sustancia se libera desde o a través de una superficie. Para el caso de las REE retenidas en arcillas, este proceso se realiza en dos etapas y utiliza sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ al 0,5M y agua destilada para lixiviar los iones de REE intercambiables y dejarlos en solución. Al realizar el procedimiento es necesario mantener siempre el pH igual a 4. Para ello se agregan gotas de ácido sulfúrico (H_2SO_4).

El análisis de ICP-MS es una técnica de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente, cuyo uso en la actualidad lidera el campo del análisis químico elemental, en particular para la cuantificación de elementos traza.

1.4.6. Etapa analítica

Análisis, integración e interpretación de los resultados obtenidos. Consideró el estudio petrográfico macroscópico y microscópico, análisis geoquímico, química mineral y la determinación de los minerales que contienen los elementos de REE.

1.5. Trabajos anteriores

BRÜGGEN (1950) realiza una descripción de las rocas paleozoicas de Chile en su texto "Fundamentos de la Geología de Chile", señalando que las rocas más antiguas del centro-sur del país, se localizan en la Cordillera de la Costa.

TAVERA (1960) divide la secuencia sedimentaria del valle inferior del río Biobío en tres miembros, denominándolos: Miembro Quilacoya (continental), Miembro Unihue (marino) y Miembro Talcamávida-Gomero. Por la fauna y flora fósil encontrada le asigna a la secuencia sedimentaria una edad Cárnico inferior a Rético.

GONZÁLEZ-BONORINO & AGUIRRE (1970) describen el Basamento Metamórfico de la Cordillera de la Costa entre los 34° y 41°S por primera vez, y definen tres series metamórficas diferenciándolas entre sí por sus estructuras y el tipo de metamorfismo: Zona Pichilemu, Curepto y Nirivilo.

AGUIRRE y otros (1972) modifican la subdivisión del Basamento Metamórfico y definen dos series: la Serie Occidental y la Serie Oriental. Además, interpretan que las dos series representan un cinturón metamórfico pareado en el sentido de Miyashiro (1961).

HERVÉ y otros (1976) efectúan dataciones radiométricas en rocas metamórficas e intrusivas de la Cordillera de la Costa del centro-sur de Chile entre los 37-38°S, determinando edades Rb-Sr en roca total de 320 Ma.

CUCURELLA (1978) establece una subdivisión informal de las secuencias sedimentarias triásicas del valle inferior del río Biobío y describe las características estructurales generales de la zona.

HERVÉ (1988) realiza una síntesis litológica, estructural y geocronológica del basamento cristalino del centro-sur de Chile e interpreta su génesis y emplazamiento en el marco de la tectónica de placas.

HERVÉ y otros (1988) efectúan nuevas dataciones radiométricas para las rocas intrusivas del Batolito Costero del Sur mediante el método Rb-Sr estableciendo edades paleozoicas, triásicas y jurásicas.

CREIXELL (2001) estudia la petrología del Batolito Costero del Sur distinguiendo 3 subunidades: Tonalitas de Santa Juana (TSJ), Granitoides de Nahuelbuta (GNA) y Granitoides de Concepción (GC).

VÁSQUEZ (2001) investiga las características mineralógicas y geoquímicas del Basamento Metamórfico en la región del Biobío. A través de un estudio geotermobarométrico determina la mineralogía, facies y grado de metamorfismo del tipo Barroviano y Buchan.

LÉPEZ (2002) realiza un estudio estructural de las rocas de edad triásica denominándolas con el nombre de Triásico de Santa Juana.

LUCASSEN y otros (2004) estudian las secuencias metamórficas e intrusivas entre los 36°-41°S mediante dataciones radiométricas, análisis químicos e isotópicos para caracterizar los mecanismos de evolución composicional desde el Paleozoico hasta el reciente en el margen Pacífico Chileno.

NIELSEN (2005) distingue cuatro asociaciones de facies en las secuencias sedimentarias triásicas del valle inferior del río Biobío.

SUAZO (2005) efectúa un reconocimiento y estudio geológico de las rocas intrusivas que afloran en la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa entre las regiones del Maule y Biobío, definiendo dos unidades intrusivas jurásicas (Unidad Hualve y Unidad Ninhue).

VELÁSQUEZ (2012) presenta una zonificación de la pegmatita del sector Poñen, perteneciente al Batolito Costero del Sur en la región del Biobío.

JIL (2014) caracteriza desde el punto de vista mineralógico y petrográfico los distintos cuerpos pegmatíticos y rocas intrusivas circundantes que afloran en los sectores de Poñen, Vertientes y Parque Coyanmahuida en la Cordillera de la Costa del centro-sur de Chile.

COLLAO y otros (2015) describen la mineralogía, relacionada a anomalías geoquímicas del afloramiento pegmatítico del sector de Coyanmahuida en la región del Biobío. Se constata la presencia de xenotima, monacita y uranoplicrasa.

YUNG (2016) realiza estudios petrográficos y geocronológicos en rocas intrusivas pertenecientes al Batolito Costero del Sur definiendo el Complejo Plutónico Penco.

ÁLVAREZ (2016) efectúa una caracterización de minerales que contienen REE en rocas intrusivas definidas como Complejo Plutónico Penco.

El Proyecto Biolantánidos ejecuta trabajos de exploración en la localidad de río Lía entre los años 2015 y 2016, que contemplan un levantamiento geológico a escala 1:24.000 y desarrollo de muestreo geoquímico superficial. Como resultado, determinan las unidades litológicas presentes en el área, elaborando un modelo geológico y definiendo blancos de perforación.

1.6. Agradecimientos

Agradezco sinceramente al geólogo Alex Belmar, quien fue el primer profesional que confió en mí dándome la oportunidad de trabajar y realizar mi memoria en el Proyecto Biolantánidos, otorgándome los recursos y herramientas necesarias para su ejecución, además de brindarme su apoyo, ayuda y consejo en todo momento.

A Ximena Valin geóloga y profesional guía de este trabajo, por su disposición a colaborar conmigo siempre, además de apadrinarme luego del cambio de profesional guía.

A mi profesor patrocinante Dr. Osvaldo Rabbia, quien influyó significativamente en mi formación como geólogo y me apoyó durante todo el transcurso de la realización de mi memoria.

A Melisse Henry y Felipe Martínez, quienes realizaron la caracterización mineralógica vía TIMA-X para este trabajo por su cooperación e infinita paciencia para responder mis dudas.

Doy gracias a todo el personal y profesores del Departamento de Ciencias de la Tierra e Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) por su enseñanza y colaboración durante todos estos años.

Por último, agradecer infinitamente a mi familia, a mis padres Verónica y Germain, y hermanos Claudio, Daniela y Sebastián por su amor y apoyo incondicional.

2. TIERRAS RARAS

2.1. Generalidades

Hoy en día, gran parte de la población mundial utiliza dispositivos electrónicos (*smartphones*, *tablets*, televisores y computadores) para comunicarse, informarse y entretenerse. Todos estos dispositivos cuentan, entre sus componentes, con un grupo de elementos muy poco conocido pero imprescindible para su fabricación. Estos elementos se conocen como tierras raras (REE) y constituyen el mayor grupo de elementos químicos con propiedades fisicoquímicas similares.

Según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC, por sus siglas en inglés), la familia de las REE consiste en 17 metales de transición que forman el grupo 3 de la tabla periódica. Entre ellos se encuentran la serie de lantánidos: lantano (La), cerio (Ce), praseodimio (Pr), neodimio (Nd), prometio (Pm), samario (Sm), europio (Eu), gadolinio (Gd), terbio (Tb), disprosio (Dy), holmio (Ho), erbio (Er), tulio (Tm), iterbio (Yb) y lutecio (Lu), al que se le agregan el escandio (Sc) e itrio (Y). Sin embargo algunos expertos excluyen el escandio (Sc) de este grupo debido a su pequeño radio iónico que facilita su sustitución con Mg, Fe²⁺, Zr y Sn por lo que rara vez se encuentra en los mismos minerales que las demás REE.

Los lantánidos de bajo número atómico se denominan tradicionalmente tierras raras livianas (LREE), mientras que los de mayor número atómico se conocen como tierras raras pesadas (HREE). Habitualmente, se consideran como LREE los lantánidos que van desde La-Eu y como HREE los que van desde Gd-Lu (Sanematsu y Watanabe, 2016). Para efectos de este trabajo, las LREE se consideran desde La-Nd y las HREE desde Sm-Lu utilizando la subdivisión propuesta por Li y otros (2019). Hay también, otros autores que distinguen 3 categorías: tierras raras livianas, intermedias y pesadas. Por otro lado, el itrio (Y) se agrupa con las HREE porque su radio iónico es casi idéntico al de holmio (Ho), y posee la misma carga (+3).

En cuanto a su abundancia relativa (Figura 2.1) las REE siguen el patrón “zigzag” característico del principio de Oddo-Harkins que refleja la mayor abundancia de elementos con número atómico par sobre los de número atómico impar.

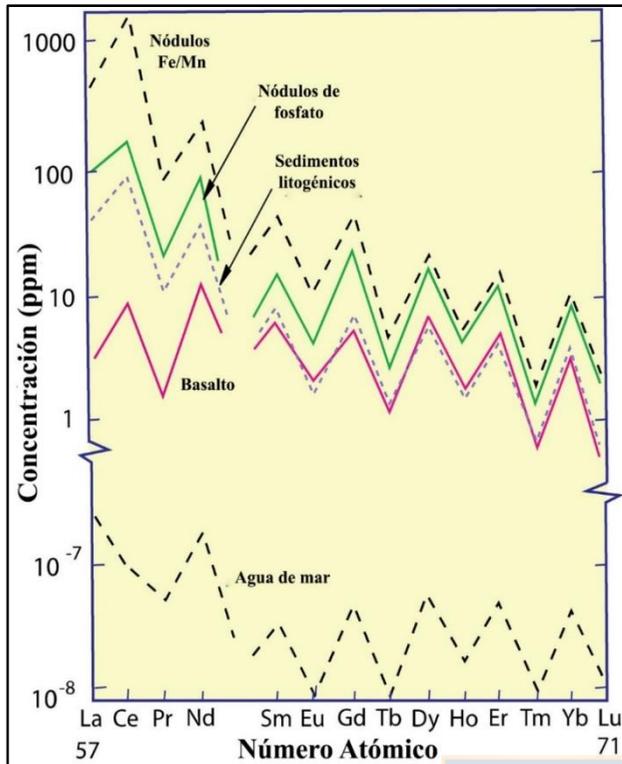


Figura 2.1. Concentración de REE medida en agua de mar, fases de sedimento marino y basalto, que muestran el patrón “zig-zag” de la regla de Oddo-Harkins. Adaptado de Piper y Bau (2013).

Con respecto a su abundancia relativa en la corteza terrestre, las REE no son tan “raras” o “escasas” como podría suponerse. En realidad el cerio (Ce) e itrio (Y), por ejemplo, son más abundantes en masa (25% y 30% respectivamente) que los metales preciosos (Rudnick y Gao, 2003 en Chakhmouradian y Wall, 2012). Por otra parte en el Sistema Solar la mayoría de los lantánidos con un número atómico impar son en realidad más bajos en abundancia que el 94% de los elementos restantes, incluidos el oro (Au), platino (Pt) y otros metales preciosos (Anders y Grevesse, 1989 en Chakhmouradian y Wall, 2012), acreditando que al menos parte de las REE sí son “raras” o “escasas” en la escala cósmica.

Otra característica relevante (Figura 2.2) es la reducción significativa en el radio iónico de lantano (La) a lutecio (Lu) denominada “contracción lantánida” por Goldschmidt (1925). Debido a esta propiedad las REE exhiben variaciones sistemáticas en la partición entre masas fundidas y cristales, coexistiendo líquidos de diferente composición. Este decrecimiento del radio atómico determina que las HREE estén preferentemente en fases sólidas que en líquidas.

En relación con su estado de oxidación, las REE tienen valencia +3. Sin embargo hay 2 excepciones, para valores bajos de fugacidad de oxígeno (fO_2), el europio (Eu) puede tener valencia +2. En efecto, para el rango común de sistemas ígneos Eu^{2+} es mayor que Eu^{3+} . El cerio (Ce), por su parte, bajo condiciones oxidantes también puede tener valencia +4.

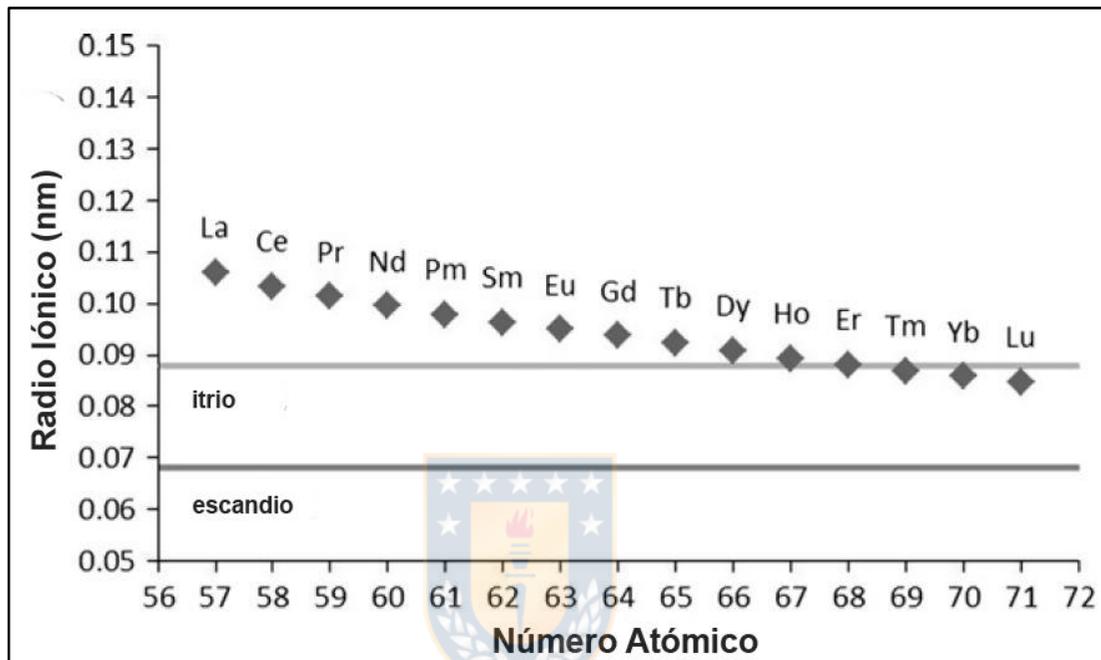


Figura 2.2. Contracción lantánida. Adaptado de Jordens y otros (2013).

2.2. Mineralogía

Chakhmouradian y Wall (2012) señalan que aproximadamente 270 minerales contienen itrio (Y) o lantánidos como un componente principal dentro de su estructura cristalina y fórmula química. Los más comunes en número de especies y ocurrencias naturales son los silicatos (43%), seguidos por carbonatos (23%), óxidos (14%) y fosfatos (14%). Los menos comunes son los sulfatos, representados sólo por una especie sejkoraita-(Y) (Figura 2.3) que fue descubierta en República Checa en el año 2009. Además, las REE predominantes en la gran mayoría de estos minerales (96%) son cerio (Ce), itrio (Y), lantano (La) o neodimio (Nd), y las pocas especies restantes tienen un lantánido par como tierra rara principal.

Según estos mismos autores algunos minerales contienen REE que sustituyen a otros cationes de radio y carga similar. Así, por ejemplo, el Eu^{2+} sustituye al Ca^{2+} en las plagioclasas pero es demasiado grande para hacerlo en los clinopiroxenos o en otras fases que contienen calcio. También pueden ingresar dentro de la estructura cristalina de apatito $[(\text{Ca}, \text{REE}, \text{Sr}, \text{Na})_5 (\text{P}, \text{Si})_3 \text{O}_{12} (\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})]$, mosandrita $[(\text{Ca}, \text{Na})_{3-x} (\text{Ca}, \text{REE})_4 \text{Ti} (\text{Si}_2 \text{O}_7)_2 (\text{OH}, \text{F}, \text{H}_2 \text{O})_4 \cdot \text{H}_2 \text{O}]$, ewaldita $[\text{Ba} (\text{Ca}, \text{Na}, \text{REE} (\text{CO}_3)_2 \cdot n \text{H}_2 \text{O})]$, y perovskita $[(\text{Ca}, \text{Na}, \text{REE}) (\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Fe}) \text{O}_3]$. Por otro lado hay minerales que pueden exhibir enriquecimiento de REE dependiendo de sus condiciones de cristalización como titanita $(\text{CaTiSiO}_4 \text{O})$, zircón (ZrSiO_4) , eudialyta $[\text{Na}_{15} \text{Ca}_6 (\text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+})_3 \text{Zr}_3 [\text{Si}_{25} \text{O}_{73}] (\text{O}, \text{OH}, \text{H}_2 \text{O})_3 (\text{OH}, \text{Cl})_2]$, o pirocloro $[(\text{Ca}, \text{Na})_{2-x} (\text{Nb}, \text{Ti})_2 \text{O}_6 (\text{F}, \text{OH})]$.



Figura 2.3. Cristales laminados de sejkoraita-(Y). El campo de visión es de 1,2 mm (Plášil y otros, 2011).

2.3. Depósitos de REE

Los depósitos de REE (Figura 2.4) pueden subdividirse de manera general en dos tipos dependiendo de los procesos geológicos que interactúan en su concentración:

- Depósitos formados por procesos de alta temperatura (magnéticos e hidrotermales), típicamente asociados a carbonatitas, rocas ígneas alcalinas y sistemas hidrotermales.
- Depósitos formados por procesos de baja temperatura (meteorización y erosión) tales como placeres, bauxitas, lateritas y depósitos alojados en regolito.

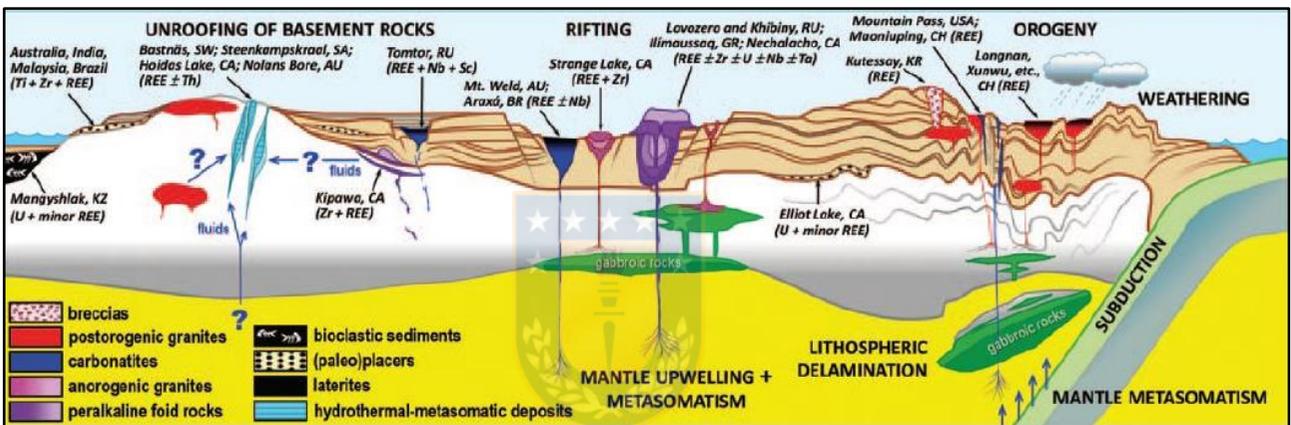


Figura 2.4. Principales tipos de depósitos de REE según el contexto tectónico (Chakhmouradian y Wall, 2012).

2.3.1. Carbonatitas

Las carbonatitas corresponden a rocas ígneas que poseen un contenido >50% de minerales de carbonato. La mayor parte de estas rocas muestran un enriquecimiento significativo de REE en comparación con la abundancia de la corteza, aunque los enriquecimientos económicamente rentables se encuentran en intrusiones tardías altamente evolucionadas (Wall y Mariano, 1996). Comúnmente contienen una amplia gama de minerales de REE, entre los que se incluyen una serie de carbonatos como bastnasita, parisita y sinquisita, los cuales presentan un enriquecimiento típico en LREE, además de fosfatos como apatito y monacita.

Los depósitos más conocidos de este tipo son Bayan Obo y Maoniuping en China y Mt Weld en Australia. La dificultad técnica que presentan este tipo de depósitos con respecto a la extracción y procesamiento es que como sus rocas se encuentran fuertemente enriquecidas en LREE (Figura 2.5) al producir un kg de neodimio (Nd) se generan grandes cantidades de lantano (La) y cerio (Ce) lo que conduce a una sobreproducción y exceso en la oferta de estos elementos. Y a su vez, se producen pequeñas cantidades de disprosio (Dy) que posee un mayor valor comercial (Goodenough y otros, 2017).

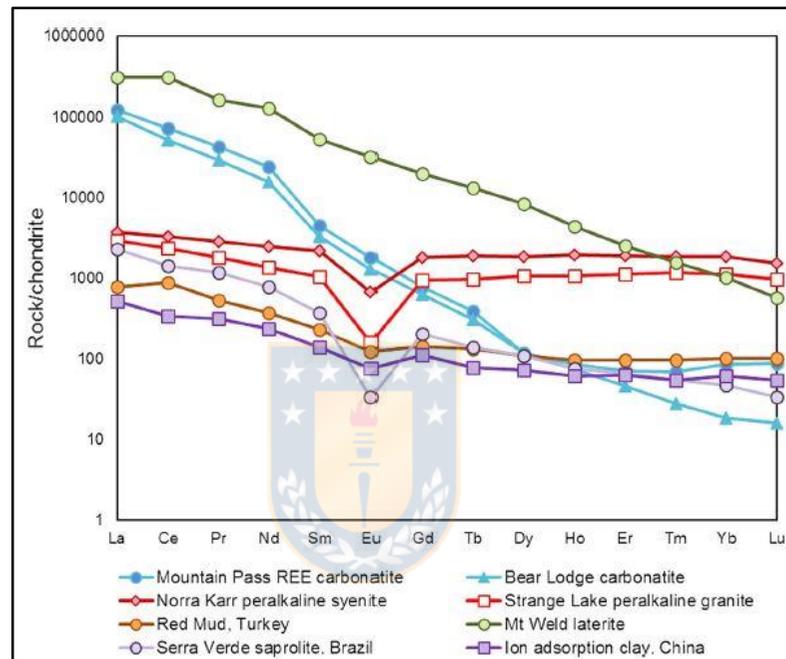


Figura 2.5. Diagrama de REE normalizado al condrito de muestras representativas de varios depósitos (Goodenough y otros, 2017). Factores de normalización de condrito (McDonough y Sun, 1995).

2.3.2. Rocas ígneas alcalinas

Los depósitos asociados a rocas ígneas alcalinas abarcan una gran variabilidad. Dentro de este grupo, conviven aquellas intrusiones en donde los enriquecimientos de REE son producto de procesos magmáticos, así como aquellas en donde la actividad hidrotermal ha jugado un rol importante en la mineralización. Por otro lado los enriquecimientos más significativos están asociados a intrusivos que no son sólo alcalinos, sino peralcalinos (Dostal, 2016). Estas intrusiones ya sean subsaturadas (sienitas de nefelina) o

sobresaturadas (granitos peralkalinos), contienen una variedad de minerales sódicos inusuales, como feldespatoides, anfíboles sódicos y piroxenos sódicos. A su vez, algunas de las intrusiones peralcalinas más enriquecidas son agpaiticas (cristalización en exceso de álcalis) y contienen silicatos de titanio (Ti) y circonio (Zr) raros como eudialita y enigmatita (Marks y otros, 2011). Es en estas intrusiones en donde los procesos magmáticos por sí solos pueden causar un enriquecimiento de REE.

Los depósitos agpaiticos pueden ser de gran tamaño, pero generalmente tienen grados relativamente bajos de óxidos de tierras raras (REOs), comúnmente $\leq 1\%$ en peso. Por lo general, tienen un patrón de REE mucho más plano que las carbonatitas y tienen una anomalía negativa de europio (Figura 2.5), por lo que el procesamiento de un kg de neodimio (Nd) producirá buenas cantidades de disprosio (Dy) con menos lantano (La) y cerio (Ce). Además, se caracterizan por sus bajos contenidos de uranio (U) y torio (Th) (Goodenough y otros, 2017).

Los depósitos de rocas alcalinas en donde la actividad hidrotermal cumple un rol importante en la mineralización como es el caso de Strange Lake en Canadá, Khaldzan-Buregtey en Mongolia y Bokan Mountain en Alaska (Dostal, 2016; Salvi y Williams-Jones, 2006) muestran un patrón de REE normalizado al condrito relativamente plano con una fuerte anomalía negativa de europio (Figura 2.5), similar a los complejos agpaiticos. En cuanto a su mineralogía la interacción de procesos magmáticos e hidrotermales genera una enorme variabilidad de minerales que contienen REE, como silicatos (zircón, allanita), fosfatos (monacita y xenotima), carbonatos y óxidos.

2.3.3. Depósitos de vetillas y skarn

La mineralización de REE en sistemas de vetillas y skarn se encuentra en escasas localidades y no parecen tener relación con rocas ígneas alcalinas o carbonatitas. Son depósitos pequeños en tonelaje pero con alta ley, aunque generalmente están dominados por LREE. Los más conocidos son los depósitos del área de Bastnäs en Suecia, desde donde se identificaron originalmente gran cantidad de REE (Holtstam y otros, 2014).

2.3.4. Placeres

Los placeres se producen principalmente en entornos costeros y fluviales, y generalmente están formados por la erosión de rocas ígneas, aunque otras fuentes como las volcánicas son posibles. Aunque normalmente los placeres se explotan para la extracción de titanio (Ti) o estaño (Sn), muchos tienen el potencial de albergar REE como subproducto. Presentan una baja ley y la principal restricción para su explotación es la alta radioactividad natural que poseen debido a la presencia de torio (Th) y/o uranio (U) en monacita y xenotima (Goodenough y otros, 2017).

2.3.5. Lateritas

Potentes capas de regolito ocurren en zonas templadas y tropicales en todo el mundo. El producto de la meteorización de rocas ígneas en áreas tropicales, se conocen como lateritas, y pueden removilizar REE en minerales secundarios que se acumulan en capas específicas dentro del perfil meteorizado (Berger y otros 2014). Un ejemplo clásico es la mina Mt Weld en Australia, en la que la meteorización progresiva de una carbonatita ha formado una zona altamente enriquecida en REE de hasta 70 m de espesor (Jaireth y otros. 2014). Esta zona laterítica contiene una amplia variedad de fosfatos secundarios de REE, como monacita, churchita, y minerales del grupo de la plumbogummita (Lottermoser, 1990).

2.3.6. Bauxitas

Las bauxitas, que en realidad son una variedad de lateritas aluminosas, se explotan ampliamente en todo el mundo para la extracción de aluminio (Al). El proceso de extracción produce un desecho (lodo rojo) con un enriquecimiento moderado en REE del orden de 1000 ppm (Deady y otros, 2016). Los patrones de REE en general son planos y ligeramente enriquecidos en LREE. Aunque sus leyes son bajas hay una ventaja significativa en su extracción como subproducto de la producción de aluminio (Al) a gran escala.

2.3.7. Depósitos de REE alojado en regolito

Los depósitos de REE alojado en regolito, también conocidos como tipo *ion-adsorption clays* (Sanematsu y Watanabe, 2016; Li y otros, 2017) se encuentran principalmente en China y fueron reconocidos por primera vez a fines de la década de 1960. Son de carácter secundario pues están formados por procesos exógenos. La lixiviación de granitos y rocas volcánicas félsicas (aunque también hay algunos relacionados a basaltos y rocas metamórficas) durante procesos de meteorización química y física genera fluidos enriquecidos en REE que percolan el perfil meteorizado y se concentran en horizontes debido a la adsorción de REE en solución (como iones) en minerales del grupo de las arcillas, predominantemente caolinita y halloysita (Li y otros, 2017).

Aunque las leyes de mineral son sustancialmente bajas y oscilan entre 0,05 y 0,2 % en peso y puede variar significativamente en el perfil meteorizado, su capacidad para la minería a cielo abierto y la relativa facilidad de recuperación de REE hace que estos depósitos sean atractivos para su explotación (Goodenough y otros, 2017; Li y otros, 2017).

Actualmente, más de 170 depósitos de REE alojado en regolito se explotan en China (Figura 2.6) y de ellos solo en el ~10% predominan HREE por sobre LREE, pero contribuyen a más del 90% de la demanda mundial de HREE. Además, potenciales prospectos han sido descubiertos en otras localidades como el proyecto Biolantánidos en Chile, Serra Verde en Brasil y Tantalus en Madagascar (Moldoveanu y Papangelakis 2016). Sin embargo, hasta donde se tiene conocimiento, el sur de China es la única región que tiene minas activas actualmente (Li y otros, 2017).

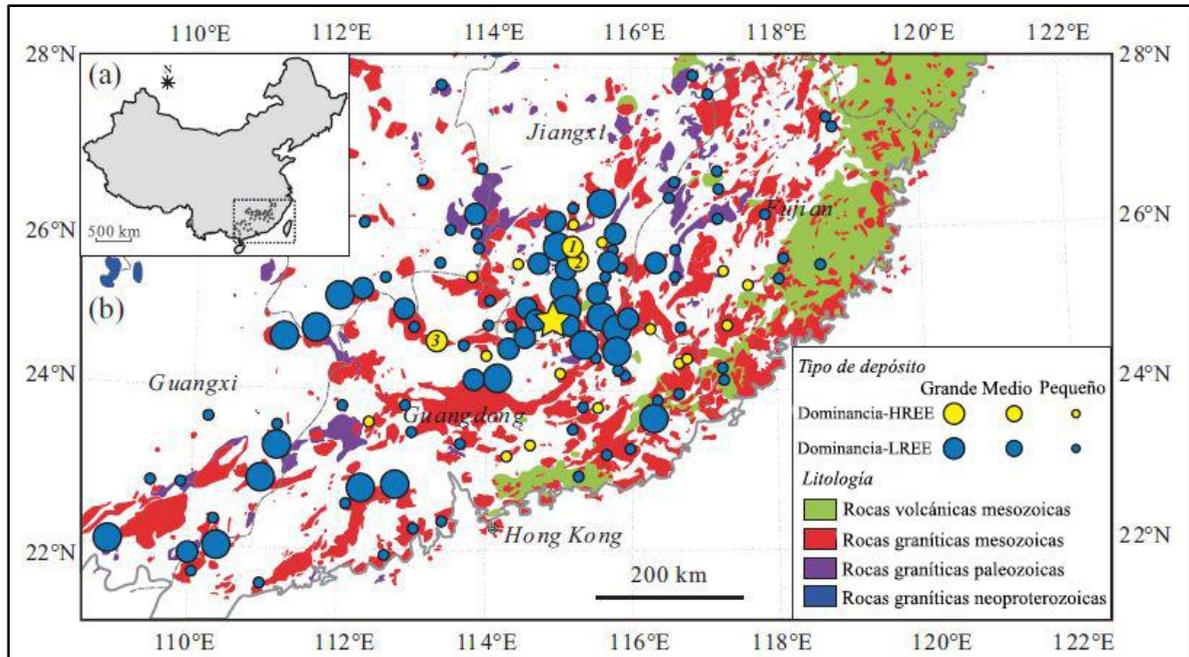


Figura 2.6. Distribución de depósitos de REE alojado en regolito en China. Adaptado de Li y otros (2019).

2.4. Usos y aplicaciones

Los elementos de REE están en nuestro entorno, no solo en la naturaleza sino en nuestra vida cotidiana. Su relevancia se debe a que poseen excelentes propiedades, electrónicas, ópticas, magnéticas y catalíticas que les otorgan un papel importante en la industria tecnológica. La distribución de las REE en aplicaciones (Figura 2.7) es bastante similar a su distribución geológica: pequeñas cantidades se esparcen en infinidad de productos de consumo. Se encuentran en automóviles, computadores, teléfonos móviles, CD, DVD, lámparas fluorescentes y televisores, así como en láseres, lentes, cerámicas, entre otros.

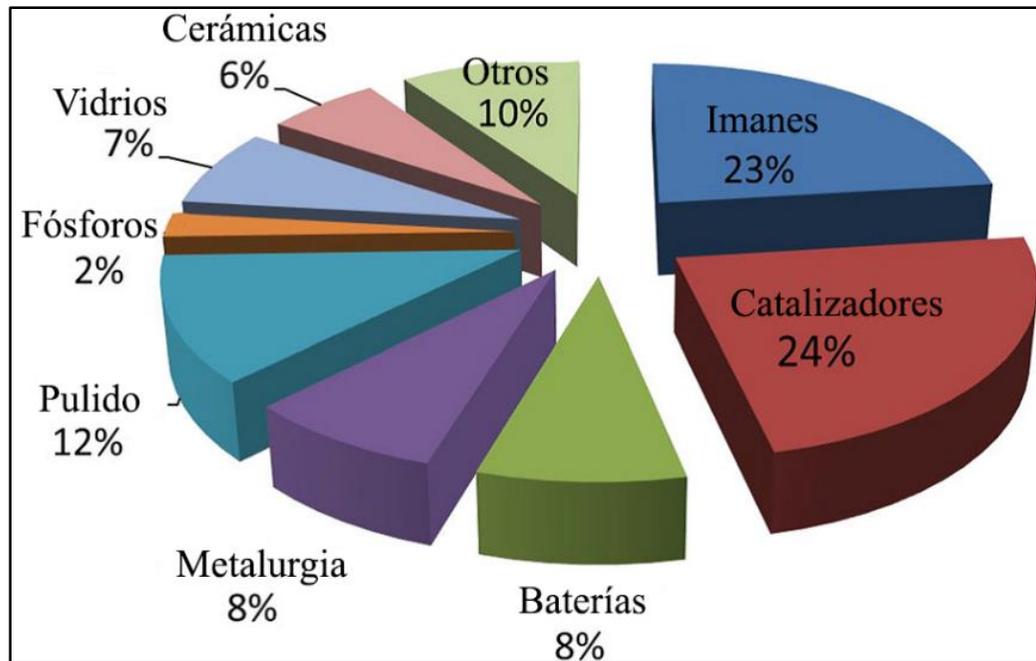


Figura 2.7. Aplicaciones globales de REE. Adaptado de Goodenough y otros (2017).

Se les considera popularmente como "metales verdes" porque una parte importante del mercado se destina a la fabricación de imanes utilizados en turbinas eólicas, vehículos híbridos eléctricos, y trenes Maglev; en convertidores catalíticos de automóviles que minimizan las emisiones tóxicas a la atmósfera y para la producción de fósforos y pigmentos utilizados en la fabricación de lámparas fluorescente eficientes en energía (Gibson y Parkinson 2011).

En cuanto a las aplicaciones científicas de estos elementos van desde el seguimiento de los procesos evolutivos en magmas derivados del manto y sus características de origen (procedencia de los magmas) en geología, hasta el estudio de las estructuras corporales con imágenes de resonancia magnética en el campo de la medicina.

2.4.1. Imanes

Una de las principales aplicaciones de las REE son los imanes (Figura 2.8). El uso de estos elementos en aleaciones magnéticas que comúnmente contienen entre 60–70% en peso de hierro (Fe), 28–35% en peso de REE (Pr, Nd, Tb y Dy), 1–2% en peso de boro (B) y 0–4% en peso de cobalto (Co) ha permitido producir materiales que generan

campos magnéticos muy resistentes que soportan fuertemente la desmagnetización (Reimer y otros, 2018). Las LREE presentes en estas aleaciones como neodimio (Nd) y praseodimio (Pr) ayudan de manera efectiva a "canalizar" el ferromagnetismo inherente de metales de transición como el hierro (Fe) y el cobalto (Co). Así mismo, la adición de HREE como disprosio (Dy) y gadolinio (Gd) (2-4% en peso) mejora aún más la capacidad de los materiales magnéticos basados en neodimio (Nd) para resistir la desmagnetización causada por los campos dispersos o el aumento de la temperatura (Hatch, 2012). Estas características han revolucionado el diseño magnético en los últimos años, especialmente en motores eléctricos y generadores de alto rendimiento.

Además de hacer que las máquinas eléctricas sean más eficientes y de mayor rendimiento, los imanes de REE han permitido miniaturizar motores, altavoces, unidades de disco duro y otras aplicaciones que utilizan imanes para operar.

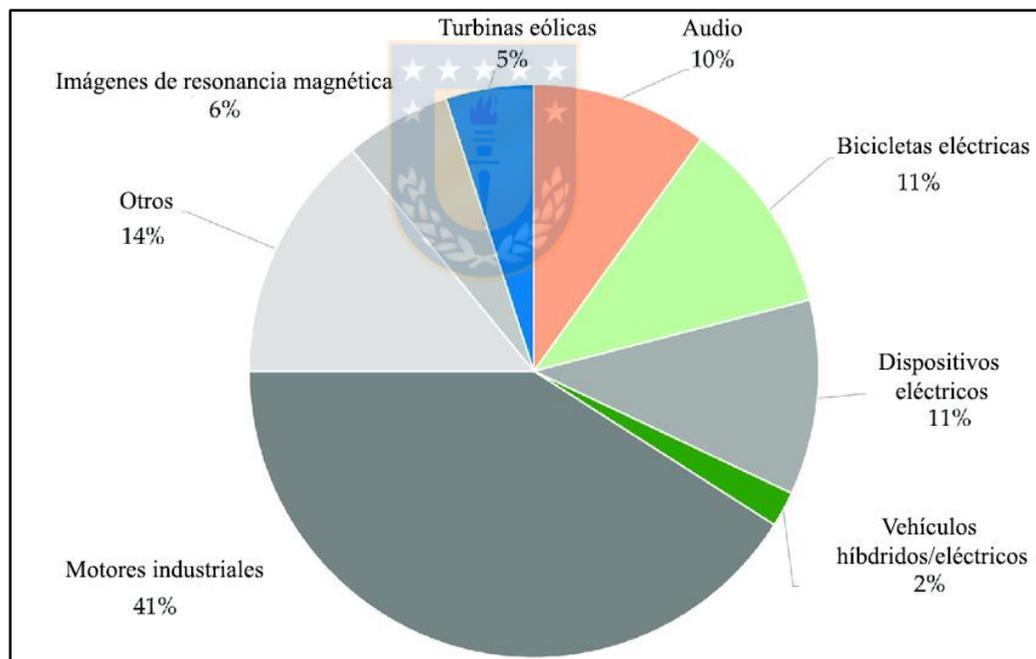


Figura 2.8. Aplicaciones de imanes de (NdFeB) en el mercado global (2012). Adaptado de Reimer y otros (2018).

2.4.2. Fósforos

Los materiales de fósforo emiten luz después de estar expuestos a electrones o radiación ultravioleta (UV). Las pantallas de cristal líquido (LCD), las pantallas de plasma, los diodos luminosos (LED) y las lámparas fluorescentes compactas (CFL) utilizan estos materiales. Así, por ejemplo, el color rojo, proviene de líneas de emisión a 610–630 nm en fósforos de Eu^{+3} , mientras que las transiciones de electrones de mayor frecuencia (450 nm) de Eu^{+2} producen un resplandor azul.

Dado que mucha energía eléctrica no se convierte en luz en las fuentes de luz convencionales, los materiales de fósforo son significativamente más eficientes energéticamente que las tecnologías más antiguas, y requieren mucha menos electricidad para producir los mismos resultados. Esta eficiencia energética es el impulsor clave para el reemplazo de las bombillas incandescentes convencionales por bombillas fluorescentes de bajo consumo en numerosos países del mundo.

2.4.3. Catalizadores de craqueo de fluidos (FCC)

Son materiales utilizados para la refinación de petróleo. Se agrega lantano (La) y cerio (Ce) a los compuestos catalíticos (hasta 8% en peso) para proporcionar estabilidad a la zeolita durante el proceso de craqueo, que a su vez produce una alta actividad catalítica y selectividad del proceso. Esta interacción ayuda a la transformación del petróleo crudo en gasolina y otros productos petrolíferos útiles y valiosos.

2.4.4. Convertidores catalíticos

Los vehículos modernos utilizan convertidores catalíticos para reducir la emisión de contaminantes que resultan del proceso de combustión interna. Se utiliza el óxido de cerio (CeO_2) en una capa de lavado junto con circonio (Zr) y metales del grupo del platino que convierte el NO_x , CO e hidrocarburos no quemados en compuestos menos dañinos.

2.4.5. Almacén de energía

Los compuestos de lantano (La) y níquel (Ni) se utilizan para producir celdas de batería que almacenan energía. La presencia de lantano permite la absorción de hidrógeno en

la celda, y la facilidad de reversión de este proceso electroquímico hace que los compuestos de La – Ni – H sean especialmente adecuados para aplicaciones de baterías recargables.

2.4.6. Medios de pulido

Importantes cantidades de óxido de cerio (CeO_2) se utilizan en el pulido de vidrios, espejos, pantallas de televisores y computadores. Cuando se usa en forma de polvo fino, el CeO_2 reacciona con la superficie del vidrio para formar una capa más suave que facilita el pulido para obtener un acabado de alta calidad.

2.5. Aspectos económicos

Las REE han sido clasificadas como materias primas críticas y estratégicas tanto por Europa como por Estados Unidos debido a su relevancia económica, riesgo de abastecimiento y ausencia de sustitutos adecuados.

El término crítico se refiere a recursos económicamente importantes sujetos a alto riesgo de abastecimiento. En otras palabras, que exista una mayor probabilidad que la demanda supere a la oferta en un futuro próximo. Por otro lado, el término estratégico tiene una connotación militar. En este contexto las REE se han vuelto insustituibles en aplicaciones como municiones de precisión, aviones, minas, sistemas de detección (láseres), radares, sonares y detectores de radiación.

2.5.1. Producción

Es bien sabido que China ha dominado la producción global de REE en las últimas dos décadas, contribuyendo con una participación promedio de más del 85% de la oferta global (Figura 2.9). La proporción restante la comparten países como Australia, Rusia, India, Brasil, Tailandia, Malasia y Vietnam (Chen y otros, 2018).

En 2016 la producción global fue de 126.000 toneladas de óxidos de tierras raras (REOs) y la asociación industrial de REE de China ha pronosticado que el uso de estos elementos en el país aumentará en 149.000 toneladas para 2020.

2.5.2. Reservas

Durante 1995-2015 la participación de China en las reservas globales de REE alcanzó un porcentaje promedio del 39% (Figura 2.9). En 2016, la reserva total mundial de óxidos de tierras raras (REOs) se estimó en 120 Mt, de las cuales aproximadamente un tercio es de China (Ober, 2017). En los últimos años su participación ha disminuido debido a descubrimientos de nuevos depósitos en otras partes del mundo como el sudeste asiático, África y América (Li y otros, 2019).

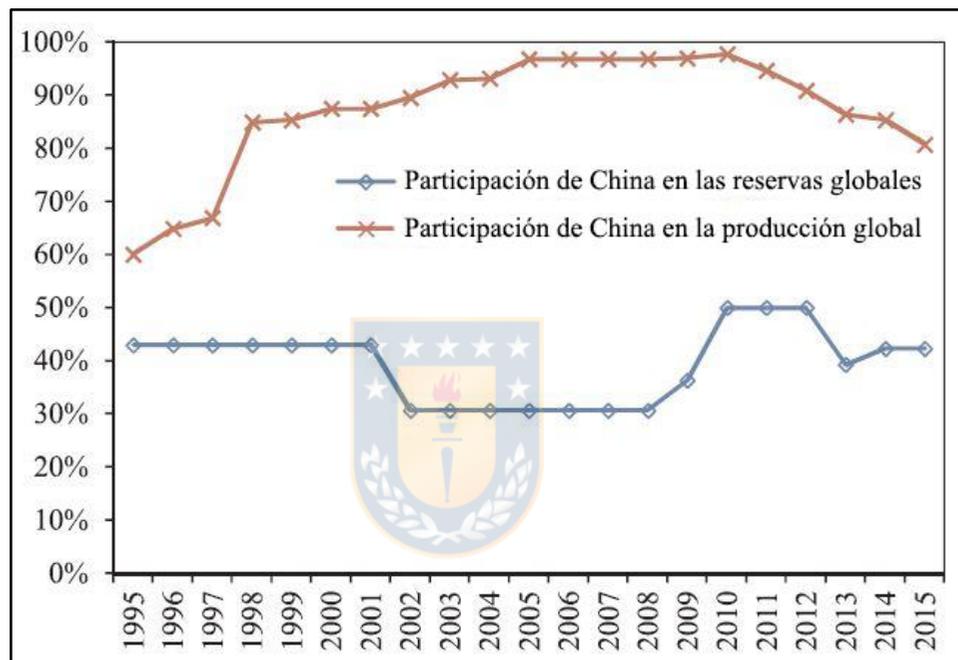


Figura 2.9. Participación de China en la producción global y reservas mundiales de REE. Fuente: *United States Geological Survey (USGS)*. Adaptado de Chen y otros (2018).

2.5.3. Reciclaje

Como se mencionó anteriormente las REE han sido clasificadas como materias primas críticas por varias potencias mundiales debido a su relevancia económica y riesgo de abastecimiento. Esta condición destaca la necesidad de desarrollar procesos de reciclaje para su recuperación en desechos como polvos fluorescentes, catalizadores e imanes.

El interés por el reciclaje de polvo fluorescente se debe al fuerte desarrollo en el campo de las telecomunicaciones, que ha provocado el reemplazo total de los dispositivos de

tubos de rayos catódicos (CRT) y lámparas fluorescentes por nuevas tecnologías, como pantallas LCD y LED (Amato y otros, 2019). Este reemplazo tecnológico ha tenido como consecuencia la generación de grandes cantidades de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (WEEE por sus siglas en inglés). En este sentido, Reino Unido, Francia, Alemania e Italia muestran la mayor contribución (Figura 2.10).

Los tubos de rayos catódicos (CRT) y las lámparas fluorescentes son considerados por la Unión Europea como residuos peligrosos por su contenido de mercurio (Innocenzi y otros, 2013; Ippolito y otros, 2017). Contienen vidrio, materiales ferrosos y polvos fluorescentes. Los tratamientos actuales permiten la recuperación de vidrio, metales y plásticos. Sin embargo, los polvos fluorescentes comúnmente son desechados como materiales peligrosos, a pesar de su contenido relevante en REE (Amato y otros, 2019). De hecho, según lo informado por Tkaczyk y otros, (2018), esta fracción podría ser una posible fuente de: Y, Eu, Ce, Tb y Gd.

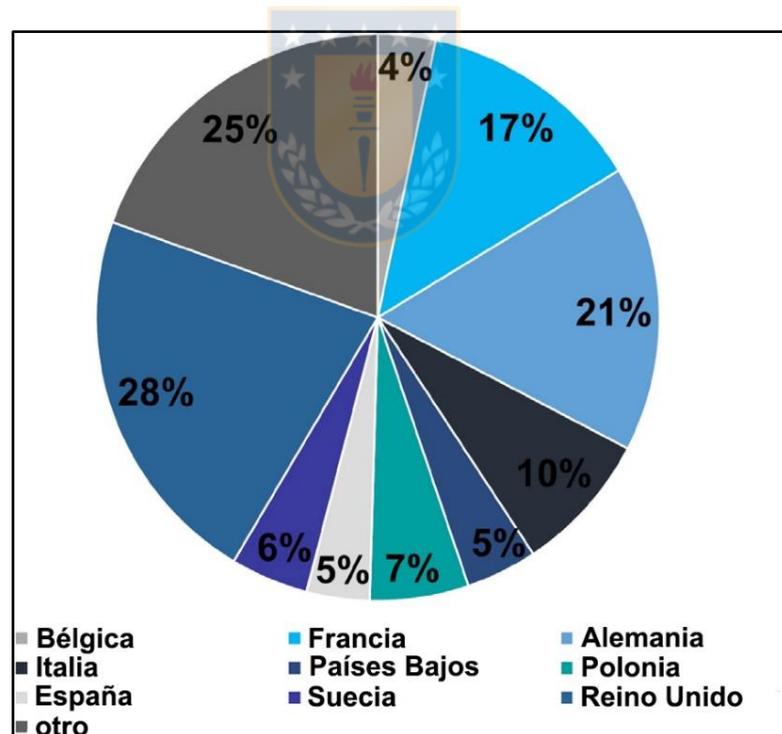


Figura 2.10. Contribución de los países europeos en la generación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Adaptado de Amato y otros (2019).

Los catalizadores (FCC) gastados pueden administrarse industrialmente para la recuperación de metales, regenerarse para su reutilización o desecharse en vertederos. La primera opción podría permitir una ventaja económica, sin embargo, produce una gran cantidad de residuos peligrosos e impactos ambientales significativos. Por otro lado, la regeneración puede aplicarse un número limitado de veces y no es posible para todo el sistema catalítico. Es evidente que la opción de desecharse en vertederos causa la pérdida de la fracción de alto valor, combinada con un efecto ambiental negativo (Aung y Ting, 2005 en Amato, 2019). Actualmente, las principales técnicas de reciclaje de catalizadores incluyen la producción de cemento y materiales cerámicos, agentes de filtrado de aguas residuales y mezclas asfálticas, gracias a sus características intrínsecas (Amato y otros, 2019). Las aplicaciones menores consisten en su uso como catalizadores para la pirólisis / gasificación de plástico y biomasa o la producción de combustible sintético (Zhang y otros, 2009). Sin embargo, estos procesos no se han desarrollado ampliamente a escala industrial y la fracción explotada aún es baja. Por lo tanto, la eliminación en vertederos o el uso de mezclas de concreto sigue siendo la opción principal para el manejo de catalizadores gastados, a pesar de su contenido de REE y posibles metales valiosos, como vanadio (V) y níquel (Ni), potencialmente recuperables.

En el caso de los imanes permanentes hasta ahora no se ha realizado ningún reciclaje que vaya más allá de la prueba de concepto ya que las unidades de disco duro generalmente no se separan de los computadores, sino que se trituran y desechan.

Para concluir, agregar que la alta intensidad energética y la generación de desechos químicos y aguas residuales durante la separación y extracción de REE en el proceso de reciclaje son obstáculos que dificultan aún más su recuperación. Por lo mismo su actual tasa de reciclaje sigue siendo significativamente más baja que para otros materiales reciclables (menos del 1%) (Binnemans y otros, 2013).

3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

En la Cordillera de la Costa de Chile central, entre las latitudes 32°S y 42°S, afloran en forma continua rocas pertenecientes al basamento cristalino (Figura 3.1). Este basamento comprende un complejo ígneo-metamórfico desarrollado durante el Paleozoico superior a lo largo del margen sur y suroeste de Gondwana (Hervé, 1988; Hervé y otros, 2007).

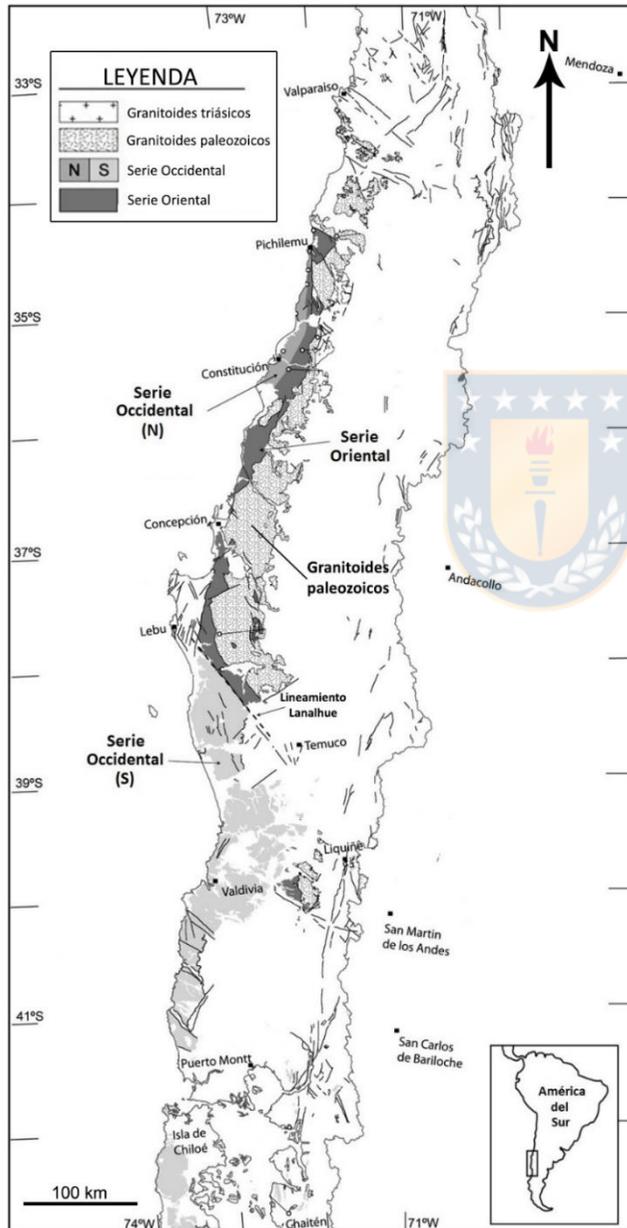


Figura 3.1. Distribución general del basamento cristalino en la Cordillera de la Costa de Chile central. Modificado de (Hervé y otros, 2013).

De acuerdo a sus características litológicas, estructurales y grado metamórfico, las rocas metamórficas han sido interpretadas como un cinturón metamórfico pareado dividido en dos franjas paralelas denominadas Serie Occidental y Serie Oriental (Aguirre y otros, 1972; Godoy, 1970; Hervé y otros, 2007). La Serie Occidental de alta-P y baja-T está representada por la combinación de secuencias siliciclásticas (metagrauvas) derivadas del continente y porciones de corteza oceánica superior (metabasitas) desmembrada. Mientras que la Serie Oriental de baja-P y alta-T está compuesta principalmente por metagrauvas de origen turbidítico (Hervé y otros, 2007).

A escala regional, estas series se disponen en contacto por falla NW-SE (Falla Lanalhue), al sur de la Cordillera de Nahuelbuta (Glodny y otros, 2008) y presentan un contacto de transición a los 35°30'S (Hervé y otros, 2007). Infrayacen en inconformidad con secuencias marino-continentales del Triásico, Cenozoico de Arauco y depósitos no consolidados cuaternarios.

Las rocas intrusivas que afloran a lo largo de la Cordillera de la Costa corresponden al Batolito Costero del Sur de Chile definido por Hervé y otros (1987). Intruye al Basamento Metamórfico de la Serie Oriental y se dispone en una franja NNE-SSW siempre al este de ésta. Está compuesto principalmente por granitoides calcoalcalinos de edad Carbonífero superior a Pérmico (Ferraris, 1981; Gajardo 1981; Hervé y otros 1976; Hervé y otros 1988; Nishimura, 1971; Yung, 2016) pero se registran de manera restringida diversos pulsos magmáticos mesozoicos como los cuerpos monzograníticos triásicos en la Península de Hualpén (Creixell, 2001), y plutones jurásicos que tienen un carácter bimodal ácido-básico, formado por leucogranitos, dioritas y gabros entre los 35°30'-36°30'S (Hervé y Munizaga, 1978; Suazo, 2005).

Creixell (2001), divide las rocas paleozoicas del Batolito Costero en tres subunidades intrusivas (Figura 3.2), que de norte a sur se denominan: Granitoides Concepción, Tonalitas Santa Juana y Granitoides Nahuelbuta. Los Granitoides Concepción contienen monzogranitos de biotita como litología dominante, con cantidades menores de tonalitas de biotita y muscovita. Las Tonalitas Santa Juana están formadas principalmente por tonalitas de anfíbol y biotita con enclaves microdioríticos y una marcada foliación. Y los

Granitoides Nahuelbuta se componen en su mayoría por granodioritas y tonalitas de biotita.

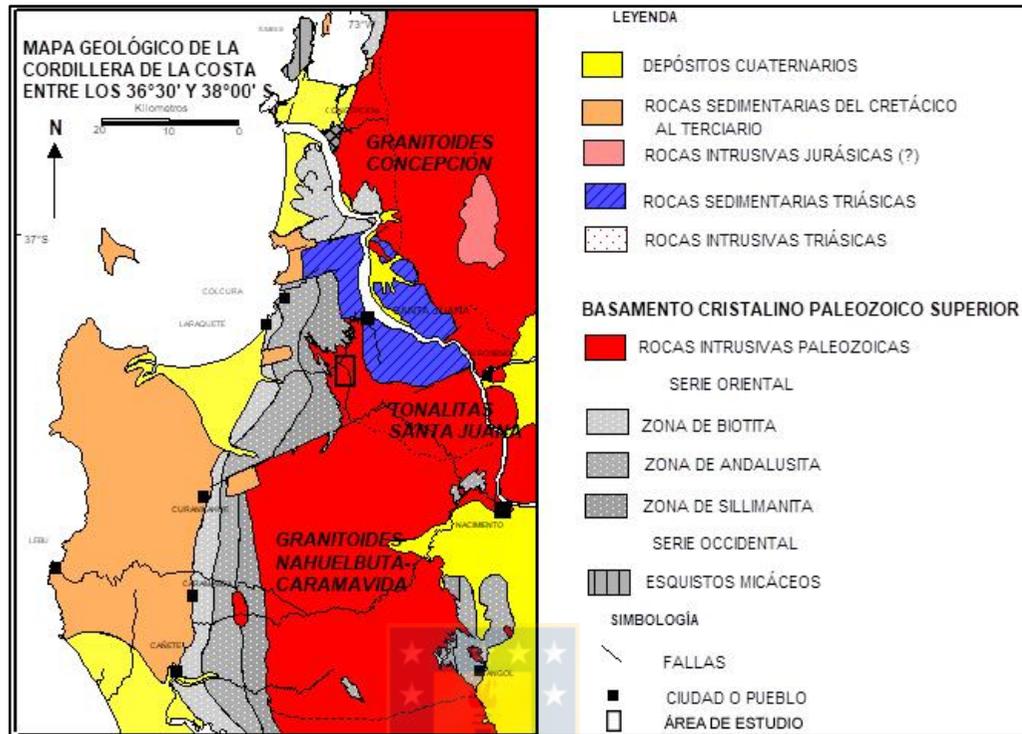


Figura 3.2. Mapa geológico con la división de las subunidades intrusivas definidas por Creixell (2001). El recuadro en negro corresponde al área de estudio de este trabajo.

Durante el Mesozoico se registra un evento de extensión en el Triásico en el cual se depositan secuencias sedimentarias marino-continentales a lo largo del valle inferior del río Biobío que conforman los Estratos Santa Juana (Nielsen, 2005). Posteriormente en el Cretácico, se deposita la Formación Quiriquina (Biró, 1982), que corresponde a una secuencia transgresiva que aflora en la costa (Pineda, 1983).

Por último, en el Cenozoico se depositan sedimentos marinos alternados con ciclos continentales desde el Eoceno inferior hasta el Plioceno dando origen a las formaciones sedimentarias Curanilahue, Boca Lebu, Trihueco, Millongue, Ranquil y Tubúl, que afloran en las zonas costeras de la región (Pineda, 1983).

A continuación en la Tabla 3.1 se presenta un cuadro resumen que muestra los minerales principales, accesorios, edad y Σ REE de las distintas unidades intrusivas que afloran entre los 36°00' S y 38°00' S.

Tabla 3.1. Cuadro resumen de las distintas unidades intrusivas que afloran entre los 36°00' S y 38°00' S.

Unidad	Subunidad	Litología	Minerales principales	Minerales accesorios	Edad (Ma)	Σ REE en roca total (ppm)	Referencias
Rocas intrusivas paleozoicas	Rocas intrusivas paleozoicas	Granodiorita	Plagioclasa, microclina, cuarzo y biotita.	Zircón, apatito y titanita.	Paleozoico	-	Ferraris (1981), Gajardo (1981), Suazo (2005)
		Monzogranito	Ortoclasa, plagioclasa, cuarzo, biotita y muscovita.	Apatito y zircón.	Paleozoico	-	Ferraris (1981), Gajardo (1981), Suazo (2005)
Complejo Plutónico Penco	Complejo Plutónico Penco	Tonalita de granate y biotita (TGB)	Plagioclasa, cuarzo, granate y biotita	Allanita, apatito y zircón	318.9 ± 2.2	2530-2731	Álvarez (2016), Yung (2016)
		Tonalita de biotita y anfíbol (TBA)	Cuarzo, plagioclasa, biotita y anfíbol	Zircón	312.7 ± 1.8	289-361	Álvarez (2016), Yung (2016)
		Monzogranito de biotita (MB)	Cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico (microclina y ortoclasa) y biotita	Zircón	-	-	Álvarez (2016), Yung (2016)
		Diorita cuarcífera de anfíbol y biotita (DCAB)	Plagioclasa, cuarzo, anfíbol y biotita	Zircón	307.3 ± 1.8	191-421	Álvarez (2016), Yung (2016)
Granitoides Concepción (GC)	Granitoides Concepción (GC)	Monzogranito de biotita	Plagioclasa, microclina, cuarzo, biotita y muscovita	Zircón y apatito	310 ± 20	174	Creixell (2001), Nishimura (1971)
		Tonalita de biotita y mica blanca	Cuarzo, plagioclasa, biotita y mica blanca.	Zircón y apatito.	-	315	
Plutón central de Nahuelbuta	Tonalitas de Santa Juana (TSJ)	Tonalita de anfíbol y biotita	Plagioclasa, cuarzo, biotita y anfíbol.	Zircón y apatito.	-	101-190	Creixell (2001)
	Granitoides de Nahuelbuta (GNA)	Granodiorita de biotita y anfíbol	Plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo, biotita y anfíbol.	Zircón y apatito ± turmalina, epidota, monacita, titanita e ilmenita.	298 ± 4 312 ± 35	100-243	Creixell (2001), Hervé y otros (1976), Hervé y otros (1988)
		Tonalita de biotita y anfíbol	Plagioclasa, cuarzo, biotita y anfíbol. Se diferencian de las granodioritas por un menor porcentaje modal de feldespato alcalino (microclina).			130	
Plutón Hualpén (PH)	Plutón Hualpén (PH)	Monzogranito	Cuarzo, plagioclasa, ortoclasa, biotita, mica blanca y turmalina	Monacita ± apatito, zircón y pirita.	215 ± 4	70-85	Creixell (2001), Hervé y otros (1988)

Rocas hipabisales del Triásico superior	Rocas hipabisales del Triásico Superior	Diabasas de Coipín	Plagioclasa y clinopiroxeno	titanita.	Triásico superior	-	Suazo (2005)
Unidad Hualve	Unidad Hualve	Gabro (Opx, Hbl, Cpx)	Plagioclasa, anfíbol, ortopiroxeno y clinopiroxeno	-	205	-	Hervé y Munizaga (1978), Suazo (2005)
		Tonalita (Bt, Hbl)	Plagioclasa, cuarzo, biotita y anfíbol.	Titanita, zircón y apatito.	173	-	Hervé y Munizaga (1978), Suazo (2005)
		Diabasa porfídica (Cpx, Opx).	Plagioclasa, clinopiroxeno y ortopiroxeno	-	-	-	Suazo (2005)
Unidad Ninhue	Unidad Ninhue	Diorita (Cpx, Hbl)	Plagioclasa, clinopiroxeno y anfíbol.	Apatito, titanita y zircón.	-	-	Suazo (2005)
		Gabro (Cpx, Opx)	Plagioclasa, clinopiroxeno y ortopiroxeno	Apatito.	-	-	Suazo (2005)



4. GEOLOGÍA LOCAL

En este capítulo se presentan las características geológicas del área de estudio y se describen las unidades reconocidas en terreno. El mapa geológico (Figura 4.1) proporciona un resumen de dicha geología.

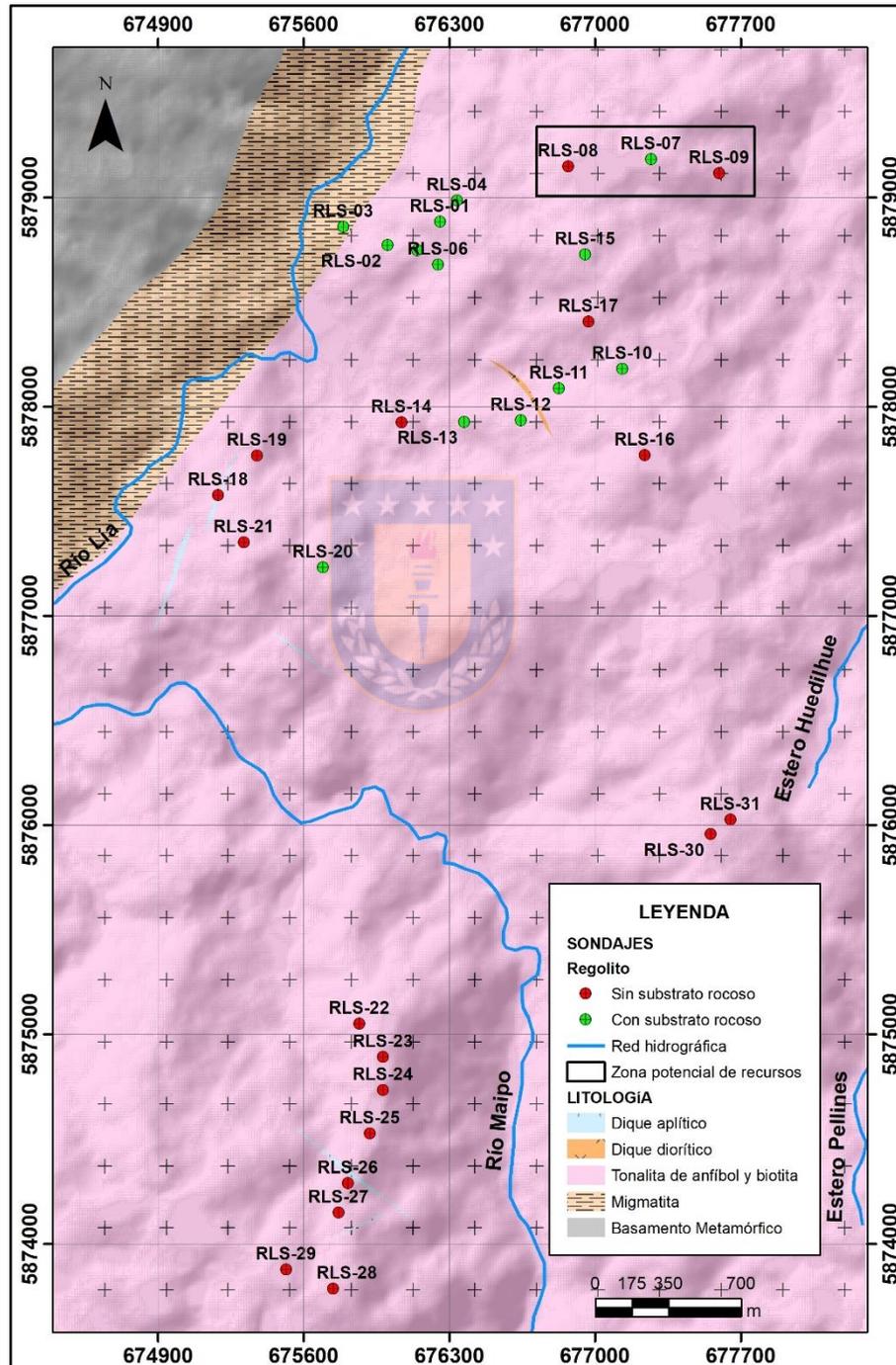


Figura4.1. Mapa geológico a escala 1:24.000 del área de estudio.

4.1. Petrografía

De acuerdo con los análisis modales de secciones delgadas (Tabla 4.1) se determinó la existencia de seis unidades, dos metamórficas y cuatro intrusivas, exceptuando el basamento metamórfico y los diques aplíticos que no fueron estudiados microscópicamente.

4.1.1. Unidades metamórficas

4.1.1.1. Basamento metamórfico

En la parte noroccidental del área de estudio se reconocen esquistos de biotita (Fotografía 4.1) y en menor medida metapelitas pertenecientes al Basamento Metamórfico. Macroscópicamente los esquistos muestran una coloración parda grisácea, textura esquistosa y están constituidos principalmente por biotita y cuarzo. Fuera del área de estudio y de manera restringida, en dirección suroeste cercano al contacto por intrusión con la unidad tonalítica los esquistos presentan fenocristales de granate y exhiben una foliación de carácter intenso con una orientación predominante entre los N20-40°E/40-50°SE.



Fotografía 4.1. Esquisto de biotita con bandeamiento de cuarzo y micas y trazas de granate.

Tabla 4.1 Análisis modal de secciones delgadas pulido transparente en muestras de roca del área de estudio.

Muestra	Este	Norte	Cota (m)	Prof. muestra de roca (m)	Qtz	Pl	Orth	Hbl	Bt	Grt	Ms-Ser	Chl	Prh	Cal	Ep	And	Crn	Zrn	Ttn	Ap	Op
Anfibolita																					
RLS-07D	677269	5879184	376	2,1	8,41	29,08	0,76	37,22	3,63	0,21	1,72	1,00	-	-	-	5,33	11,83	0,01	-	0,01	0,29
Migmatita																					
RLS-03	675790	5878860	183	52,8	9,53	19,50	47,69	0,17	11,03	1,85	2,24	6,07	-	0,83	-	-	-	0,01	-	0,11	0,89
Tonalita de anfíbol y biotita																					
RLS-04	676335	5878987	279	15,9	26,0	48,0	-	9,0	16,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,0	-
RLS-06	676244	5878680	249	49,6	10,0	40,0	-	12,0	-	-	-	25,0	5,0	2,0	3,0	-	-	1,0	1,0	1,0	-
RLS-07T	677269	5879184	376	26,8	17,26	54,49	0,41	11,20	15,40	-	0,26	0,11	-	-	0,02	-	-	0,03	-	0,38	0,37
RLS-10	677131	5878181	371	27,1	28,06	44,10	0,47	12,20	13,94	-	0,18	0,04	-	-	0,02	-	-	0,03	0,51	0,42	0,02
RLS-11	676826	5878089	319	28,1	22,0	46,0	-	17,0	-	-	1,0	8,0	-	2,0	2,0	-	-	1,0	-	1,0	-
RLS-15	676951	5878728	384	29,8	18,0	47,0	-	24,0	8,0	-	-	-	-	-	-	-	-	1,0	1,0	1,0	-
RLS-20	675691	5877232	310	25,2	21,0	46,0	-	10,0	15,0	-	-	-	4,0	1,0	1,0	-	-	-	1,0	1,0	-
Tonalita de biotita																					
RLS-02T	676003	5878773	219	45,7	16,23	45,98	0,01	0,68	8,30	-	22,35	2,47	1,08	2,18	-	-	-	0,04	-	0,01	0,45
RLS-05	676145	5878748	253	58,1	23,0	40,0	-	-	18,0	9,0	-	-	4,0	3,0	-	-	-	1,0	1,0	1,0	-
Diorita (dique)																					
RLS-02D	676003	5878773	219	40,1	-	48,62	0,01	1,00	37,80	0,01	8,85	0,36	0,06	-	-	-	-	0,13	-	2,21	0,67
Microdiorita cuarcífera (dique)																					
RLS-04	676335	5878987	279	15,9	7,0	46,0	-	29,0	15,0	-	-	-	-	-	-	-	-	1,0	1,0	1,0	-
Xenolito																					
RLS-07B	677269	5879184	376	26,7	-	49,0	-	19,0	30,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,0	1,0	-

Abreviaciones: Qtz = cuarzo; Pl = plagioclasa; Orth = ortoclasa; Hbl = anfíbol; Bt = biotita; Grt = granate; Ms-Ser = muscovita-sericita; Chl = clorita; Prh = Prehnita-pumpellita; Cal = calcita; Ep = epidota; And = andalusita; Crn = corindón; Zrn = zircón; Ttn = titanita; Ap = apatito; Op = opaco

Los % modales de las muestras RLS-02D; RLS-02T; RLS-03; RLS-07T y RLS-10 corresponden a análisis de mineralogía automatizada mediante TIMA-X.

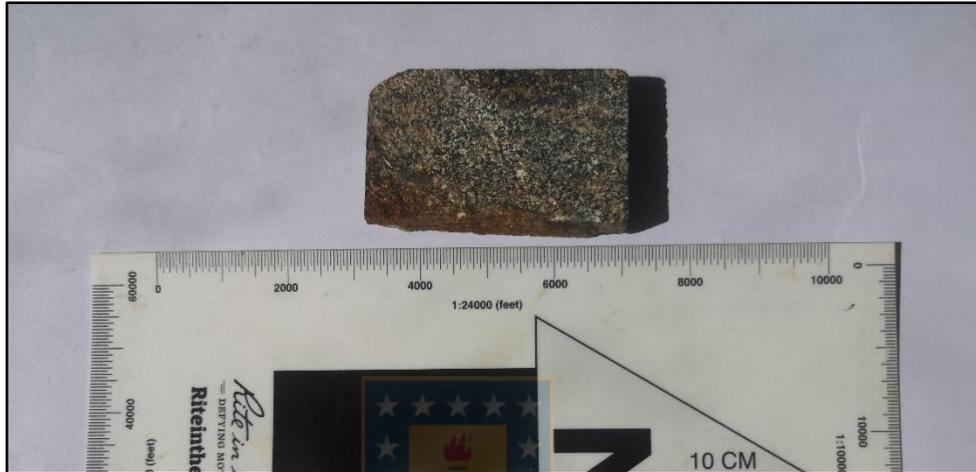
Los % modales de la muestra RLS-07D corresponden a valores reportados por análisis de mineralogía automatizada mediante TIMA-X que fueron recalculados.

Los % modales de las muestras RLS-04; RLS-05; RLS-06; RLS-07B; RLS-11; RLS-15 y RLS-20 corresponden a estimaciones visuales.

Datum WGS84; Huso 18S

4.1.1.2. Anfibolita

Esta litología (Fotografía 4.2) solamente se observa en la parte superficial del sondaje RLS-07 pero está ubicada en un área con presencia de anomalías locales de REE. A nivel macroscópico presenta una textura granoblástica de grano fino. Contiene 50% anfíbol, 30% plagioclasa fuertemente alterada a caolín, 10% cuarzo, 5% biotita y 5% de un mineral en tono rosa amarillento pálido, hábito cristalino y brillo vítreo (corindón?).



Fotografía 4.2. Anfibolita de grano fino y textura granoblástica.

4.1.1.3. Migmatita

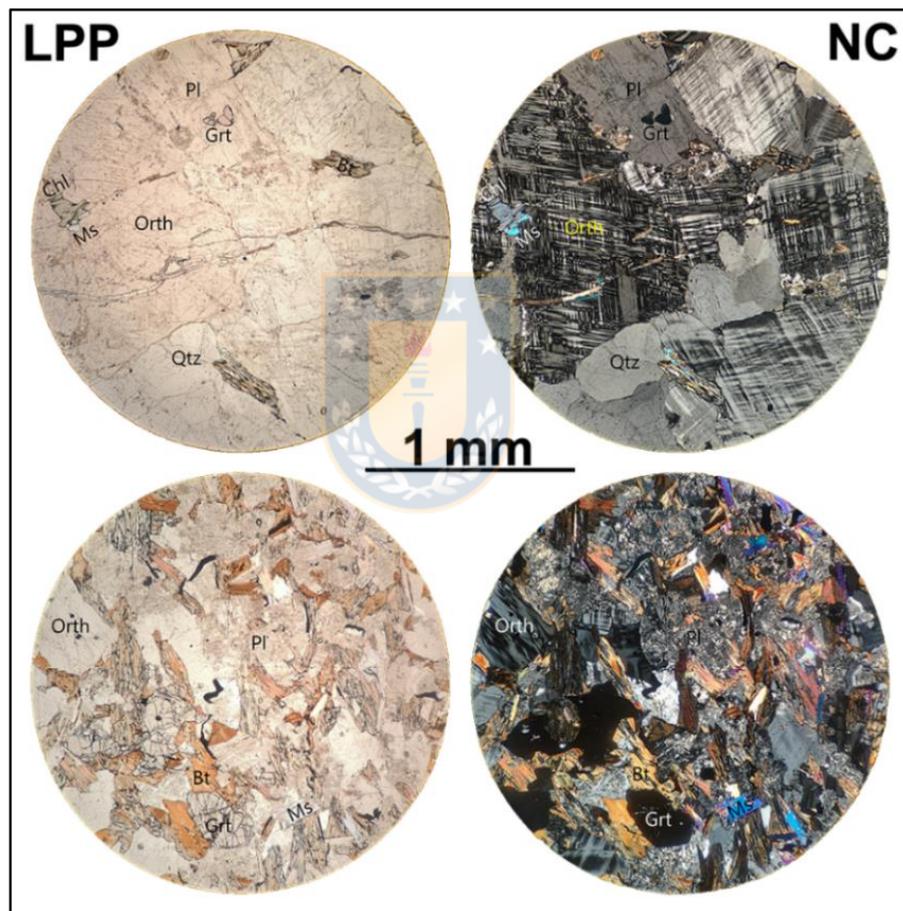
En la zona noroeste del área se reconoce una franja migmatítica con orientación de bandeamiento N15-20°E/40-60°SE, generada en la zona de contacto entre rocas metamórficas e intrusivas.

A nivel macroscópico las rocas presentan una textura bandeada de grano fino a medio; el ángulo de las bandas es de 40° con respecto al eje del testigo.

A nivel microscópico (Microfotografía 4.3) las bandas claras (leucosoma) presentan una textura granoblástica de grano medio caracterizada por la presencia de ortoclasa (58%), cuarzo (24%), plagioclasa (8%) y en menor proporción biotita (5%), clorita (3%), muscovita (1%) y granate (1%). La ortoclasa ocurre como cristales subidiomórficos, levemente seriados y granulometría variante entre 0,5-2,0 mm mientras que el cuarzo se presenta como cristales alotriomórficos de borde irregular rellenando espacios

disponibles. El resto de los minerales posee una granulometría fina menor a 1,0 mm y ocurren como cristales subidiomórficos.

Por su parte, las bandas oscuras (melanosoma) exhiben una textura granoblástica de grano fino definida por la presencia de plagioclasa (46%), ortoclasa (21%), biotita (15%), clorita (7%), granate (5%) y en menor cantidad, muscovita (3%), calcita (1%) presente en una vetilla, apatito (1%) y rutilo (1%). La plagioclasa ocurre como cristales idiomórficos y subidiomórficos de 0,5 mm de tamaño mientras los demás minerales presentan cristales subidiomórficos de tamaño variado entre 0,1-0,5 mm.



Microfotografía 4.3. Sección delgada muestra RLS-03 de migmatita que muestra en la parte de arriba el leucosoma y abajo el melanosoma. Orth: ortoclasa, Pl: plagioclasa, Qtz: cuarzo, Bt: biotita, Grt: granate, Chl: clorita, Ms: muscovita, LPP: luz polarizada plana, NC: nicoles cruzados.

4.1.2. Unidades intrusivas

De acuerdo con el diagrama de clasificación de Q-A-P de Streckeisen (1976) se confirma la existencia 3 unidades intrusivas: tonalita, diorita y diorita cuarcífera (Figura 4.2). Luego, en relación al contenido modal de minerales ferromagnesianos se distingue entre dos subunidades tonalíticas que según su ubicación espacial sugieren una especie de zonación con respecto a la profundidad de emplazamiento.

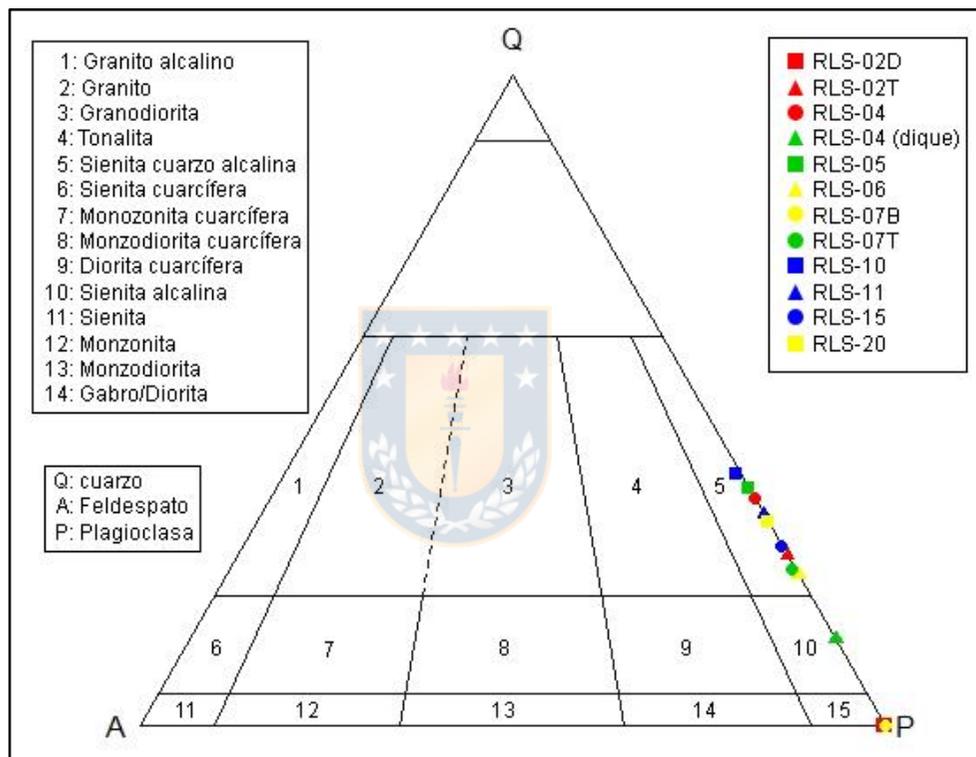


Figura 4.2. Diagrama de clasificación Q-A-P de las muestras de rocas intrusivas en río Lía. Modificado de Streckeisen (1976).

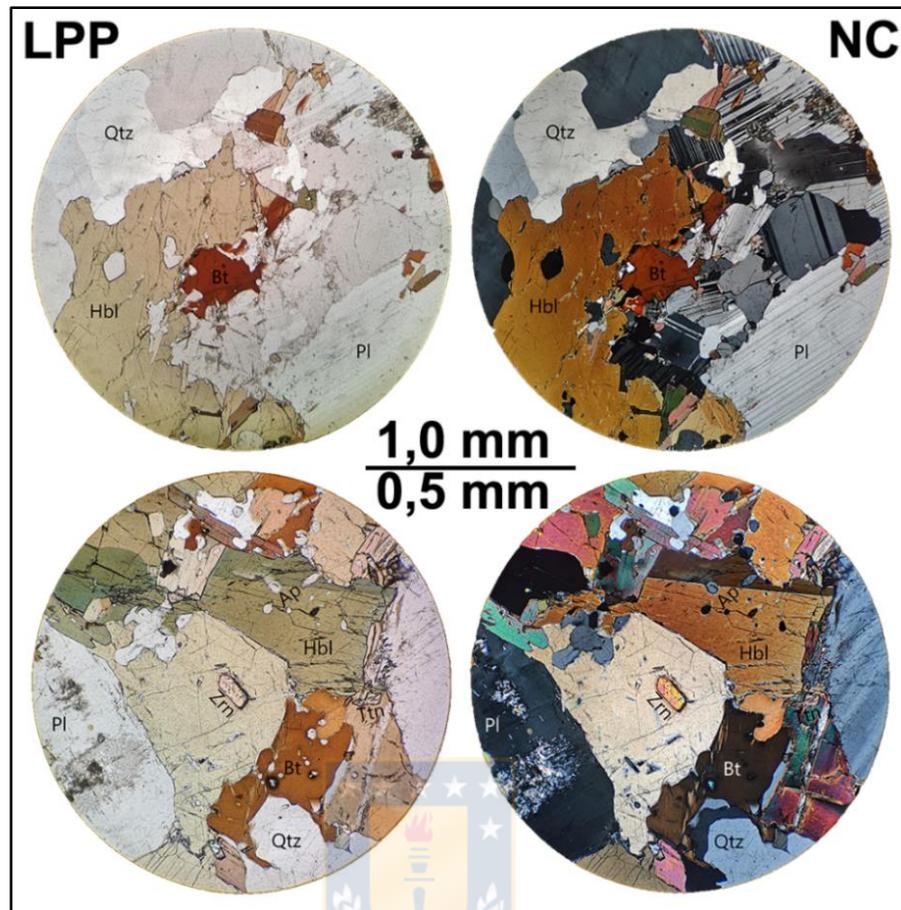
4.1.2.1. Tonalita de anfíbol y biotita

Subunidad que abarca la mayor extensión en el área de estudio y está caracterizada por su alto contenido de minerales máficos. Intruye a rocas del Basamento Metamórfico y fuera del área de estudio, en dirección noreste, infrayace en inconformidad a rocas sedimentarias de los Estratos Santa Juana. Las muestras de roca varían en un rango de profundidad entre 15,9-49,6 m.

Según observaciones macroscópicas las rocas muestran una coloración blanquecina grisácea y presentan una textura fanerítica equigranular de grano medio a grueso. Exhiben diversos xenolitos microdioríticos (RLS-07B), así como también, intrusiones de pequeños diques microdioríticos (2-6 cm de ancho; RLS-04 dique) orientados a 55° con respecto al eje del testigo.

Según observaciones microscópicas (Microfotografía 4.4) muestran en general una textura dimensional seriada variante entre grano fino a grueso con local desarrollo de texturas poiquilítica y mirmequítica. Están constituidas por plagioclasa (44-54%), cuarzo (17-28%), anfíbol (9-24%) y biotita (8-16%) como minerales dominantes. Se observan además, trazas de apatito, titanita, zircón como minerales accesorios; en ocasiones se distingue prehnita-pumpellita (RLS-20), muscovita (RLS-11) y rutilo (RLS-07T). La plagioclasa presenta cristales subidiomórficos de 0,2-8,0 mm ligeramente alterados a arcilla y sericita. El cuarzo ocurre como cristales alotriomórficos de borde irregular que se disponen intersticialmente. La biotita se presenta como cristales subidiomórficos de 0,1-2,8 mm que en algunos casos se encuentran parcialmente (RLS-20) o completamente (RLS-11) alterados a clorita. El anfíbol muestra un desarrollo parcial de sus caras cristalinas y posee una granulometría de 0,1-5,0 mm que es significativamente mayor a la de biotita. Por último, apatito, titanita y zircón comúnmente asociados a los minerales máficos exhiben un buen desarrollo de sus caras y granulometría inferior a 0,1 mm.

Las muestras RLS-11 y RLS-20 presentan clorita, epidota y calcita evidenciando la acción de un fluido hidrotermal propilítico.



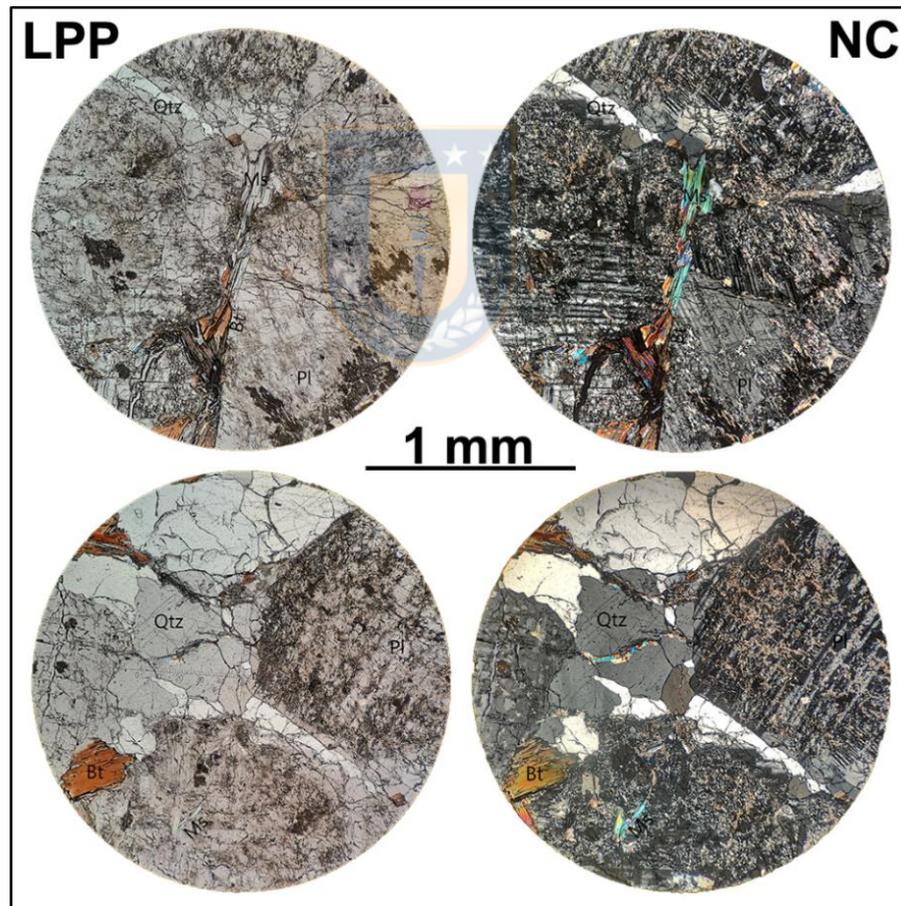
Microfotografía 4.4. Sección delgada muestra RLS-07 de tonalita de anfíbol y biotita. Pl: plagioclasa, Qtz: cuarzo, Hbl: anfíbol, Bt: biotita, Ap: apatito, Zrn: zircón, LPP: luz polarizada plana, NC: nicoles cruzados.

4.1.2.2. Tonalita de biotita

Subunidad que no aflora en superficie caracterizada por la ausencia de anfíbol en el contenido de minerales máficos. Las muestras varían en un rango de profundidad entre 45,7-58,1 m.

A nivel macroscópico las muestras presentan una coloración blanquecina y una textura fanerítica equigranular de grano grueso. Se observa cortada por un dique diorítico (RLS-02D) de grano medio que posee 4,4 m de espesor. La muestra RLS-05 perteneciente a esta subunidad posee contenido de granate en cúmulos. Sin embargo, estos cúmulos están restringidos a una dimensión muy acotada (10 cm) para un total de 6,9 m de tramo rocoso.

A nivel microscópico (Microfotografía 4.5) exhiben una textura hipidiomórfica granular de grano medio a grueso. Mineralógicamente, se componen de plagioclasa (40-46%), cuarzo (16-23%) y biotita (8-18%) como constituyentes principales. Presenta además, trazas de apatito, titanita, zircón y rutilo como minerales accesorios. En RLS-02T se observa también, trazas de muscovita, clorita y calcita (presente en una vetilla) mientras que RLS-05 contiene granate y prehnita-pumpellita asociada a biotita. La plagioclasa se presenta como cristales subidiomórficos de grano grueso 5,0 mm caracterizados por evidenciar una alteración moderada de arcillas y sericita. El cuarzo ocurre como cristales alotriomórficos que poseen en general una granulometría mayor a 3,0 mm. Por último, la biotita único mineral máfico presente muestra un desarrollo parcial de sus caras cristalinas y posee un tamaño de grano entre 0,5-1,0 mm.



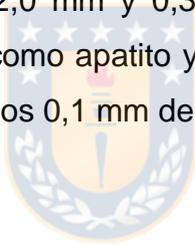
Microfotografía 4.5. Sección delgada muestra RLS-02T de tonalita de biotita. Pl: plagioclasa, Qtz: cuarzo, Bt: biotita, Ms: muscovita, LPP: luz polarizada plana, NC: nicoles cruzados.

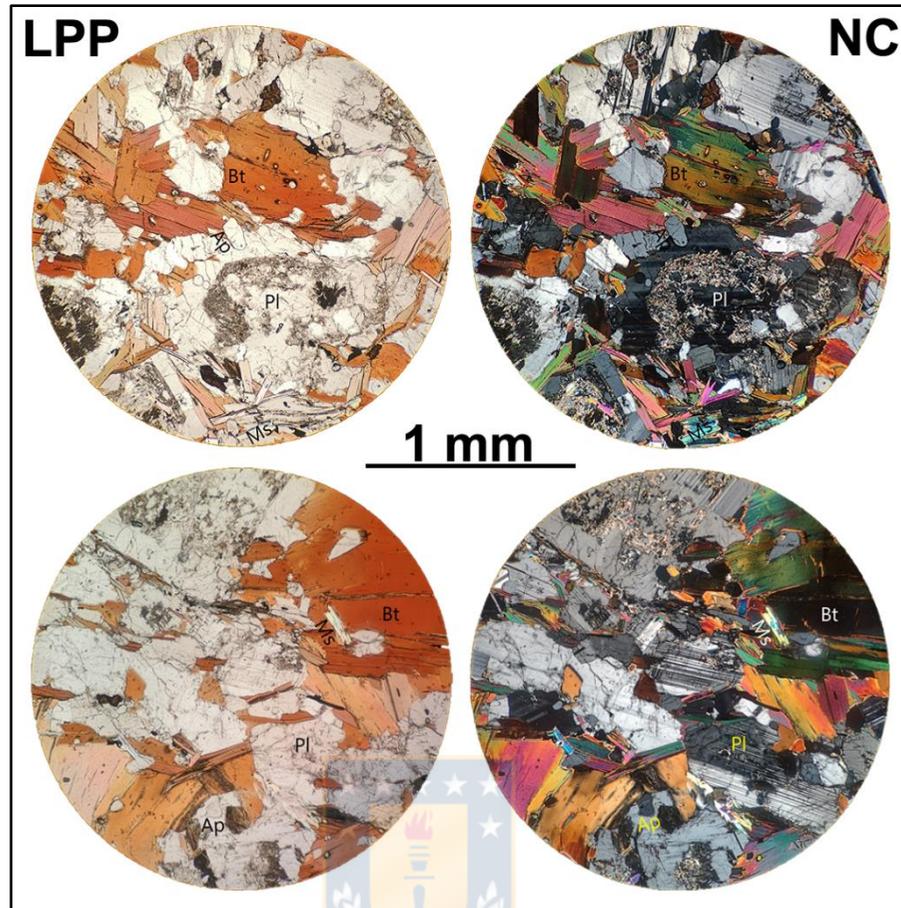
4.1.2.3. Dique diorítico

Dique diorítico que se observa cortando a tonalita de biotita a 40 mts de profundidad y a tonalita de anfíbol y biotita en superficie.

Según observaciones macroscópicas posee una coloración gris oscura en superficie fresca y exhibe una textura fanerítica equigranular de grano medio. Contiene pequeñas vetillas locales de clorita a 30° con respecto al eje del testigo y otras de calcita a 50°.

Microscópicamente (Microfotografía 4.6) presenta una textura hipidiomórfica granular de grano medio. La mineralogía principal está conformada por plagioclasa (49%), biotita (38%) y muscovita-sericita (9%). Además, contiene trazas de apatito, zircón y rutilo . La plagioclasa ocurre como cristales subidiomórficos de 0,1-2,0 mm de tamaño que evidencian una alteración a sericita y arcilla de carácter moderado afectando al centro de los cristales principalmente. Por otro lado las micas (biotita y muscovita) ocurren como cristales subidiomórficos de 0,1-2,0 mm y 0,3 mm de tamaño respectivamente. Por último, los minerales accesorios como apatito y zircón destacan por el buen desarrollo de sus cristales y alcanzan hasta los 0,1 mm de tamaño.





Microfotografía 4.6. Sección delgada muestra RLS-02D del dique diorítico. Pl: plagioclasa, Bt: biotita, Ap: apatito, Ms: muscovita, LPP: luz polarizada plana, NC: nicoles cruzados.

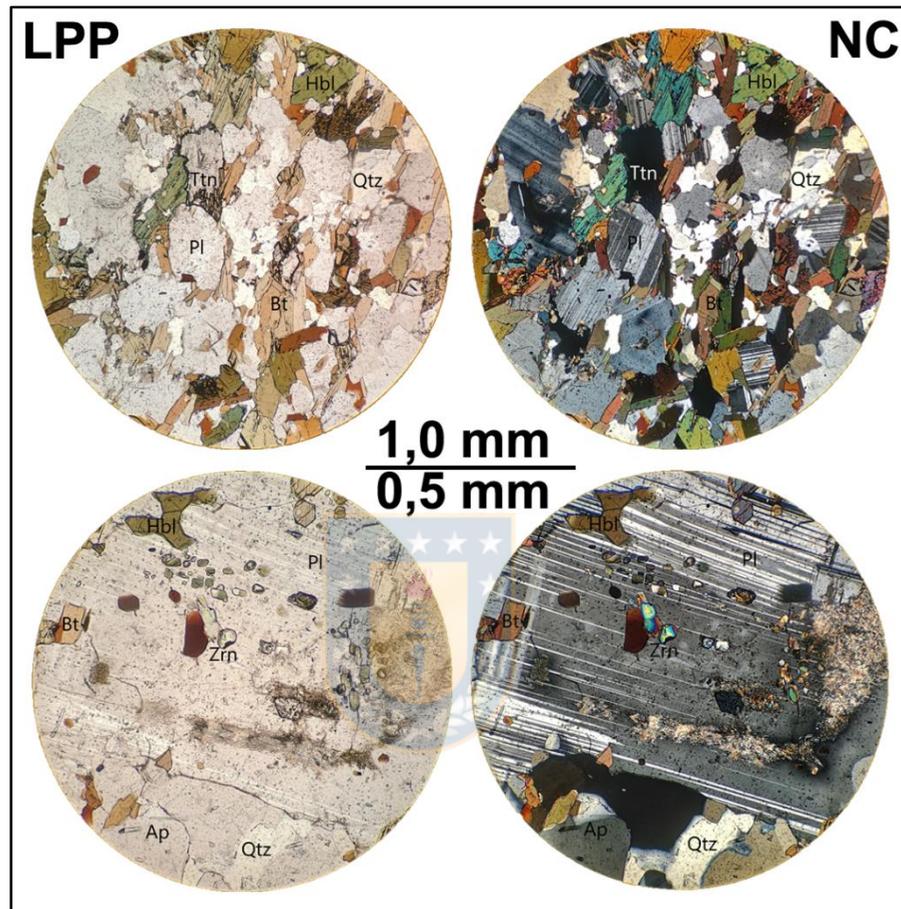
4.1.2.4. Dique de microdiorita cuarcífera

Dique de microdiorita cuarcífera de grano fino que se observa cortando a rocas de tonalita de anfíbol y biotita en un ángulo de 55° con respecto al eje del testigo.

Según observaciones macroscópicas posee una coloración gris oscura y presenta un espesor centimétrico (2-7 cm).

A nivel microscópico (Microfotografía 4.7) el dique exhibe una textura hipidiomórfica granular de grano fino con local desarrollo de una textura poiquilítica. Está compuesto por plagioclasa (46%) de hábito subhedral con un tamaño de grano entre 0,1-2,0 mm aunque solo dos cristales alcanzan el mayor tamaño; muy pocos cristales se encuentran alterados a sericita. Cuarzo (7%) que se presenta como cristales anhedrales rellenando

espacios disponibles. Anfíbol (29%) mineral máfico predominante en la muestra que posee un tamaño de grano entre 0,1-0,5 mm y hábito subhedral. Biotita (15%) de color pardo y hábito subhedral posee un tamaño de grano entre 0,1-0,5 mm. Como minerales accesorios se observan trazas de titanita, apatito y zircón.



Microfotografía 4.7. Sección delgada muestra RLS-04 del dique de microdiorita cuarcífera. Pl: plagioclasa, Qtz: cuarzo, Hbl: anfíbol, Bt: biotita, Ap: apatito, Ttn: titanita; Ap: apatito, Zrn: zircón, LPP: luz polarizada plana, NC: nicoles cruzados.

4.1.2.5. Dique aplítico

No hay muestras de roca de los diques aplíticos ya que fueron observados en terreno como material regolítico cortando a tonalita de anfíbol y biotita. Compuestos principalmente por cuarzo, caolín y muscovita presentan una potencia entre los 0,2 a 6,0 m y muestran una orientación preferencial que va entre los N20-45°W/75°NE a SW.

4.2. Identificación de minerales que contienen REE

4.2.1. Anfibolita

4.2.1.1. Mineralogía modal

La imagen en falso color de anfibolita (Figura 4.3a) muestra un alto contenido de espacios en blanco sin mineral debido a un error de fabricación en la que el mineral original presente en esos huecos fue eliminado durante el proceso de pulido. Por lo que el reporte de mineralogía modal es incorrecto. Al comparar la muestra de roca con el reporte de mineralogía modal y la imagen en falso color se deduce que la mayor parte de los espacios en blanco corresponden a plagioclasas fuertemente alteradas a caolines. Mediante un procesamiento fotográfico utilizando el software Photoshop se logró determinar que los espacios en blanco de la superficie de la muestra corresponden a un 27,75% del área total aproximadamente. Asumiendo que los espacios en blanco corresponden a plagioclasas es posible recalculer la abundancia de los minerales existentes (Figura 4.3b).

La anfibolita está conformada principalmente por anfíbol y plagioclasa y en menor proporción corindón, andalusita y biotita. No presenta contenido de minerales de REE como allanita o monacita pero sí cantidades trazas de minerales que pueden presentar contenido de REE en su composición como apatito (0,01%), zircón (0,01%) y granate (0,21%).

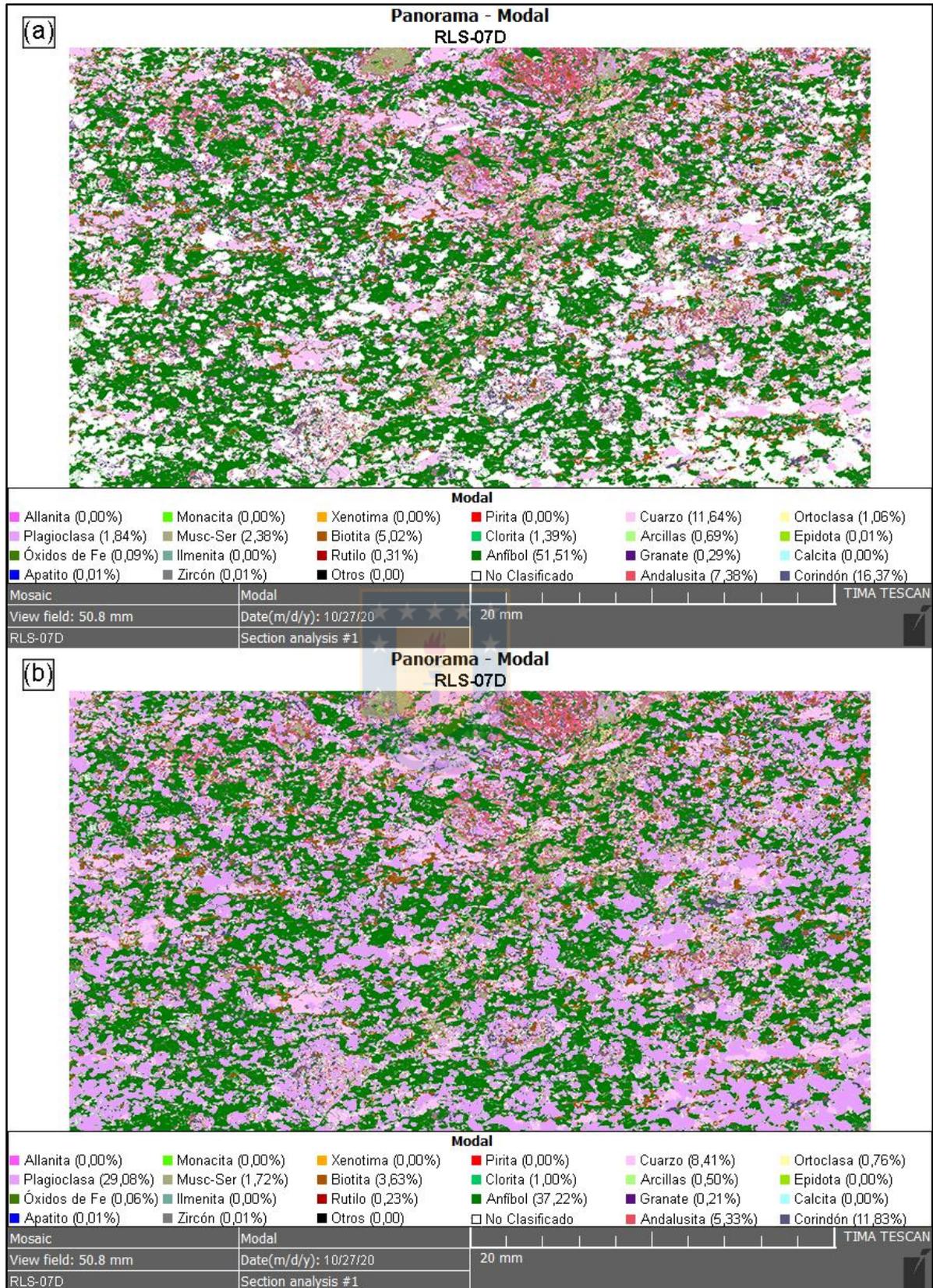


Figura 4.3. (a) Imagen en falso color de anfibolita que muestra su mineralogía modal. (b) Imagen en falso color de anfibolita que muestra su mineralogía modal recalculada.

4.2.1.2. Cuantificación de elementos de REE en anfíbol

De acuerdo con el análisis de espectros de rayos-x (Figura 4.4) no se observan peaks de REE observables, ya sea por el ruido natural del análisis o por traslape de peaks/artefacto de detección. La composición promedio para la fase anfíbol en anfíbolita es 37,2% O; 5,2% Mg; 6,2% Al; 22,8% Si; 1,4% K; 9,6% Ca; 1,0% Ti y 16,4% Fe.

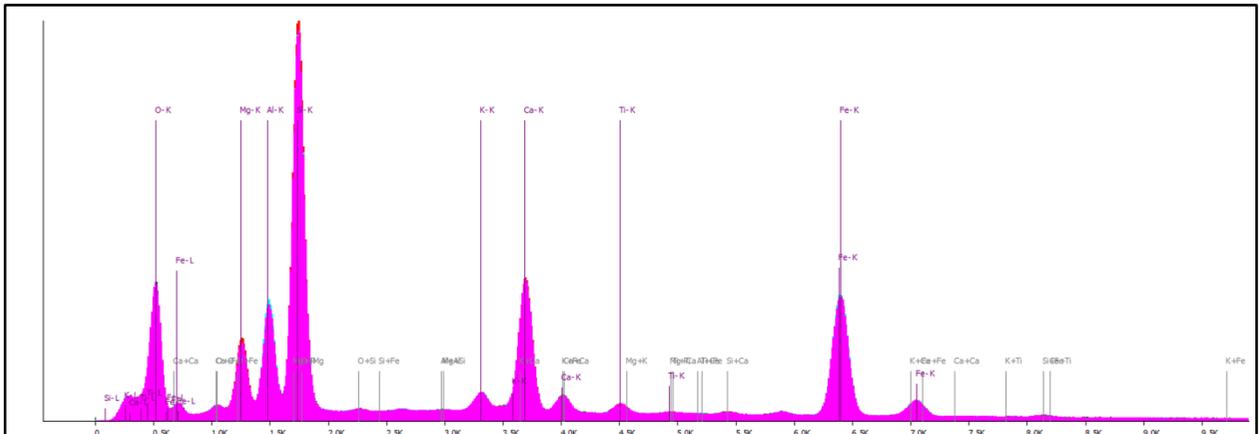


Figura 4.4. Espectro de composición de fase anfíbol en anfíbolita.

4.2.2. Migmatita

4.2.2.1. Mineralogía modal

La migmatita está constituida principalmente, según su mineralogía modal (Figura 4.5), por ortoclasa, plagioclasa, biotita y cuarzo, con cantidades menores de clorita y muscovita-sericita. Los minerales de REE corresponden a allanita (0,06%) y monacita (0,01%). Contiene también, minerales que pueden portar REE como apatito (0,11%), zircón (0,01%) y granate (1,85%).

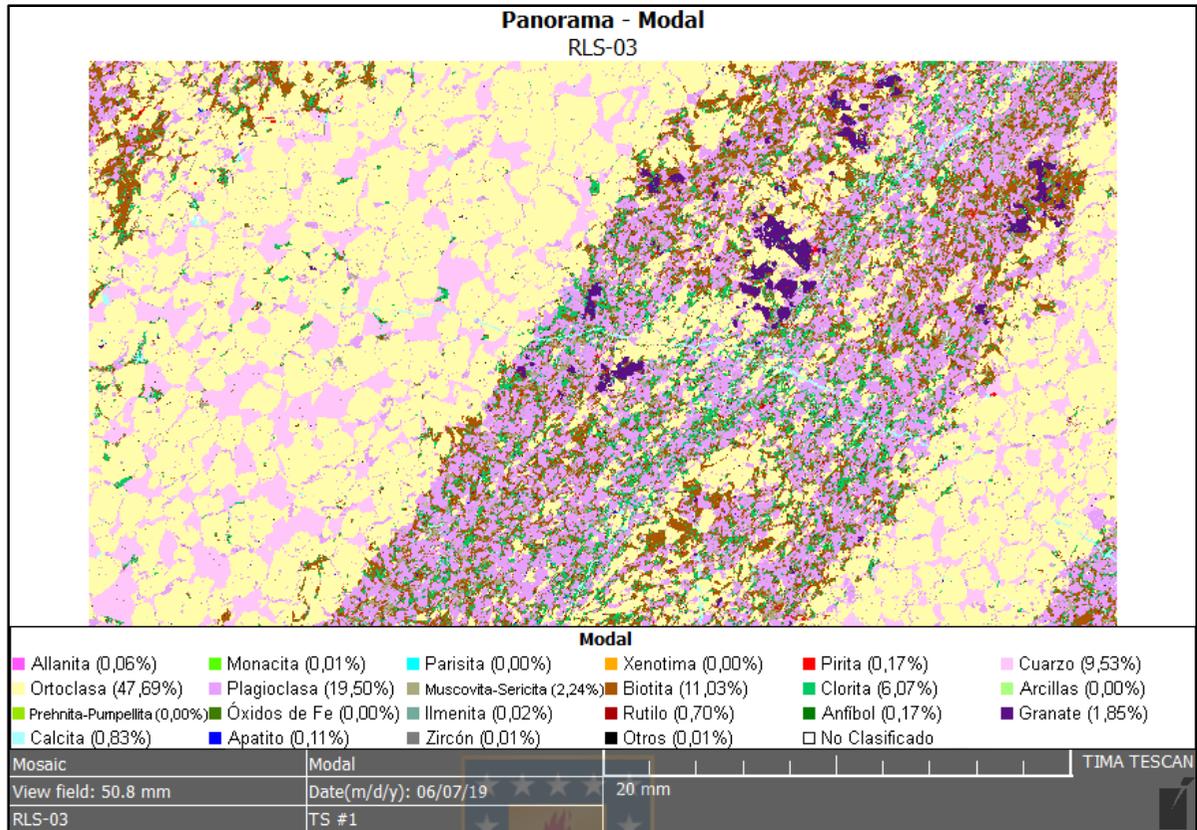


Figura 4.5. Imagen en falso color de migmatita que muestra su mineralogía modal.

4.2.2.2. Cuantificación de elementos de REE en allanita

Según el análisis de espectros de rayos-x (Figura 4.6) la composición de la fase allanita en migmatita es 38,49% O; 12,39% Al; 16,31% Si; 11,47% Ca; 10,45% Fe; 3,73% La y 7,13% Ce.

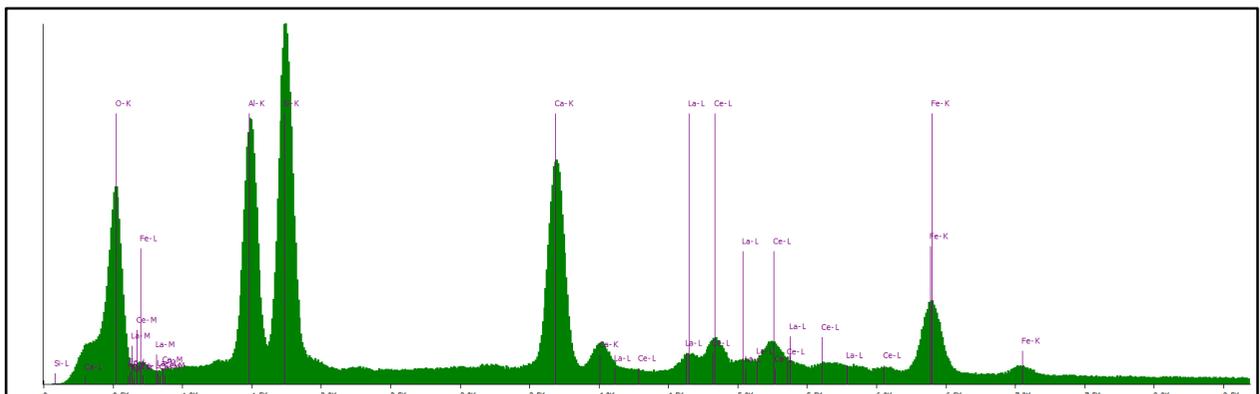


Figura 4.6. Espectro de composición de fase allanita en migmatita.

4.2.3. Tonalita de biotita

4.2.3.1. Mineralogía modal

Según su mineralogía modal (Figura 4.7) la tonalita de biotita se compone mayoritariamente de plagioclasa, muscovita-sericita, biotita y cuarzo, con cantidades menores de clorita y prehnita-pumpellita. Los minerales de REE que están presente son allanita (0,02%) y monacita (0,01%). Contiene además, minerales que pueden ingresar REE dentro de su estructura cristalina como apatito (0,01%) y zircón (0,04%).

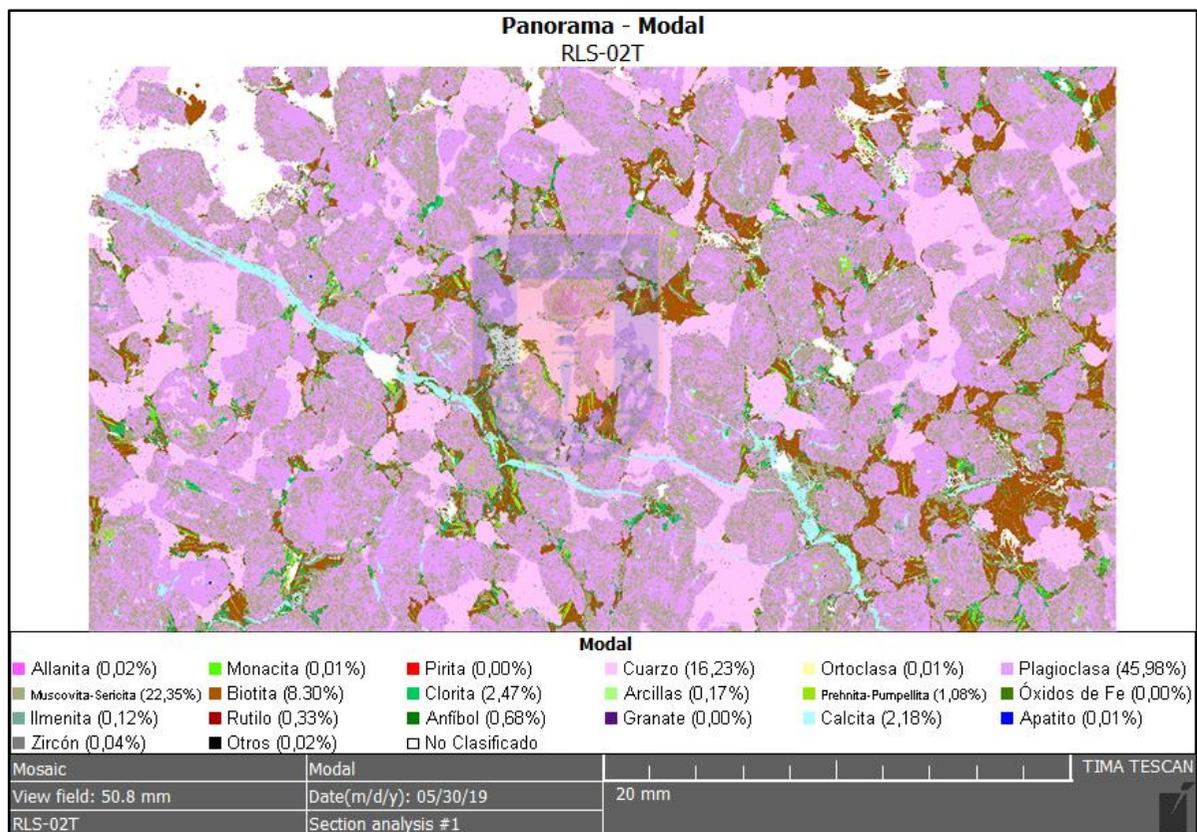


Figura 4.7. Imagen en falso color de tonalita de biotita que muestra su mineralogía modal.

4.2.3.2. Cuantificación de elementos de REE en allanita

De acuerdo con el análisis de espectros de rayos-x (Figura 4.8) la composición de la fase allanita en tonalita de biotita es 38,10% O; 12,25% Al; 15,87% Si; 10,75% Ca; 10,31% Fe; 4,30% La y 8,39% Ce.

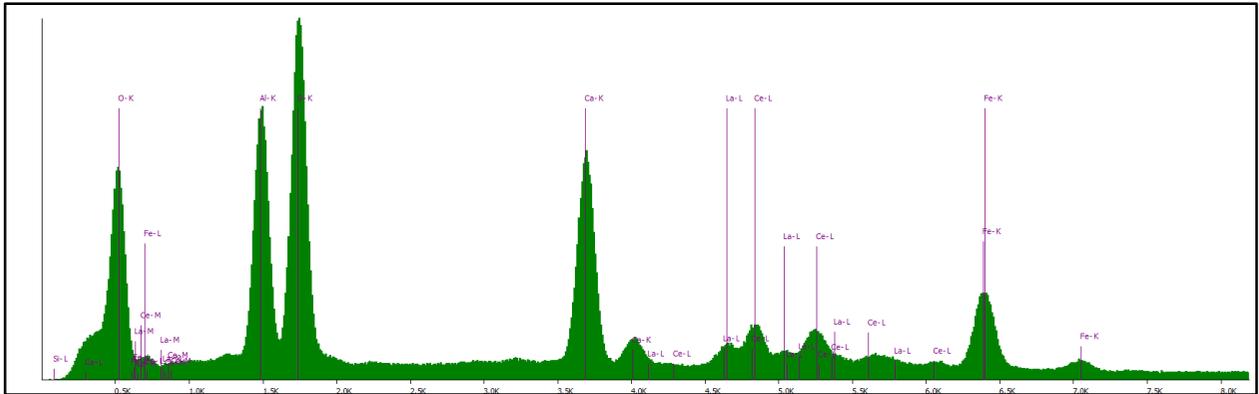


Figura 4.8. Espectro de composición de fase allanita en tonalita de biotita.

4.2.4. Tonalita de anfíbol y biotita

4.2.4.1. Mineralogía modal

La tonalita de anfíbol y biotita está constituida principalmente, según su mineralogía modal (Figura 4.9) por plagioclasa, cuarzo, biotita y anfíbol. El mineral de REE presente en la roca es allanita (0,01-0,05%). Posee también minerales que pueden portar REE como titanita (0,00-0,51%), apatito (0,38-0,42%) y zircón (0,03%).

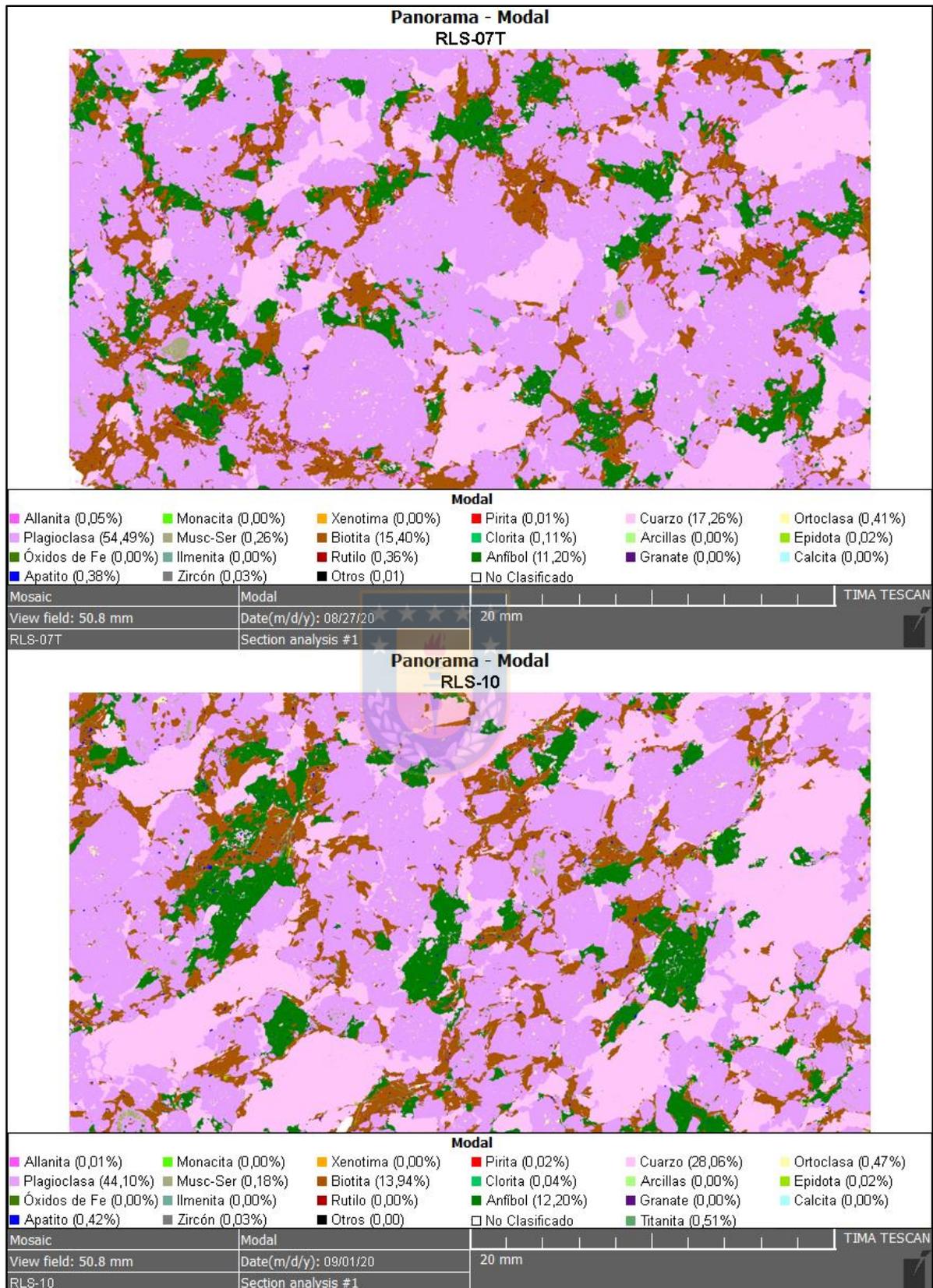


Figura 4.9. Imagen en falso color de tonalita de anfíbol y biotita que muestra su mineralogía modal.

4.2.4.2. Cuantificación de elementos de REE en allanita.

El análisis de espectros de rayos-x (Figura 4.10) indica que la composición promedio para la fase allanita en muestra RLS-07T es 33,68% O; 11,76% Al; 17,36% Si; 12,85% Ca; 9,92% Fe; 5,11% La y 9,28% Ce. Y para la muestra RLS-10 es 34,08% O; 13,17% Al; 17,57% Si; 13,59% Ca, 9,14% Fe; 3,95% La y 8,47% Ce.

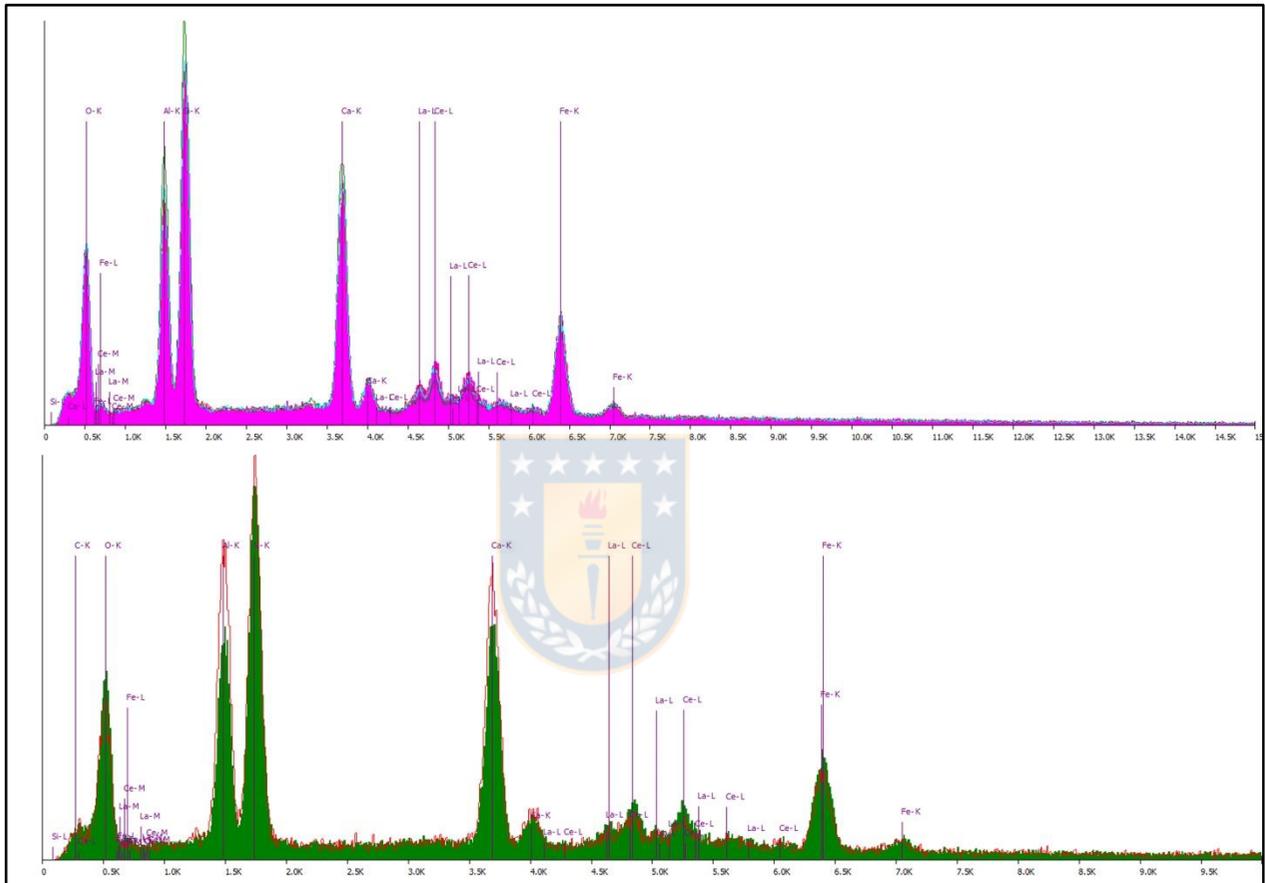


Figura 4.10. Espectros de composición de fase allanita en tonalita de anfíbol y biotita. El espectro de color fucsia corresponde al análisis de la muestra RLS-07T y el de color verde corresponde a la muestra RLS-10.

4.2.4.3. Cuantificación de elementos de REE en titanita.

De acuerdo con el análisis de espectros de rayos-x (Figura 4.11) no se observan *peaks* de REE observables, ya sea por el ruido natural del análisis o por traslape de *peaks*/ artefacto de detección. La composición promedio de la fase titanita en tonalita de anfíbol y biotita es 29,4% O; 1,8% Al; 16,0% Si; 23,1% Ca; 27,8% Ti y 1,8% Fe.

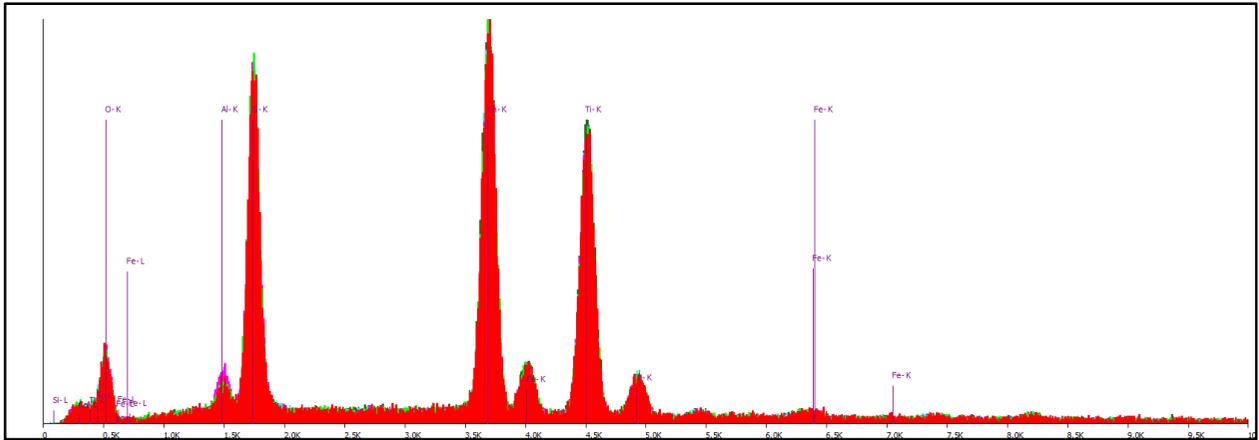


Figura 4.11. Espectro de composición de fase titanita en tonalita de anfíbol y biotita.

4.2.5. Dique diorítico

4.2.5.1. Mineralogía modal

El panorama modal del dique diorítico (Figura 4.12) está conformado principalmente por silicatos que incluyen plagioclasa, biotita y muscovita-sericita. Los minerales de REE que contiene son allanita (0,10%) y monacita (0,02%). Además, contiene minerales que pueden presentar REE en su composición como apatito (2,21%) y zircón (0,13%).

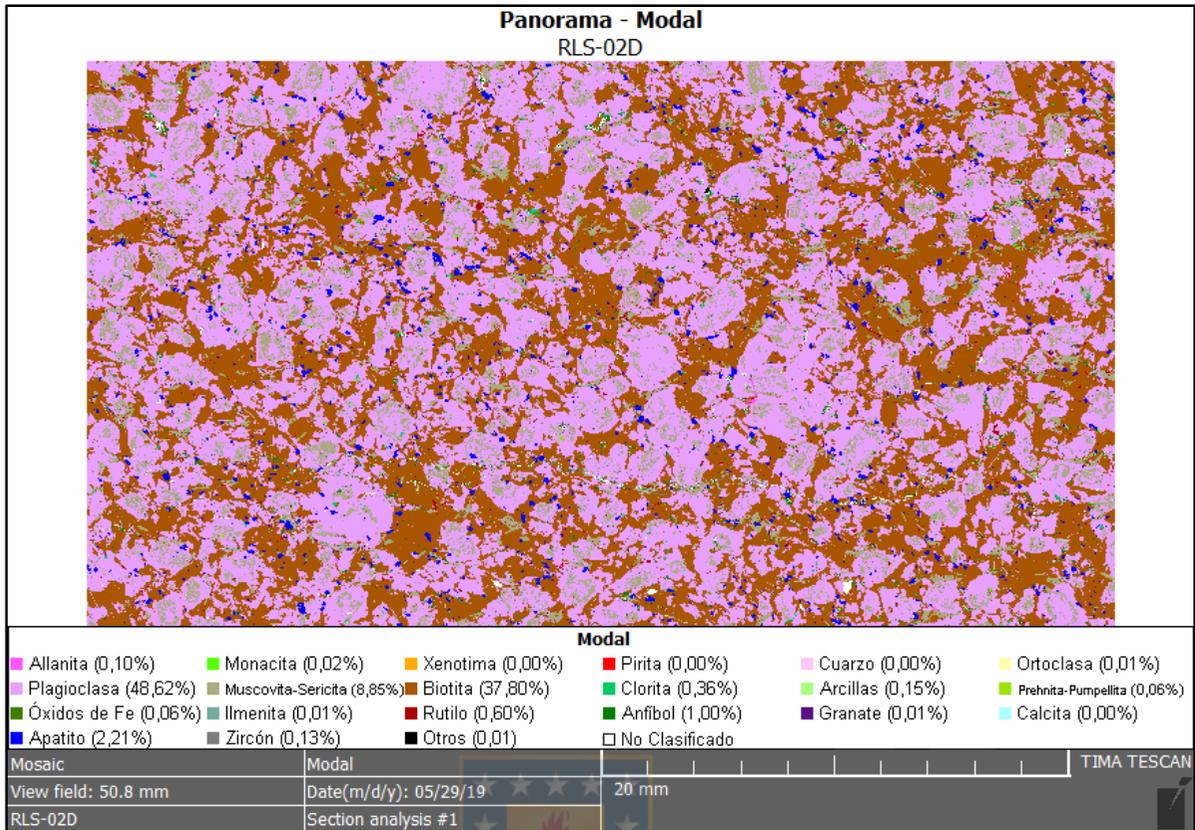


Figura 4.12. Imagen en falso color del dique diorítico que muestra su mineralogía modal.

4.2.5.2. Cuantificación de elementos de REE en allanita

Según el análisis de espectros de rayos-x (Figura 4.13) la composición de la fase allanita en el dique diorítico es 38,62% O; 12,37% Al; 16,09% Si; 11,97% Ca; 9,56% Fe; 3,56% La y 7,79% Ce.

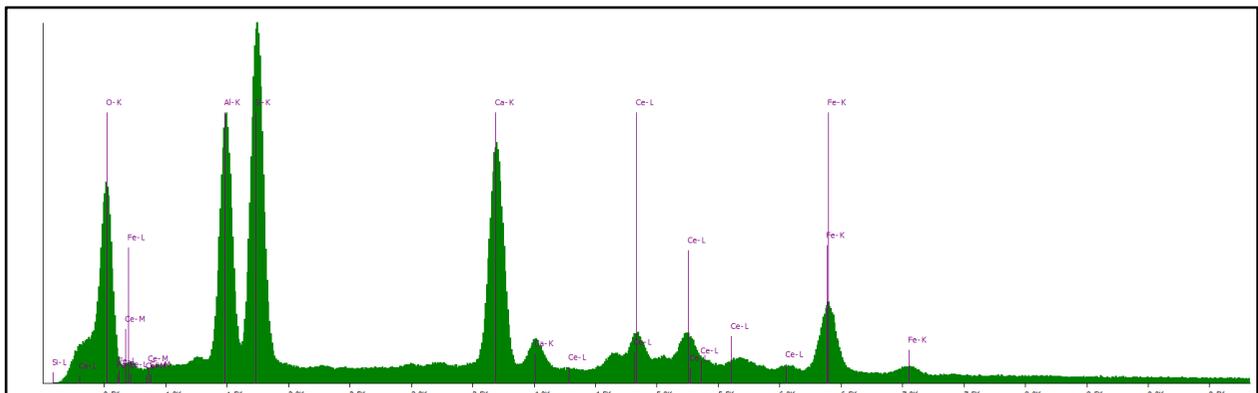


Figura 4.13. Espectro de composición de fase allanita en el dique diorítico.

4.2.5.3. Cuantificación de elementos de REE en apatito

De acuerdo con el análisis de espectros de rayos-x (Figura 4.14) no se observan *peaks* de REE observables, ya sea por el ruido natural del análisis o por traslape de *peaks*/ artefacto de detección. La composición promedio de la fase apatito en el dique diorítico es 47,0% Ca; 31,89% O y 21,11% P.

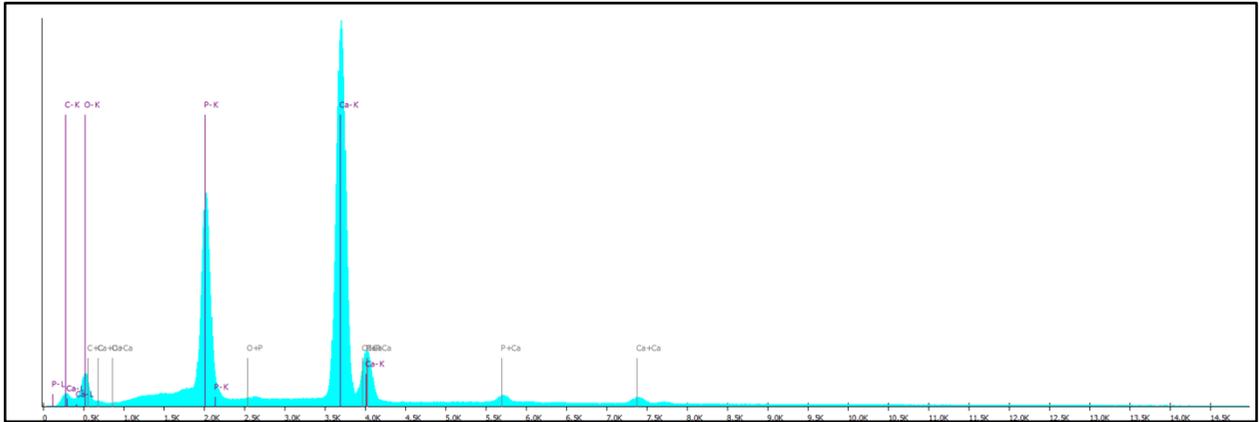


Figura 4.14. Espectro de composición de fase apatito en el dique diorítico.

4.3. Regolito

La superficie terrestre está en constante cambio. La roca se desintegra y se descompone, es desplazada a zonas de menor elevación por la gravedad y es transportada por el agua, viento o hielo. De esta manera se esculpe el paisaje de la Tierra.

Los procesos de desintegración y descomposición de la roca son la respuesta de los materiales terrestres a un ambiente cambiante. Por ejemplo, después de millones de años de levantamiento y erosión, las rocas situadas encima de un cuerpo intrusivo pueden ser eliminadas, dejándolo expuesto a la superficie. Esta masa de roca cristalina formada bajo la superficie en zonas profundas donde las temperaturas y presiones son elevadas queda ahora sometida a un ambiente superficial muy diferente. Como respuesta, esta masa rocosa cambiará de manera gradual. Esta transformación de la roca es lo que denominamos meteorización (Tarbuck y Lutgens, 2005).

La meteorización se produce cuando la roca es fragmentada mecánicamente (desintegrada) o alterada químicamente (descompuesta), o ambas cosas. La meteorización mecánica se lleva a cabo por fuerzas físicas que rompen la roca en trozos cada vez más pequeños sin modificar la composición mineral de la roca. En cambio, la meteorización química implica una transformación de la roca en uno o más compuestos nuevos.

Con pocas excepciones, la superficie de la Tierra está cubierta por el regolito (*rhegos* = manta; *lithos* = piedra), que es la capa de fragmentos minerales producidos por la acumulación de restos meteorizados. El suelo es la combinación de materia mineral y orgánica, agua y aire. Es decir, la porción del regolito que sustenta el crecimiento de las plantas.

La fuente de la materia mineral meteorizada a partir de la cual se desarrolla el regolito se denomina roca madre que puede ser la roca subyacente o bien una capa de depósitos no consolidados. Cuando la roca madre es el substrato rocoso como en el caso de río Lía, los suelos se denominan *suelos residuales*.

4.3.1. Clima regional y geomorfología

Las rocas parentales están sujetas a la meteorización poco tiempo después de su exposición a la superficie de la Tierra, y el proceso de meteorización se ve significativamente afectado por los factores climáticos (en particular la temperatura y humedad), la evolución geomorfológica, la condición hidrogeológica y el tiempo. Estos procesos exogenéticos determinan la intensidad de la meteorización, la preservación del regolito y, sin duda, también influyen en la acumulación de REE (Li y otros, 2017).

La región del Biobío posee un clima templado cálido con una temperatura promedio en verano de 17,8 °C y 9.1 °C en invierno. Las precipitaciones anuales promedio alcanzan los 1338 mm de los cuales un 51% corresponden a las precipitaciones registradas en los meses de mayo a agosto (estación invernal), lo que indica que el agua caída en meses de primavera 16% y otoño 28% es importante. Por último, en los meses de verano, diciembre a febrero, sólo llueve un 5% del total anual (Almeyda y Sáez, 1958 en Heusser, 1990). Según registros de polen e isótopos de oxígeno, el clima templado actual ha

permanecido constante por al menos 140 mil años e incluso en el último máximo glacial las precipitaciones anuales promedio pudieron haber sido ~2000 mm más altas, y las temperaturas de invierno y verano ~5°C y ~3°C más bajas, respectivamente (Heusser y otros, 2006).

Las dataciones por rastros de fisión en muestras de apatito de la cordillera de Nahuelbuta indican que hubo un enfriamiento Terciario lento con una tasa de exhumación estimada en 0,03-0,04 mm/a hasta los $4 \pm 1,2$ Ma y un aumento a $>0,2$ mm/a desde ese momento (Glodny y otros, 2008b en Melnick y otros, 2009). Por otra parte, la tasa de denudación ha sido estimada en 0,032 mm/a (Schaller y otros, 2018) evidenciando un desequilibrio que se traduce en una provisión continua de material para la meteorización con escasa eliminación de masa, por ende, desarrollo de una cobertura regolítica relativamente gruesa.

Geomorfológicamente, el área de estudio se sitúa en la Cordillera de la Costa la cual adquiere nombre propio al sur del río Biobío como Cordillera de Nahuelbuta, extendida 190 km en eje N-S entre Schwager por el norte y cerro Mirador por el sur. El ancho máximo lo alcanza entre las localidades de Cañete y Angol con 50 km de extensión (Borgel, 1983). Algunas de las principales elevaciones se encuentran en los cerros: Altos de Nahuelbuta (1.533 m s.n.m.), o el cerro La Piedra del Águila (1.379 m s.n.m.). Particularmente, la zona de estudio posee un relieve moderado que se manifiesta por cerros que alcanzan una elevación de 400 a 550 m s.n.m y valles intermedios que han incidido a una profundidad de 150 m s.n.m.

4.3.2. Perfil meteorizado

La profundidad de los perfiles meteorizados varía significativamente dependiendo de la litología de la roca parental y las condiciones estructurales, geomorfológicas, hidrológicas y pedológicas locales. En términos generales, cuanto más profundidad alcanzan los perfiles meteorizados, más grandes son los cuerpos mineralizados (Li y otros, 2017).

Dado que los procesos de meteorización actúan desde la superficie hacia abajo, las variaciones de composición, textura, estructura y color evolucionan de manera gradual a

diversas profundidades. Estas diferencias verticales, dividen el regolito en zonas o capas conocidas como horizontes.

Utilizando como referencia los trabajos de Wu y otros (1990) y Li y otros (2017) el perfil meteorizado en el área de estudio (Figura 4.15a) puede dividirse en 3 horizontes:

- **Horizonte A:** Zona de suelo superficial. La parte superior del perfil es una capa de suelo mineral y contenido de materia orgánica como raíces de plantas generalmente de color marrón oscuro (Figura 4.15b). Se compone de arcillas y relictos de cuarzo y biotita en agregados.
- **Horizonte B:** Debajo del horizonte A se encuentra el horizonte B que corresponde a la zona completamente meteorizada en la que la textura de la roca parental ha sido destruida y el material está totalmente disgregado (Figura 4.15c). Las plagioclasas se han transformado completamente en caolines, mientras que los minerales ferromagnesianos como el anfíbol o biotita se alteran a hematita o limonita.
- **Horizonte C:** Se subdivide en una zona parcialmente meteorizada (C1) en la que la textura original de la roca madre se conserva en gran medida y el material presenta un aspecto más consistente (Figura 4.15d). Las plagioclasas se alteran parcialmente a caolines otorgándole una apariencia moteada blanca al regolito. Y una zona transicional (C2) en la cual coexisten fragmentos rocosos de la roca parental y regolito.

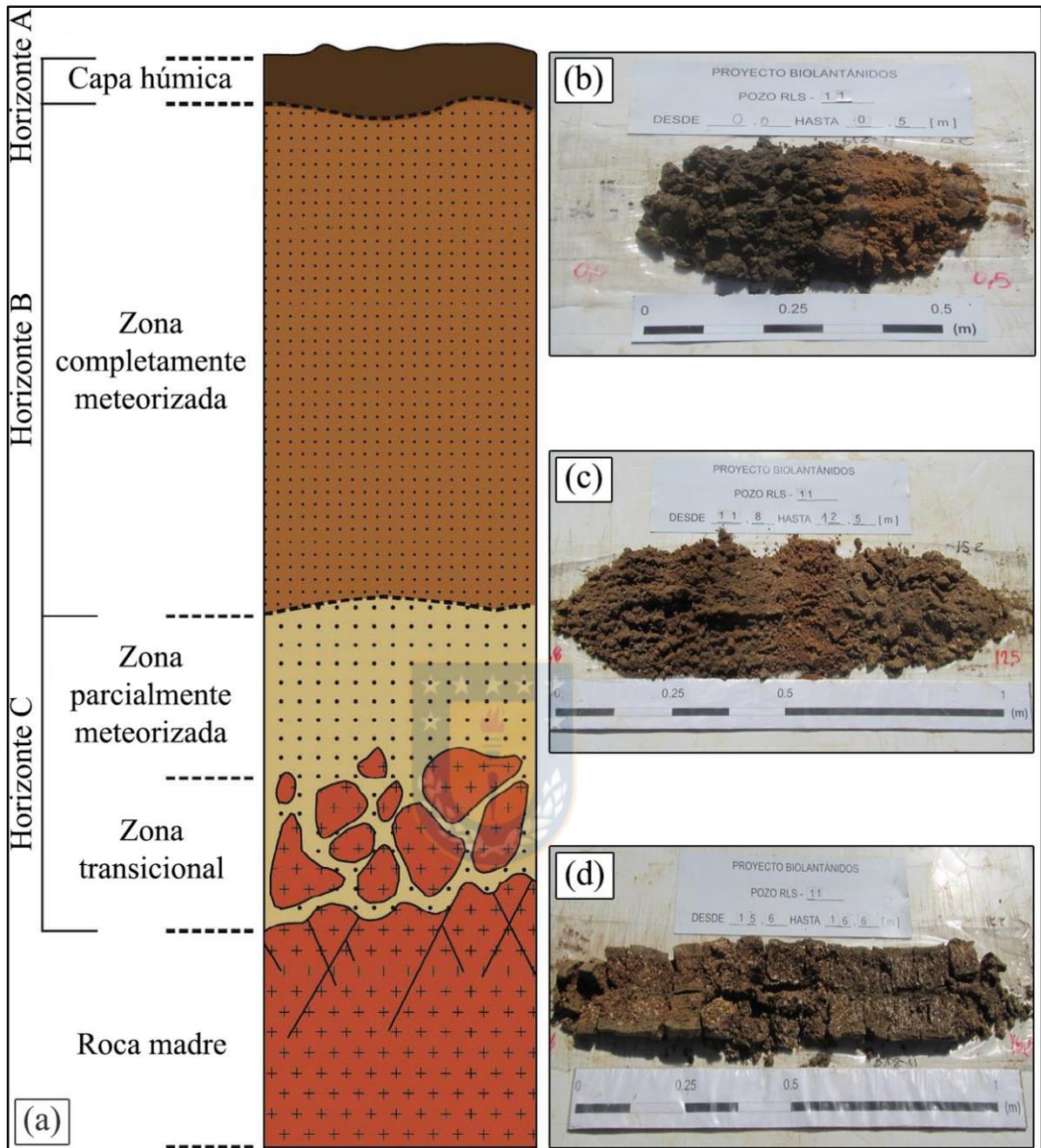


Figura 4.15. (a) Perfil meteorizado esquemático adaptado de Li y otros (2017). (b) Apariencia del suelo en el horizonte A. Presenta un color marrón oscuro por el contenido de materia orgánica. (c) Apariencia del regolito en el horizonte B de la zona completamente meteorizada. El material está totalmente disgregado. (d) Apariencia del regolito en el horizonte C de la zona parcialmente meteorizada. La textura de la roca original se conserva, el material presenta un aspecto más consistente y la alteración parcial de las plagioclasas en caolines le otorga un aspecto moteado blanco.

5. GEOQUÍMICA DE TIERRAS RARAS

5.1. Aspectos generales

Las muestras analizadas mediante ICP-MS para este trabajo corresponden a desorciones de regolito y no a muestras de regolito propiamente tal. Esto se debe a que la fracción de REE cuya recuperación resulta económicamente rentable en los depósitos en regolito es la que está retenida (adsorbida) en la superficie de las arcillas y puede ser recuperada mediante un proceso de desorción (Li y otros, 2017; Sanemastu y Watanabe, 2016).

Visto desde una perspectiva científica los datos de desorciones parecen truncados ya que sólo cuantifican la porción de REE que está adsorbida (retenida) en las arcillas, es decir, una parte de la fracción total que contiene el regolito. Excluyendo del análisis otras fases que contienen REE como son los oxihidróxidos de Fe y Mn, minerales secundarios de REE y minerales de REE refractarios (Ej: monacita). Sin embargo, la proporción de REE adsorbidas en oxihidróxidos de Fe y Mn no supera el 3% (Li y otros, 2019), y tanto los minerales primarios refractarios como los secundarios que contienen REE no son tomados en cuenta en el proceso metalúrgico para la recuperación de REE. Por lo que visto desde una perspectiva económica los datos de desorciones cobran sentido ya que representan la porción de REE que puede ser producida y comercializada.

La proporción de REE que está adsorbida en arcillas varía en gran medida dependiendo de cada depósito en particular, pero normalmente corresponde, al menos, a un 50% de la concentración total en el regolito (Sanemastu y Watanabe, 2016).

Para la realización de los análisis ICP-MS en desorciones de regolito se seleccionaron muestras de tres sondajes RLS-07, RLS-08 y RLS-09 ya que están situados en un área que presenta anomalías locales de REE identificadas mediante muestreo sistemático de geoquímica superficial que fue definida como zona potencial de recursos.

5.2. Sondaje RLS-07

5.2.1. Caracterización

El sondaje RLS-07 (Figura 5.1) alcanza los 33,1 m de profundidad y se distinguen 3 horizontes:

Horizonte A (0,0 - 0,6 m): Corresponde a un suelo arcilloso color pardo claro con escasa presencia de materia orgánica desarrollado a partir del regolito de anfíbolita.

Horizonte B (0,6 - 11,8 m): Corresponde a la zona completamente meteorizada en la que la textura de la roca parental ha sido completamente destruida y el material está totalmente disgregado. Se diferencian dos litologías. Una anfíbolita que va desde los 0,6 - 8,4 m de coloración pardo anaranjada en la que los anfíboles se han transformado completamente en limonitas. Además, presenta un contenido no menor de cuarzo (~10-15%) de granulometría fina que va desde 0,5 - 1,0 mm de tamaño. La segunda litología corresponde a una tonalita de anfíbol y biotita que va desde los 8,4 - 11,8 m de coloración marrón oscuro con tintes blancos en la que el caolín reemplaza completamente las plagioclasas mientras que los minerales ferromagnesianos como hornblenda y biotita se alteran principalmente a limonitas y hematita. El cuarzo único mineral resistente a la meteorización visualmente identificable muestra una granulometría media a gruesa que va desde 1,0 - 4,0 mm de tamaño.

Horizonte C (11,8 - 31,1 m): Compuesto por una sola litología tonalita de anfíbol y biotita y dos zonas. Una zona parcialmente meteorizada que va desde los 11,8 - 26,6 m en la que la textura original de la roca parental se conserva en gran medida y el material regolítico es más consistente. Y una zona transicional que va desde 26,6 - 31,1 m en la cual coexisten fragmentos rocosos y regolito.

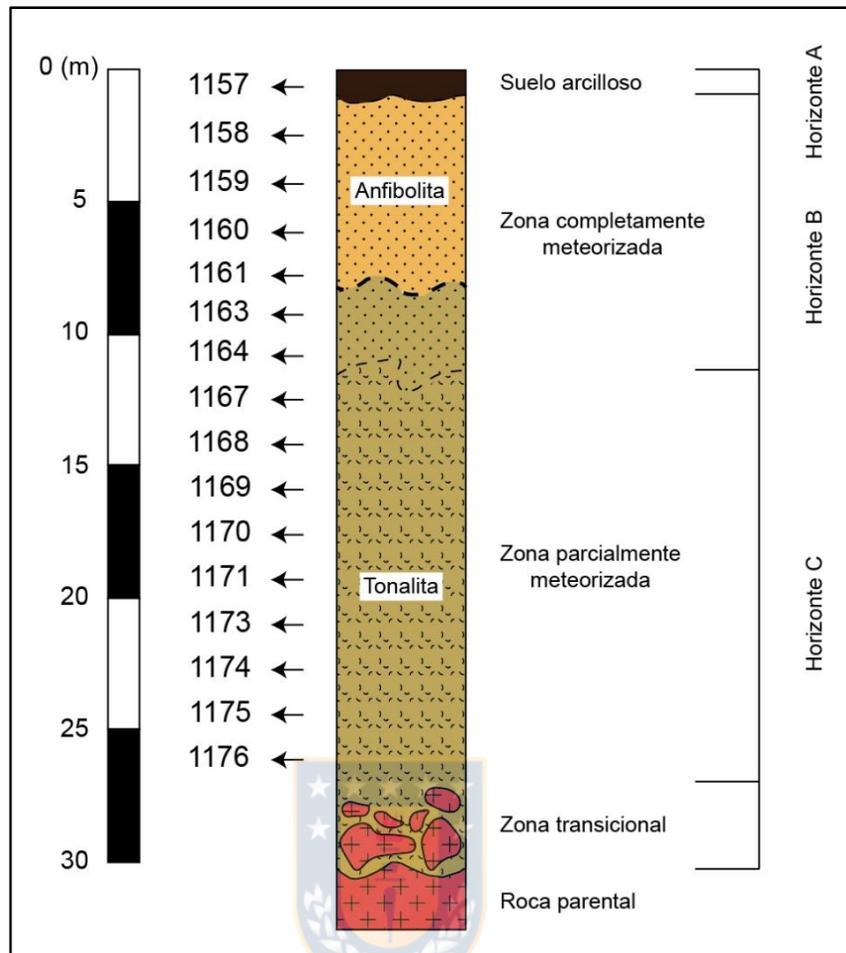


Figura 5.1. Perfil meteorizado de sondaje RLS-07 dividido entre litologías y horizontes.

5.2.2. Desorciones en regolito

Las concentraciones de REE de las muestras de desorciones de regolito del sondaje RLS-07 se muestran en la Tabla 5.1. Se analizaron en total 16 muestras. Una muestra de suelo arcilloso del horizonte A (1157), cuatro muestras de anfibolita (1158-1161) y dos muestras de tonalita de anfíbol y biotita (1163-1164) en horizonte B y nueve muestras de tonalita de anfíbol y biotita en horizonte C (1167-1176).

Tabla 5.1.

Composición química de REE (ppm) en muestras de desorciones de regolito del sondaje RLS-07.

Horizonte	Horizonte A					Horizonte B											
Litología	Suelo					Anfibolita						Tonalita de anfíbol y biotita					
Muestra	1157	1158	1159	1160	1161	1163	1164	1167	1168	1169	1170	1171	1173	1174	1175	1176	
La	54,47	20,72	32,71	20,40	9,14	2,01	1,96	1,32	1,49	1,11	0,85	1,79	1,53	1,62	8,25	3,12	
Ce	21,54	5,51	4,16	4,73	8,25	2,90	1,52	2,35	1,52	2,77	3,00	3,61	3,35	3,78	7,03	2,46	
Pr	15,71	10,44	14,16	9,17	6,66	1,16	0,75	0,84	0,75	0,72	0,37	0,74	0,77	0,64	2,71	0,86	
Nd	70,24	53,25	67,48	50,76	39,22	5,92	3,61	4,21	3,62	3,86	2,02	3,62	3,88	2,89	12,41	3,71	
Sm	13,97	14,96	21,96	18,97	15,51	1,85	0,92	1,21	1,04	1,08	0,54	0,88	0,95	0,60	2,43	0,68	
Eu	1,14	2,69	4,78	4,80	4,21	0,39	0,14	0,25	0,23	0,26	0,12	0,20	0,23	0,14	0,32	0,06	
Gd	13,96	13,28	27,91	33,74	32,92	2,22	0,97	1,05	0,95	1,11	0,66	0,88	0,89	0,54	2,30	0,64	
Tb	2,39	2,12	4,49	6,07	7,62	0,42	0,18	0,16	0,16	0,18	0,11	0,12	0,13	0,07	0,37	0,11	
Dy	16,01	12,40	26,57	37,46	44,96	2,67	1,16	0,95	0,91	1,09	0,69	0,69	0,74	0,40	2,43	0,73	
Ho	3,48	2,40	5,35	7,92	9,93	0,57	0,25	0,19	0,18	0,23	0,15	0,14	0,15	0,08	0,53	0,16	
Er	10,39	6,88	15,46	22,87	28,36	1,65	0,72	0,55	0,50	0,65	0,43	0,39	0,41	0,22	1,52	0,46	
Tm	1,41	0,93	2,09	3,01	3,77	0,22	0,09	0,07	0,06	0,08	0,05	0,05	0,05	0,03	0,20	0,06	
Yb	10,08	6,85	14,66	20,08	23,22	1,46	0,65	0,44	0,43	0,52	0,35	0,28	0,30	0,15	1,34	0,43	
Lu	1,52	0,98	2,12	2,94	3,60	0,21	0,10	0,06	0,06	0,08	0,05	0,04	0,04	0,02	0,20	0,06	
Y	105,70	62,53	166,43	270,65	401,97	22,26	7,62	6,82	5,06	6,86	4,35	6,26	4,36	2,88	12,10	3,40	
Σ REE	342,01	215,94	410,33	513,57	639,34	45,91	20,64	20,47	16,96	20,60	13,74	19,69	17,78	14,06	54,14	16,94	
LREE	161,96	89,92	118,51	85,06	63,27	11,99	7,84	8,72	7,38	8,46	6,24	9,76	9,53	8,93	30,40	10,15	
HREE	180,05	126,02	291,82	428,51	576,07	33,92	12,80	11,75	9,58	12,14	7,50	9,93	8,25	5,13	23,74	6,79	
(La/Yb) _N	3,88	2,17	1,60	0,73	0,28	0,99	2,16	2,15	2,49	1,53	1,74	4,59	3,66	7,75	4,42	5,20	
Ce/Ce*	0,18	0,09	0,05	0,08	0,26	0,47	0,31	0,55	0,35	0,76	1,31	0,77	0,76	0,91	0,36	0,37	

Para el cálculo de anomalías de cerio se utiliza la fórmula $Ce/Ce^* = C_{eN} / (La_N * Pr_N)^{0,5}$

Las razones (La/Yb)_N y Ce/Ce* utilizan como factor de normalización el condrito C1 de Sun y McDonough (1989).

5.2.3. Diagrama de REE + Y

El diagrama de REE + Y (Figura 5.2) muestra una mayor concentración de REE para muestras de desorciones de regolito de anfibolita en horizonte A y B en comparación con el contenido de REE de tonalita de anfíbol y biotita tanto en roca como en horizontes. A su vez las desorciones de regolito de tonalita de anfíbol y biotita en horizonte B y C presentan un empobrecimiento significativo de REE en relación a la roca parental. El patrón de REE en las desorciones de anfibolita se observa plano mientras que el de la tonalita de anfíbol y biotita decrece desde LREE a HREE tanto en roca como en horizontes.

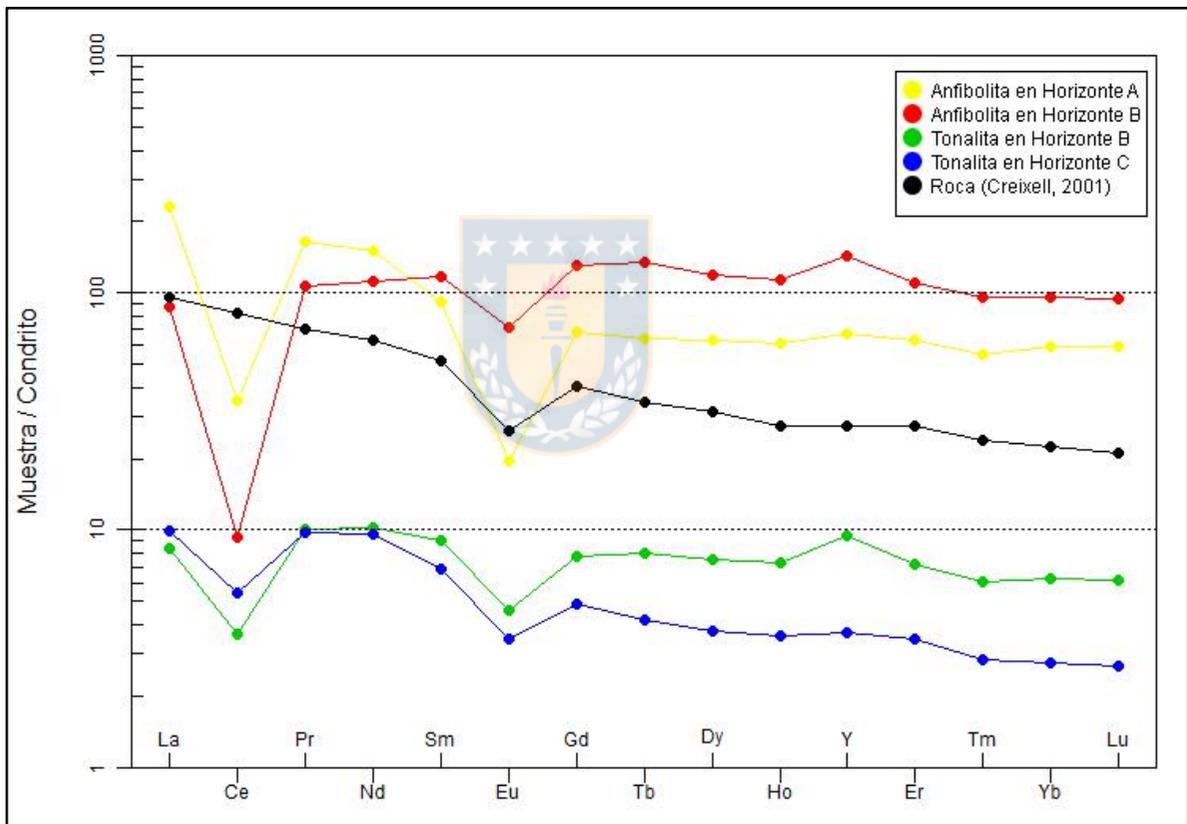


Figura 5.2. Concentración promedio de REE de las diferentes litologías y horizontes del sondaje RLS-07 normalizado al condrito C1 de (Sun y McDonough, 1989). Los valores de REE en roca total utilizado para este diagrama son los publicados por Creixell (2001) perteneciente a la muestra 00-82 clasificada como tonalita de anfíbol y biotita de la subunidad Tonalitas de Santa Juana.

5.2.4. Análisis de datos

El análisis de datos muestra importantes variaciones entre litologías (Figura 5.3) para algunos índices de REE como son Σ REE, LREE, HREE, $(La/Yb)_N$ y Ce/Ce^* . La zona mineralizada está claramente asociada a las muestras de desorciones de anfíbolita. El contenido total de REE adsorbidas en arcillas varía entre 216-639 ppm observándose un mayor enriquecimiento en HREE (126-576 ppm) que LREE (90-119 ppm). Esto se comprueba con la relación $(La/Yb)_N$ que disminuye progresivamente con la profundidad, desde valores 2,17 a 0,28. Según Sanematsu y Watanabe (2016) en la zona mineralizada existe una correlación negativa entre las anomalías de Ce y la concentración de REE adsorbidas en arcillas debido a que en esta zona se acumula un alto contenido de REE excepto Ce, que es eliminado de la solución en la parte superior del perfil meteorizado producto de la oxidación de Ce^{+3} a Ce^{+4} que precipita como cerianita. Este efecto puede observarse también en las muestras de desorciones de anfíbolita (zona mineralizada) ya que presentan valores de anomalías de Ce muy bajos ($Ce/Ce^* = 0,05-0,26$). Para el caso de la tonalita de anfíbol y biotita la concentración total de REE adsorbida en arcillas varía entre 14-54 ppm. La evolución del radio $(La/Yb)_N$ aumenta progresivamente con la profundidad evidenciando un enriquecimiento en LREE. El análisis de anomalías de Ce no tiene relevancia ya que las muestras no están asociadas a una zona mineralizada. El que los valores de anomalías de Ce aumenten su valor, incluso llegando a ser positivas (muestra 1170 $Ce/Ce^* = 1,31$) no explica absolutamente nada y solo refleja la baja concentración de REE adsorbidas en las arcillas del regolito de esta litología.

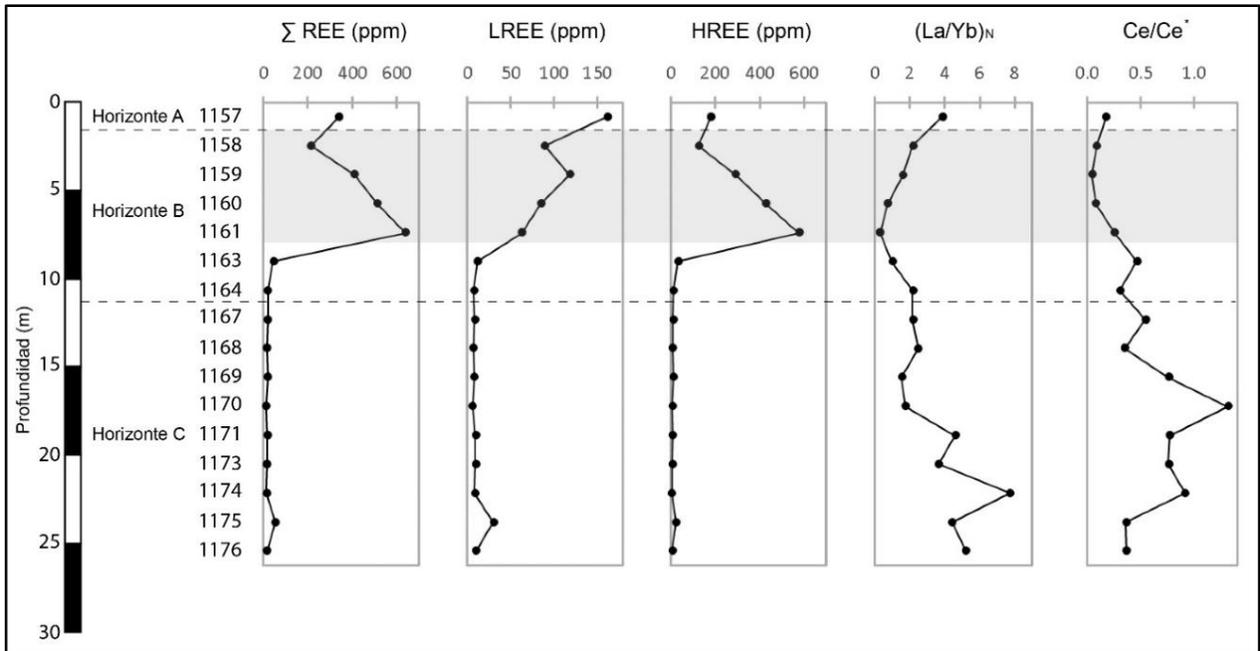


Figura 5.3. Variaciones verticales de índices de REE en sondaje RLS-07. Incluye el contenido total de REE, contenido de LREE, contenido de HREE, relación $(La/Yb)_N$, y valores de anomalías de Ce. El área sombreada resalta las muestras con mayor contenido total de REE y sus respectivas situaciones con respecto a los otros índices.

5.3. Sondaje RLS-08

5.3.1. Caracterización

El sondaje RLS-08 (Figura 5.4) llega hasta los 55,3 m de profundidad y se reconocen 3 horizontes:

Horizonte A (0,0 - 1,0 m): Suelo orgánico de color marrón parduzco desarrollado a partir de un regolito de tonalita de anfíbol y biotita que presenta restos de raíces de plantas y sustancias orgánicas.

Horizonte B (1,0 - 18,5 m): Zona completamente meteorizada del regolito de tonalita de anfíbol y biotita en la que la textura de la roca parental ha sido destruida en su totalidad y el material se encuentra disgregado. Las plagioclasas se alteran a caolines y los minerales ferromagnesianos se han transformado en limonitas. El cuarzo único mineral resistente a la meteorización visualmente identificable representa aproximadamente el 30% del contenido total.

Horizonte C (18,5 - 55,3 m): Zona parcialmente meteorizada en la que el regolito de tonalita de anfíbol y biotita presenta un aspecto competente y preserva en gran medida la textura de la roca. Algunas plagioclasas se alteran a caolines y le otorgan al regolito una apariencia moteada blanca.

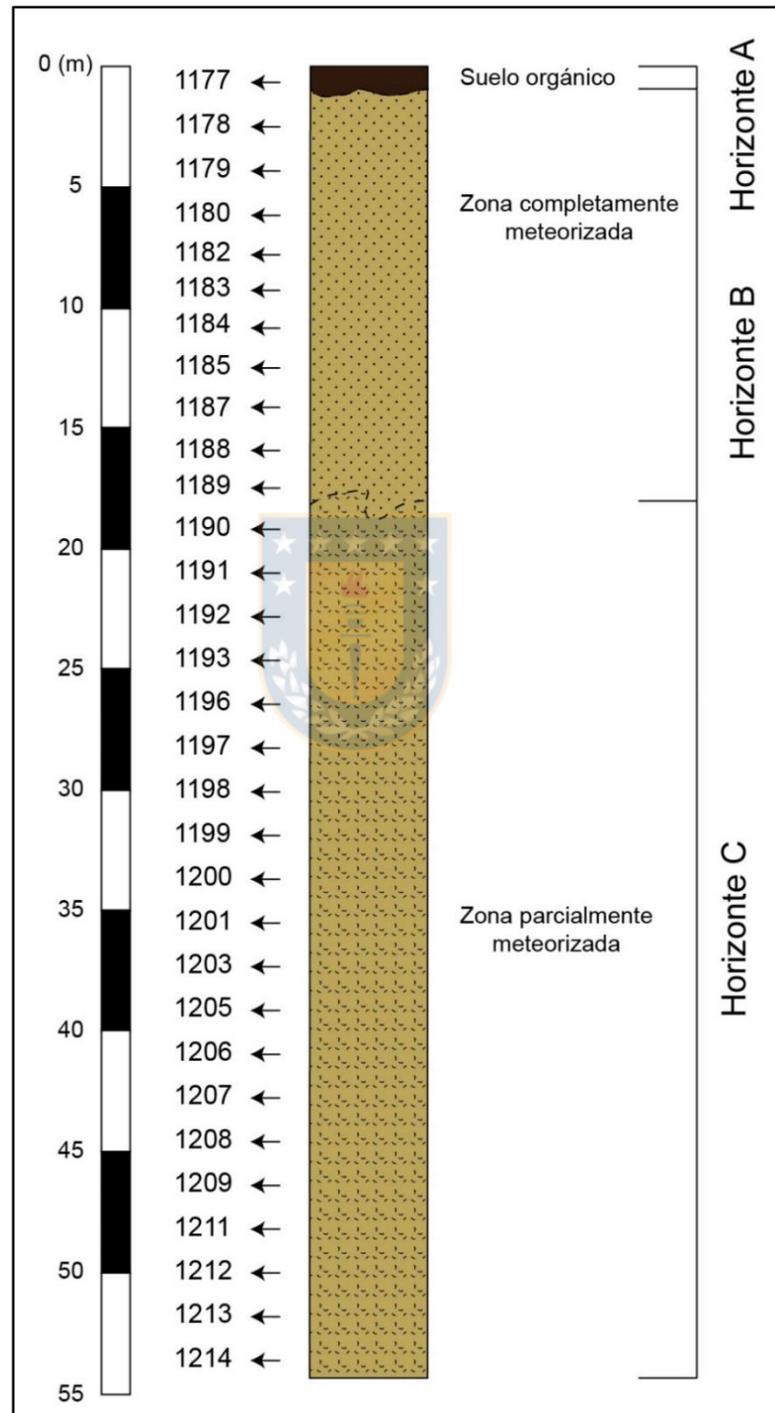


Figura 5.4. Perfil meteorizado de sondaje RLS-08 dividido entre horizontes.

5.3.2. Desorciones en regolito

Las concentraciones de REE de las muestras de desorciones de regolito del sondaje RLS-08 se muestran en la Tabla 5.2. Se analizaron en total 31 muestras. Una muestra de suelo orgánico del horizonte A (1177), diez muestras de tonalita de anfíbol y biotita en horizonte B (1178-1189) y veinte muestras de tonalita de anfíbol y biotita en horizonte C (1190-1214).

Tabla 5.2.

Composición química de REE (ppm) en muestras de desorciones de regolito del sondaje RLS-08.

Horizonte	Horizonte A		Horizonte B							Horizonte C				
Litología	Suelo		Tonalita de anfíbol y biotita											
Muestra	1177	1178	1179	1180	1182	1183	1184	1185	1187	1188	1189	1190	1191	1192
La	2,27	1,40	1,72	4,84	6,28	14,38	10,36	222,56	80,81	34,45	4,43	5,48	5,77	12,34
Ce	1,91	1,58	3,18	6,40	5,97	8,79	4,26	26,35	31,72	26,29	2,23	6,48	7,71	3,77
Pr	0,47	0,46	0,76	2,00	2,34	5,10	4,15	64,37	21,04	10,46	1,37	2,20	2,44	3,97
Nd	1,75	1,85	3,11	8,50	9,70	20,18	18,31	261,05	85,26	41,03	6,28	10,35	11,90	18,10
Sm	0,36	0,43	0,72	1,85	2,08	3,91	4,04	66,52	26,01	12,90	1,33	2,79	3,49	4,05
Eu	0,06	0,07	0,11	0,22	0,24	0,39	0,52	9,54	5,76	2,79	0,13	0,64	1,10	0,65
Gd	0,30	0,33	0,45	0,95	1,16	1,84	2,28	41,45	36,09	15,46	1,29	2,51	3,23	4,15
Tb	0,05	0,05	0,07	0,13	0,16	0,23	0,29	5,06	6,51	2,79	0,23	0,43	0,53	0,72
Dy	0,25	0,29	0,38	0,66	0,85	1,23	1,51	25,26	37,66	17,18	1,55	2,54	3,04	4,69
Ho	0,05	0,06	0,07	0,12	0,15	0,20	0,27	4,57	7,22	3,09	0,33	0,50	0,59	1,00
Er	0,12	0,15	0,21	0,31	0,42	0,52	0,72	12,44	19,83	8,53	0,96	1,42	1,61	2,95
Tm	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,09	1,58	2,43	1,10	0,13	0,19	0,21	0,40
Yb	0,10	0,13	0,20	0,29	0,40	0,46	0,65	10,98	17,01	7,48	0,90	1,31	1,43	2,79
Lu	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,06	0,09	1,57	2,24	1,01	0,13	0,19	0,20	0,42
Y	1,41	1,40	1,66	2,50	3,42	4,77	6,78	101,09	207,89	90,63	8,74	14,78	18,87	27,64
Σ REE	9,12	8,24	12,70	28,85	33,29	62,13	54,32	854,39	587,48	275,19	30,03	51,81	62,12	87,64
LREE	6,40	5,29	8,77	21,74	24,29	48,45	37,08	574,33	218,83	112,23	14,31	24,51	27,82	38,18
HREE	2,72	2,95	3,93	7,11	9,00	13,68	17,24	280,06	368,65	162,96	15,72	27,30	34,30	49,46
(La/Yb) _N	16,28	7,72	6,17	11,97	11,26	22,42	11,43	14,54	3,41	3,30	3,53	3,00	2,89	3,17
Ce/Ce*	0,45	0,48	0,68	0,50	0,38	0,25	0,16	0,05	0,19	0,34	0,22	0,46	0,50	0,13

Para el cálculo de anomalías de cerio se utiliza la fórmula $Ce/Ce^* = Ce_N / (La_N * Pr_N)^{0,5}$

Las razones (La/Yb)_N y Ce/Ce* utilizan como factor de normalización el condrito C1 de Sun y McDonough (1989).

Tabla 5.2. (continuación)

Composición química de REE (ppm) en muestras de desorciones de regolito del sondaje RLS-08.

Horizonte	Horizonte C																
Litología	Tonalita de anfíbol y biotita																
Muestra	1193	1196	1197	1198	1199	1200	1201	1203	1205	1206	1207	1208	1209	1211	1212	1213	1214
La	2,12	0,75	0,30	1,41	1,00	1,25	1,73	0,69	0,48	0,43	0,53	0,77	0,52	0,94	0,99	0,36	1,79
Ce	2,37	1,39	0,72	2,49	2,36	3,04	5,01	2,62	0,98	1,79	2,20	1,66	1,24	2,14	2,70	0,75	1,92
Pr	0,91	0,31	0,09	0,40	0,29	0,29	0,46	0,16	0,12	0,09	0,12	0,17	0,10	0,18	0,20	0,09	0,50
Nd	4,51	1,64	0,44	2,02	1,41	1,38	2,12	0,72	0,51	0,36	0,51	0,71	0,38	0,65	0,83	0,39	2,23
Sm	1,27	0,48	0,12	0,56	0,37	0,34	0,47	0,15	0,10	0,07	0,10	0,15	0,07	0,12	0,17	0,08	0,42
Eu	0,45	0,17	0,04	0,16	0,11	0,12	0,16	0,04	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,01	0,04
Gd	1,29	0,52	0,15	0,61	0,40	0,38	0,46	0,15	0,11	0,06	0,08	0,13	0,09	0,09	0,16	0,07	0,47
Tb	0,19	0,07	0,02	0,09	0,06	0,05	0,06	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	0,01	0,07
Dy	1,09	0,39	0,11	0,47	0,35	0,27	0,29	0,12	0,11	0,05	0,08	0,12	0,04	0,05	0,15	0,07	0,47
Ho	0,22	0,08	0,02	0,10	0,07	0,05	0,06	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	0,10
Er	0,59	0,20	0,06	0,25	0,19	0,14	0,15	0,07	0,07	0,03	0,06	0,07	0,02	0,03	0,09	0,04	0,31
Tm	0,07	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,04
Yb	0,48	0,14	0,04	0,17	0,16	0,10	0,10	0,06	0,07	0,02	0,05	0,06	0,02	0,02	0,07	0,04	0,29
Lu	0,07	0,02	0,01	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,04
Y	7,67	2,86	0,90	3,46	2,43	2,08	2,37	0,92	0,77	0,37	0,69	0,79	0,26	0,35	1,20	0,49	3,13
Σ REE	23,30	9,04	3,03	12,25	9,24	9,52	13,48	5,76	3,39	3,30	4,49	4,71	2,78	4,62	6,67	2,44	11,82
LREE	9,91	4,09	1,55	6,32	5,06	5,96	9,32	4,19	2,09	2,67	3,36	3,31	2,24	3,91	4,72	1,59	6,44
HREE	13,39	4,95	1,48	5,93	4,18	3,56	4,16	1,57	1,30	0,63	1,13	1,40	0,54	0,71	1,95	0,85	5,38
(La/Yb) _N	3,17	3,84	5,38	5,95	4,48	8,97	12,41	8,25	4,92	15,42	7,60	9,21	18,65	33,71	10,14	6,46	4,43
Ce/Ce*	0,42	0,71	1,07	0,81	1,07	1,24	1,38	1,93	1,00	2,23	2,14	1,12	1,33	1,28	1,49	1,02	0,50

Para el cálculo de anomalías de cerio se utiliza la fórmula $Ce/Ce^* = C_{eN} / (La_N * Pr_N)^{0,5}$ Las razones (La/Yb)_N y Ce/Ce* utilizan como factor de normalización el condrito C1 de Sun y McDonough (1989).

5.3.3. Diagrama de REE + Y

El diagrama de REE + Y (Figura 5.5) presenta para el caso del horizonte B un leve enriquecimiento en LREE en comparación con la roca parental. No así para las HREE que poseen una concentración similar a la roca. Por el contrario, tanto el horizonte A como el horizonte C muestran un empobrecimiento en relación a la roca.

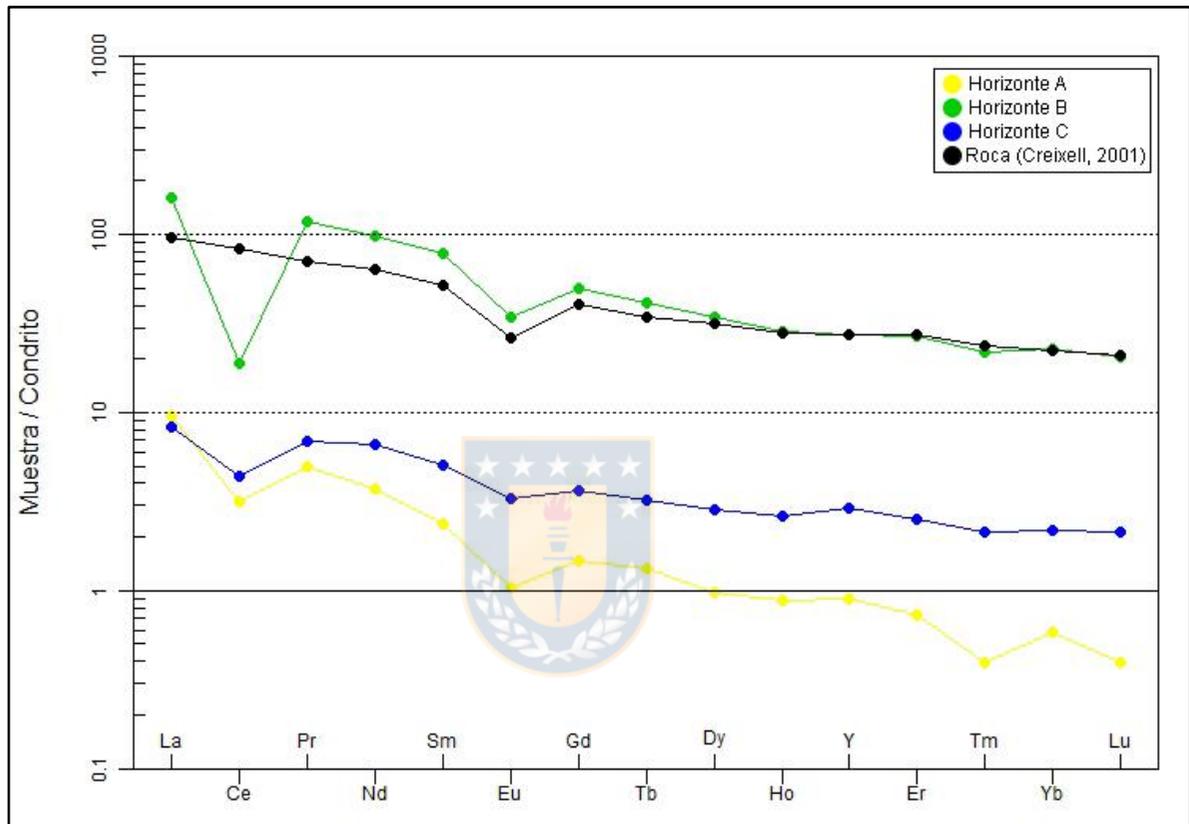


Figura 5.5. Concentración promedio de REE de los distintos horizontes del sondaje RLS-08 normalizado al condrito C1 de (Sun y McDonough, 1989). Los valores de REE en roca total utilizado para este diagrama son los publicados por Creixell (2001) perteneciente a las muestra 00-82 clasificada como tonalita de anfíbol y biotita de la subunidad Tonalitas de Santa Juana.

5.3.4. Análisis de datos

El análisis de datos (Figura 5.6) muestra que la concentración total de REE adsorbida en arcillas alcanza los valores más altos en la parte inferior del horizonte B (275-854 ppm). Todos los horizontes muestran un enriquecimiento preferente por LREE evidenciado por valores $(La/Yb)_N$ que en la parte superior fluctúan ampliamente entre ~6-22, en la parte media se estabilizan en valores entre ~3-6 y en la parte inferior vuelven a fluctuar en valores ~4-33. Las anomalías de Ce en la zona mineralizada alcanzan un valor mínimo en la muestra 1185 ($Ce/Ce^* = 0,05$) para luego aumentar a valores similares a los que se registran en zonas no mineralizadas.

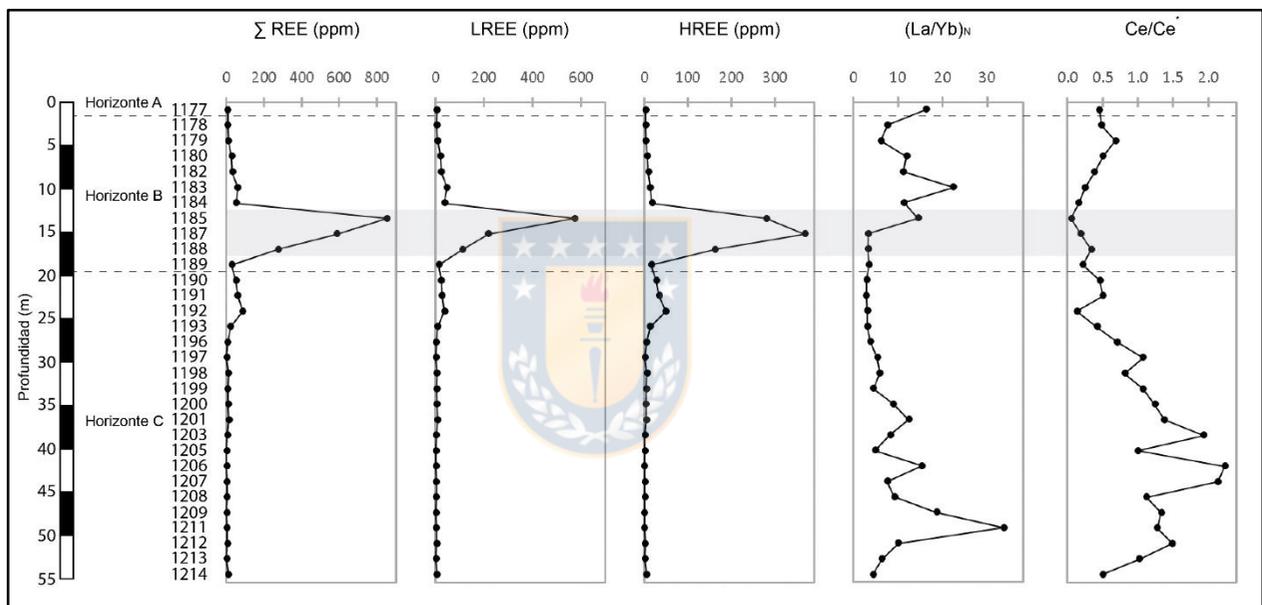


Figura 5.6. Variaciones verticales de índices de REE en sondaje RLS-08. Incluye el contenido total de REE, contenido de LREE, contenido de HREE, relación $(La/Yb)_N$ y valores de anomalía de Ce. El área sombreada resalta las muestras con mayor contenido total de REE y sus respectivas situaciones con respecto a los otros índices.

5.4. Sondaje RLS-09

5.4.1. Caracterización

El sondaje RLS-09 (Figura 5.7) tiene 36,2 m de profundidad y se identifican 3 horizontes:

Horizonte A (0,0 - 1,1 m): Los primeros 20 cm corresponden a un suelo orgánico color marrón oscuro que presenta contenido de materia orgánica. Los otros 90 cm comprenden un suelo arcilloso color pardo rojizo que debido a su alta concentración de arcillas exhibe propiedad de plasticidad.

Horizonte B (1,1 - 26,0 m): Zona completamente meteorizada del regolito de tonalita de anfíbol y biotita en la que la textura de la roca parental ha sido destruida en su totalidad y el material se encuentra disgregado. Las plagioclasas se alteran a caolines y los minerales ferromagnesianos como biotita y anfíbol se han transformado en limonitas y hematita. El cuarzo único mineral resistente a la meteorización visualmente identificable representa aproximadamente el 20-25% del contenido total y presenta una granulometría media a gruesa.

Horizonte C (26,0 - 36,2 m): Zona parcialmente meteorizada en la que el regolito de tonalita de anfíbol y biotita presenta un aspecto competente y preserva en gran medida la textura original de la roca. Algunas plagioclasas se alteran a caolines otorgándole una apariencia moteada blanca al regolito. En general, aumenta el contenido tanto de biotitas como anfíboles que sobreviven a la meteorización y pueden observarse a simple vista.

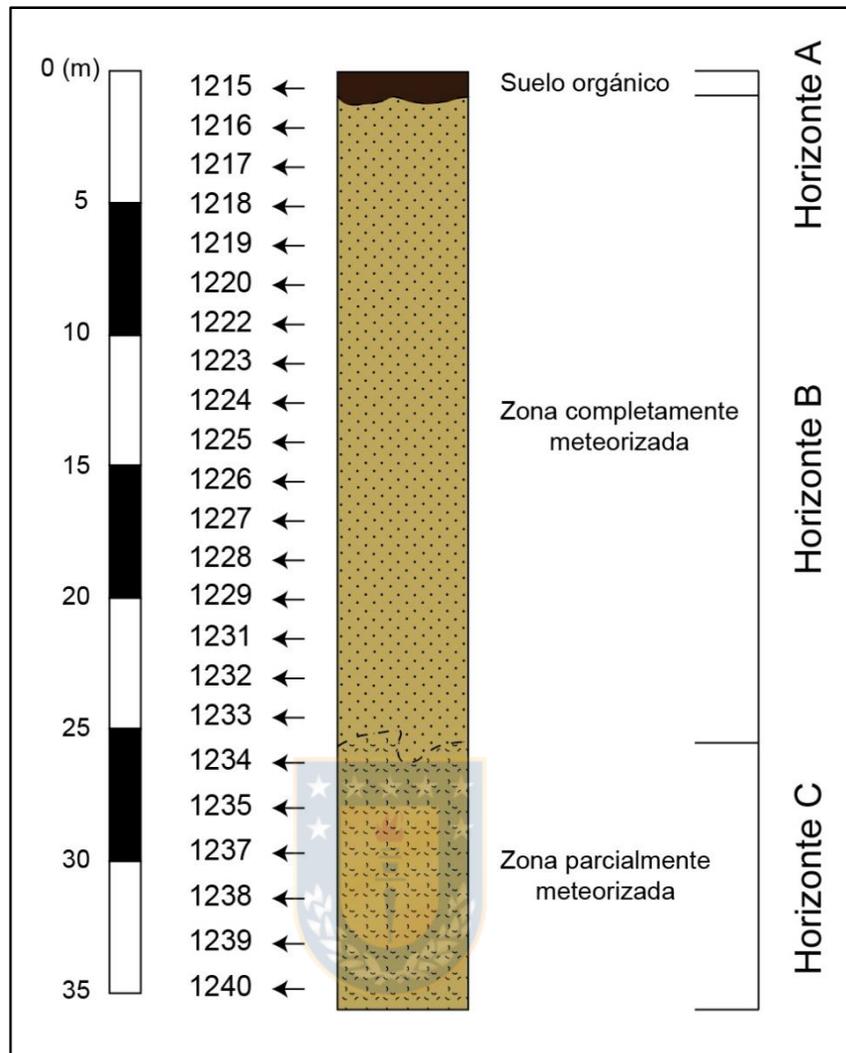


Figura 5.7. Perfil meteorizado de sondaje RLS-09 dividido entre horizontes.

5.4.2. Desorciones en regolito

El contenido de REE de las muestras de desorciones de regolito del sondaje RLS-09 se muestra en la Tabla 5.3. Se analizaron en total 23 muestras. Una muestra de suelo del horizonte A (1215), dieciséis muestras de tonalita de anfíbol y biotita en horizonte B (1216-1233) y seis muestras de tonalita de anfíbol y biotita en horizonte C (1234-1240).

Tabla 5.3.

Composición química de REE (ppm) en muestras de desorciones de regolito del sondaje RLS-09.

Horizonte	Horizonte A	Horizonte B												
Litología	Suelo	Tonalita de anfíbol y biotita												
Muestra	1215	1216	1217	1218	1219	1220	1222	1223	1224	1225	1226	1227	1228	1229
La	70,49	0,74	1,79	6,63	7,30	24,21	14,43	16,50	4,25	1,43	0,50	0,14	1,04	1,22
Ce	4,93	0,74	3,52	7,23	9,23	9,00	10,41	10,16	3,03	3,15	0,79	0,29	2,58	2,33
Pr	14,19	0,28	0,96	2,93	3,65	9,63	7,62	6,84	1,38	0,80	0,24	0,06	0,78	0,50
Nd	58,18	1,36	5,00	15,65	20,59	39,04	42,84	34,92	6,68	4,52	1,34	0,33	5,12	2,36
Sm	10,13	0,35	1,51	4,34	6,09	7,96	13,56	12,07	2,25	1,63	0,47	0,13	1,86	0,52
Eu	0,50	0,07	0,32	0,79	1,22	0,91	2,82	2,91	0,64	0,42	0,11	0,04	0,50	0,11
Gd	10,96	0,34	1,40	4,00	5,22	3,49	13,87	16,85	4,54	2,94	0,70	0,27	2,23	0,47
Tb	2,31	0,05	0,20	0,61	0,73	0,44	1,85	2,67	0,84	0,58	0,13	0,05	0,37	0,07
Dy	19,36	0,32	1,08	3,56	3,99	2,19	9,93	14,98	5,03	3,50	0,78	0,33	2,17	0,40
Ho	4,74	0,06	0,20	0,70	0,74	0,40	1,91	2,96	1,01	0,72	0,16	0,07	0,42	0,08
Er	14,16	0,18	0,54	1,97	2,00	1,05	5,19	7,96	2,62	1,88	0,42	0,19	1,10	0,24
Tm	1,67	0,02	0,07	0,26	0,26	0,14	0,64	0,97	0,31	0,21	0,05	0,02	0,13	0,03
Yb	10,80	0,16	0,47	1,87	1,81	0,99	4,33	6,31	1,88	1,23	0,33	0,13	0,88	0,19
Lu	1,62	0,02	0,07	0,27	0,25	0,14	0,62	0,90	0,25	0,18	0,05	0,02	0,12	0,03
Y	196,67	2,21	5,89	20,15	22,28	11,78	61,44	102,46	37,48	32,81	5,67	2,92	16,11	3,31
Σ REE	420,71	6,90	23,02	70,96	85,36	111,37	191,46	239,46	72,19	56,00	11,74	4,99	35,41	11,86
LREE	147,79	3,12	11,27	32,44	40,77	81,88	75,30	68,42	15,34	9,90	2,87	0,82	9,52	6,41
HREE	272,92	3,78	11,75	38,52	44,59	29,49	116,16	171,04	56,85	46,1	8,87	4,17	25,89	5,45
(La/Yb) _N	4,68	3,32	2,73	2,54	2,89	17,54	2,39	1,88	1,62	0,83	1,09	0,77	0,85	4,61
Ce/Ce*	0,04	0,40	0,66	0,40	0,44	0,14	0,24	0,23	0,31	0,72	0,56	0,78	0,70	0,73

Para el cálculo de anomalías de cerio se utiliza la fórmula $Ce/Ce^* = Ce_N / (La_N * Pr_N)^{0.5}$

Las razones (La/Yb)_N y Ce/Ce* utilizan como factor de normalización el condrito C1 de Sun y McDonough (1989).

Tabla 5.3. (continuación)

Composición química de REE (ppm) en muestras de desorciones de regolito del sondaje RLS-09.

Horizonte	Horizonte B			Horizonte C					
Litología	Tonalita de anfíbol y biotita								
Muestra	1231	1232	1233	1234	1235	1237	1238	1239	1240
La	0,06	3,78	1,65	0,76	0,17	0,50	0,29	0,35	0,26
Ce	0,79	3,57	2,82	0,67	0,40	1,71	1,97	0,96	0,81
Pr	0,05	1,84	0,89	0,19	0,07	0,19	0,12	0,10	0,09
Nd	0,38	9,63	4,73	0,89	0,35	0,92	0,60	0,46	0,41
Sm	0,14	2,78	1,41	0,22	0,09	0,22	0,16	0,11	0,11
Eu	0,06	0,86	0,45	0,06	0,04	0,09	0,05	0,04	0,03
Gd	0,16	2,64	1,54	0,25	0,10	0,27	0,18	0,11	0,11
Tb	0,02	0,37	0,23	0,03	0,01	0,03	0,03	0,02	0,02
Dy	0,12	1,98	1,30	0,19	0,07	0,18	0,15	0,08	0,09
Ho	0,02	0,38	0,25	0,04	0,01	0,04	0,03	0,02	0,02
Er	0,06	1,00	0,66	0,10	0,04	0,09	0,08	0,04	0,05
Tm	0,01	0,12	0,08	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01
Yb	0,05	0,81	0,52	0,07	0,03	0,07	0,06	0,03	0,04
Lu	0,01	0,12	0,08	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01
Y	0,89	14,45	9,63	1,70	0,63	1,61	1,12	0,67	0,72
Σ REE	2,82	44,33	26,24	5,19	2,01	5,94	4,86	2,99	2,78
LREE	1,28	18,82	10,09	2,51	0,99	3,32	2,98	1,87	1,57
HREE	1,54	25,51	16,15	2,68	1,02	2,62	1,88	1,12	1,21
(La/Yb) _N	0,86	3,35	2,28	7,79	4,06	5,12	3,47	8,37	4,66
Ce/Ce*	3,54	0,33	0,57	0,43	0,90	1,36	2,59	1,26	1,30

Para el cálculo de anomalías de cerio se utiliza la fórmula $Ce/Ce^* = Ce_N / (La_N * Pr_N)^{0,5}$
 Las razones (La/Yb)_N y Ce/Ce* utilizan como factor de normalización el condrito C1 de Sun y McDonough (1989).

5.4.3. Diagrama de REE + Y

El diagrama de REE + Y del sondaje RLS-09 (Figura 5.8a) muestra un enriquecimiento significativo del horizonte A en comparación con la roca parental y los demás horizontes del regolito de tonalita de anfíbol y biotita, que a su vez, se encuentran empobrecidos en relación a la roca. Si se compara el horizonte A del sondaje RLS-09 con el horizonte A y B del sondaje RLS-07 (Figura 5.8b) se observa que los patrones son muy similares por lo que es posible inferir que el horizonte A del sondaje RLS-09 procede de un regolito de anfíbolita en gran parte erosionado.

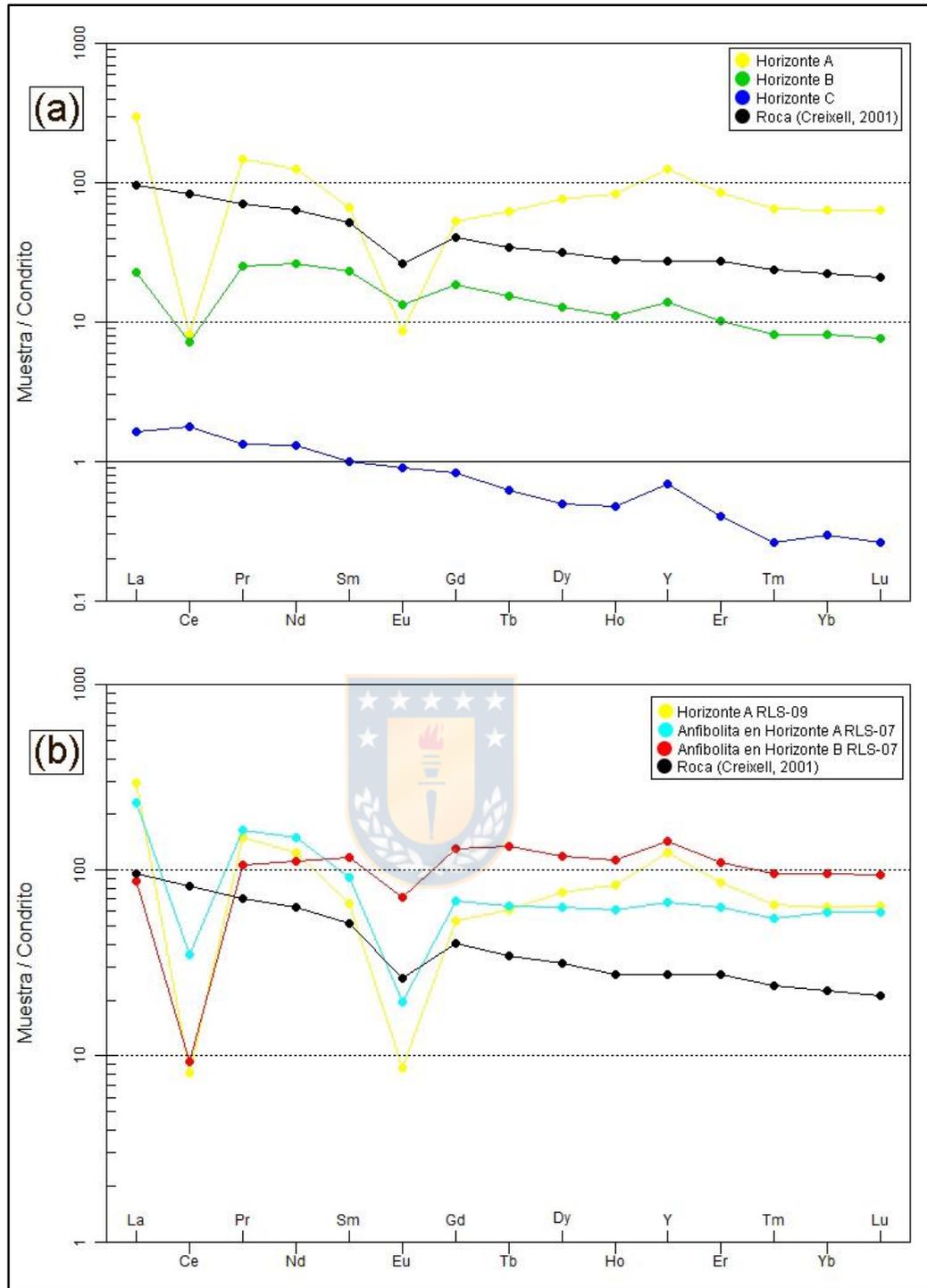


Figura 5.8. (a) Concentración promedio de REE de los distintos horizontes del sondaje RLS-09 normalizado al condrito C1 de (Sun y McDonough, 1989). (b) Comparativa de la concentración promedio de REE de horizonte A del sondaje RLS-09 con la concentración promedio de REE de los horizontes A y B del sondaje RLS-07. Los valores de REE en roca total utilizados para estos diagramas son los publicados por Creixell (2001) pertenecientes a la muestra 00-82 clasificada como tonalita de anfíbol y biotita de la subunidad Tonalitas de Santa Juana.

5.4.4. Análisis de datos

A primera vista resulta curioso que la mayor concentración de REE adsorbidas en arcillas sea en el horizonte A (Figura 5.9) que como mencionamos anteriormente se debe a que el suelo desarrollado procede de un regolito de anfibolita en gran parte erosionado. El segundo *peak* de concentración de REE adsorbidas en arcillas se alcanza en la parte media del horizonte B (111-239 ppm) acumulando mayor contenido de HREE que LREE. La relación $(La/Yb)_N$ muestra en general un comportamiento descendente desde la parte superficial hasta los 20 m aproximadamente revelando una mayor adsorción de HREE a medida que la profundidad aumenta. Luego, a partir de los 20 m se observan fluctuaciones que van desde los 0,86-8,37. Con respecto a las anomalías de Ce, el horizonte A presenta un valor altamente negativo ($Ce/Ce^* = 0,04$) asociado a la mayor concentración de REE. Mismo efecto observado en el regolito de anfibolita del sondaje RLS-07. La zona mineralizada en el regolito de tonalita de anfíbol y biotita muestra valores negativos levemente inferiores a los que se registran en zonas no mineralizadas.

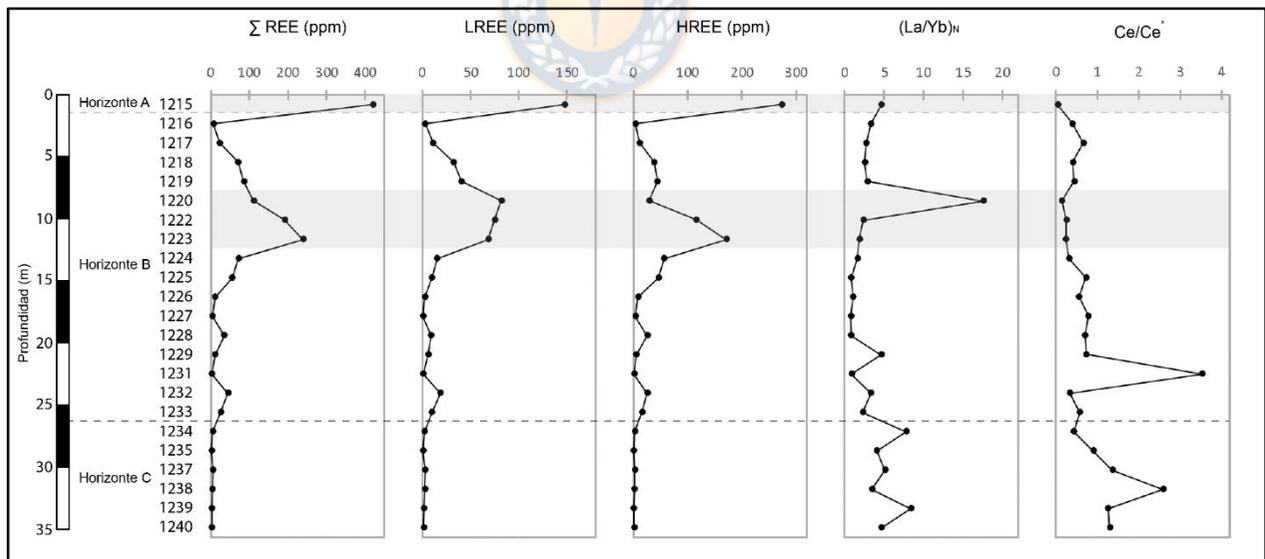


Figura 5.9. Variaciones verticales de índices de REE en sondaje RLS-09. Incluye el contenido total de REE, contenido de LREE, contenido de HREE, relación $(La/Yb)_N$ y valores de anomalía de Ce. El área sombreada resalta las muestras con mayor contenido total de REE y sus respectivas situaciones con respecto a los otros índices.

6. DISCUSIONES

6.1. Evaluación del potencial para desarrollar un depósito de REE en regolito de la unidad tonalita de anfíbol y biotita.

La tonalita de anfíbol y biotita presenta allanita (0,01-0,05%) como mineral de REE además de diversos minerales que pueden portar REE, entre los que se encuentran, apatito (0,38-0,42%), zircón (0,03%) y titanita (0,0-0,51%). De estos cuatro minerales, allanita y titanita son una importante fuente de REE para depósitos alojado en regolito. Los coeficientes de partición de REE entre allanita y fundido indican que la allanita incorpora mayor cantidad de LREE en lugar de HREE e Y (Gieré y Sorensen, 2004), y que la titanita es moderadamente rica en HREE e Y (Green y Pearson, 1986; Prowatke y Klemme, 2005). Además, se descomponen significativamente durante la meteorización. La allanita por ejemplo, rara vez se encuentra en el material regolítico de rocas ígneas que sí la contienen (Braun y Pagel, 1994; Condie y otros, 1995; Schroeder y otros, 2000; Harlavan y Erel, 2002; Gieré y Sorensen, 2004; Price y otros, 2005; Sanematsu y otros, 2013; Berger y otros, 2014) y la titanita difícilmente puede encontrarse en sedimentos clásticos derivados de rocas ígneas (Deer y otros, 1982). A diferencia de allanita o titanita, el apatito no es una fuente favorable para la formación de depósitos de arcillas "iónicas" debido a que durante la meteorización es alterado y reemplazado por fosfatos secundarios que contienen REE como rabdofano y florencita limitando la cantidad de REE disponibles para ser adsorbidas en arcillas. Esto sugiere que rocas ricas en fosfatos, que generalmente se encuentran en granitoides menos diferenciados o fuertemente peraluminosos, no sean rocas parentales favorables para el desarrollo de depósitos de REE alojado en regolito (Sanematsu y Watanabe, 2016). Con respecto al zircón, a pesar de ser un mineral portador de HREE presente en todos los granitoides (Hoskin y Schaltegger, 2003), al igual que el apatito, no es una fuente favorable para los depósitos de REE alojado en regolito ya que es resistente a la meteorización química. Cristales de zircón residual son comúnmente encontrados en este tipo de depósitos (Sanematsu y Kon, 2013) y la presencia de zircón en placeres de arena y sedimentos refleja su resistencia a la meteorización química.

Luego de analizar los distintos minerales que contienen REE y evaluar su contribución al desarrollo de depósitos de REE en regolito se debe prestar atención a su abundancia. Por ejemplo la allanita está presente en concentraciones sumamente bajas en la roca (0,01-0,05%), y además, según los espectros de composición mineralógicos muestra concentraciones promedio para La y Ce que van desde 3,35-6,24% y 8.47-9,28%, respectivamente. Para el caso de la titanita, si bien muestra concentraciones trazas mayores que allanita en la roca parental (0,0-0,51%), según los espectros de composición mineralógicos no hay elementos de REE observables por lo que su contenido sería $< 1\%$.

Ahora bien, teniendo en cuenta que de los cuatro minerales que contienen REE identificados en la tonalita de anfíbol y biotita sólo allanita sería un buen candidato para aportar REE a pesar de su bajo contenido, hay que analizar el efecto de la meteorización para concentrar REE en los distintos horizontes del perfil meteorizado.

Al analizar el promedio de las concentraciones de REE mediante los diagramas spider se aprecia que para el horizonte B existe un leve enriquecimiento en LREE para el sondaje RLS-08, no así para los sondajes RLS-07 y RLS-09 (Figura 6.1a). Para el caso del horizonte C se observa un empobrecimiento en REE para todos los sondajes en relación a la roca parental (Figura 6.1b). De acuerdo a estos resultados es posible inferir tres interpretaciones:

- En general, la meteorización no es lo suficientemente eficiente para descomponer allanita y liberar REE para que se adsorban en las arcillas.
- Las REE liberadas por descomposición de allanita están contenidas en un mineral secundario por lo que no están disponibles para su adsorción en arcillas.
- El tipo de arcilla que posee una gran capacidad para retener REE sólo se concentra en la parte media e inferior del horizonte B como se observa en los diagramas de variación vertical.

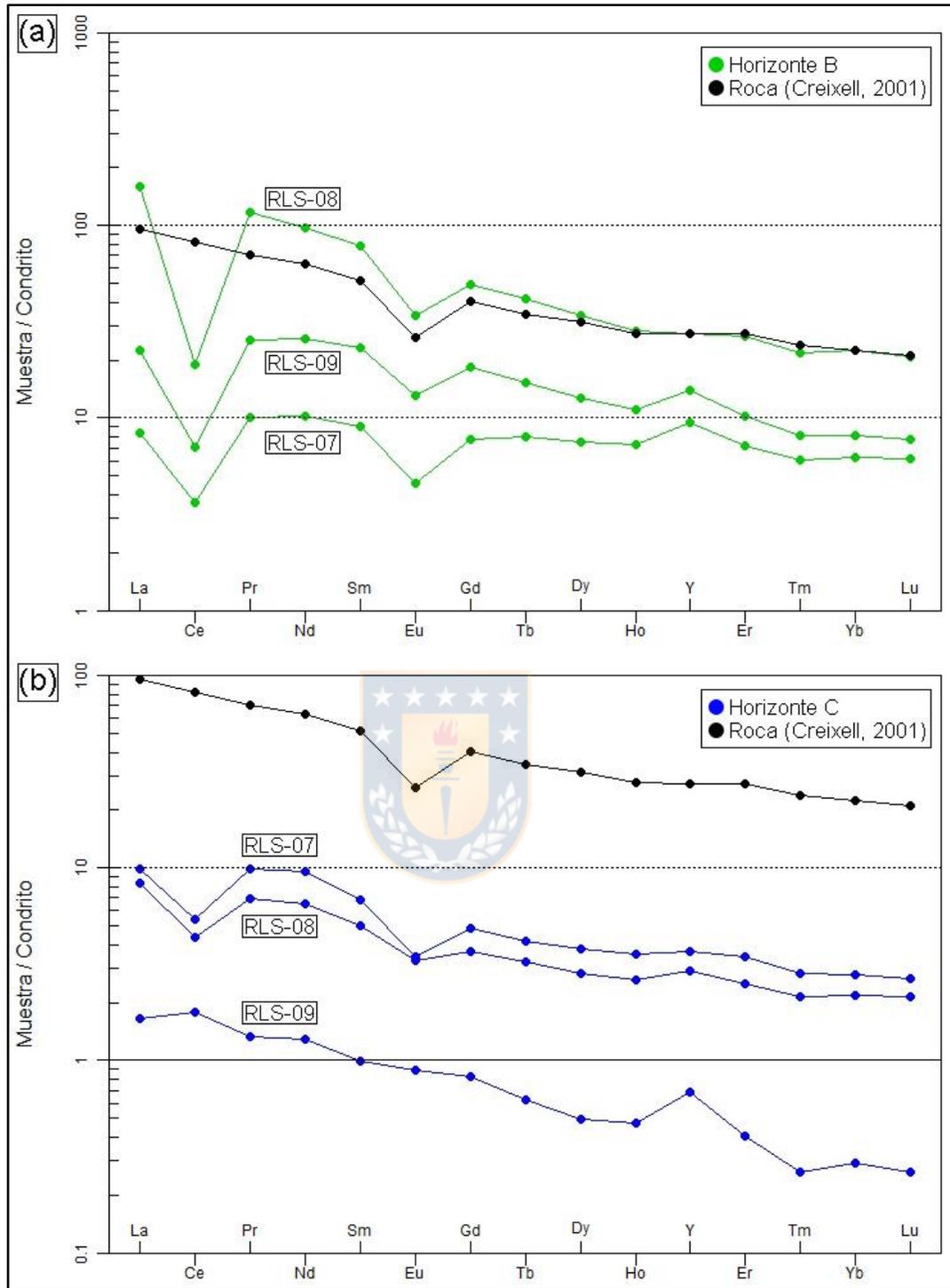


Figura 6.1. (a) Concentración promedio de REE del horizonte B en los sondeos RLS-07, RLS-08 y RLS-09. (b) Concentración promedio de REE del horizonte C en los sondeos RLS-07, RLS-08 y RLS-09. Los valores fueron normalizados al condrito C1 de (Sun y McDonough, 1989). Los valores de REE en roca total utilizados para estos diagramas son los publicados por Creixell (2001) pertenecientes a la muestra 00-82 clasificada como tonalita de anfíbol y biotita de la subunidad Tonalitas de Santa Juana.

6.2. Evaluación del potencial para desarrollar un depósito de REE en regolito de la unidad anfibolita.

Aunque los depósitos de REE alojado en regolito también pueden desarrollarse en rocas basálticas y metamórficas, la gran mayoría proviene de granitos y tobas volcánicas riolíticas (Huo, 1992). Es por esto, que las investigaciones se centran principalmente en los intrusivos más diferenciados. Sin embargo, en el área de estudio aflora una roca metamórfica de anfibolita, que según los estudios geoquímicos de desorciones en regolito muestra un alto contenido de REE, esencialmente HREE e Y.

De acuerdo a los estudios de mineralogía modal la anfibolita no presenta concentraciones de minerales de REE y se limita a tener cantidades trazas de apatito (0,01%) y zircón (0,01%) que como mencionamos anteriormente no son una fuente favorable para el desarrollo de depósitos de REE en regolito. Lo que sí contiene es granate (0,21%) y anfíbol (37,22%) ambos con mayor predominancia por HREE e Y. Si bien la concentración de granate es muy baja no es absurdo pensar que una porción de los espacios en blanco sin mineral de la muestra de anfibolita corresponda a granate por lo que su concentración sería mayor. Por otro lado el anfíbol que según los espectros de composición mineralógicos no presenta elementos de REE observables, bastaría con al menos un 0,1-0,2% en peso de REE (contenido inferior al límite de detección del análisis que es 1%) dentro de su composición para generar 300~600 ppm de REE que es un contenido que está dentro del rango de lo que arrojan las desorciones.

Con respecto a la meteorización es posible inferir que en este tipo de litología es lo suficientemente eficiente para descomponer los minerales que contienen REE (granate y anfíbol) y que las arcillas presentes poseen una gran capacidad para retener y acumular las REE liberadas.

6.3. Evaluación del potencial para desarrollar un depósito de REE en regolito de la unidad migmatita.

La migmatita que abarca una extensión no menor en el sector NW del área de estudio posee concentraciones tanto de allanita (0,06%) como de granate (1,85%) por lo que la posibilidad de generar zonas mineralizadas en los horizontes del perfil meteorizado no se puede descartar. Faltarían más estudios geoquímicos de desorciones que comprueben y evalúen esta posibilidad.

Con respecto a las demás unidades tonalita de biotita y dique diorítico una discusión al respecto no resulta relevante por no presentar una mineralogía sugerente (tonalita de biotita) o por limitaciones en su extensión (dique diorítico).



7. CONCLUSIÓN

El área de estudio presenta condiciones favorables para albergar depósitos de REE en regolito pues la combinación del clima templado local con precipitaciones moderadamente altas que ha permanecido constante por al menos 140 mil años, el desequilibrio entre la tasa de denudación y exhumación, y la suave topografía montañosa han propiciado el desarrollo de un perfil meteorizado grueso que localmente alcanza hasta los 55,3 m de espesor.

En el área de estudio afloran tanto rocas intrusivas como metamórficas que muestran notables diferencias en cuanto a su mineralogía y contenido de REE adsorbidas en arcillas. La tonalita de anfíbol y biotita abarca la mayor extensión y presenta allanita como mineral de REE además de diversos minerales que pueden portar REE, entre los que se encuentran, apatito, zircón y titanita. Desarrolla en la parte media e inferior del horizonte B cuerpos mineralizados sumamente restringidos, alcanzando entre 4-6 m de potencia enriquecidos en LREE. Por otra parte la anfíbolita, que se desconoce su extensión a lo largo y ancho pero que en profundidad alcanza al menos hasta 8 m de potencia, no presenta concentraciones de minerales de REE sino que más bien se limita a tener cantidades muy menores de apatito y zircón que precisamente no son una fuente favorable para el desarrollo de depósitos de REE en regolito. Sin embargo, el material regolítico procedente de esta litología muestra un alto contenido de REE, esencialmente HREE e Y, asociado a la descomposición de granates y anfíboles. Por último la migmatita, posee concentraciones tanto de allanita como de granate por lo que existe la posibilidad de generar zonas mineralizadas en los horizontes del perfil meteorizado.

8. REFERENCIAS

AGUIRRE, L.; HERVÉ, F. & GODOY, E. 1972. Distribution of metamorphic facies in Chile-an outline. *Kristalinikum*. Vol. **9**: 7-19.

ÁLVAREZ, ERNESTO. 2016. Caracterización de minerales de tierras raras en un depósito del sur de Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas, Antofagasta.

AMATO, A.; BECCI, A.; BIRLOAGA, I.; DE MICHELIS, I.; FERELLA, F.; INNOCENZI, V.; IPPOLITO, N. M.; PILLAR JIMENEZ GOMEZ, C.; VEGLIÒ, F. & BEOLCHINI, F. 2019. Sustainability analysis of innovative technologies for the rare earth elements recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. **106**: 41-53.

BERGER, A.; GNOS, E.; JANOTS, E.; FERNANDEZ, A. & GIESE, J. 2008. Formation and composition of rhabdophane, bastnäsité and hydrated thorium minerals during alteration: Implications for geochronology and low-temperature processes. *Chemical Geology*. Vol. **254**: 238–248.

BERGER, A.; JANOTS, E.; GNOS, E.; FREI, R. & BERNIER, F. 2014. Rare earth element mineralogy and geochemistry in a laterite profile from Madagascar. *Applied geochemistry*. Vol. **41**: 218-228.

BINNEMANS, K.; JONES, P. T.; BLANPAIN, B.; VAN GERVEN, T.; YANG, Y.; WALTON, A. & BUCHERT, M. 2013. Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of cleaner production*. Vol. **51**: 1-22.

BIRÓ, L. 1982. Revisión y redefinición de los " estratos de Quiriquina", campaniano-maastrichtiano, en su localidad tipo, en la isla Quiriquina, 3637'lat. sur, Chile, Sudamérica, con un perfil complementario en cocholgue. 3° Congreso Geológico Chileno. Vol. **1**: 37 pp.

BÖRGEL OLIVARES, R. 1983. Geomorfología.

BRAUN, J.J. & PAGEL, M. 1994. Geochemical and mineralogical behavior of REE, Th and U in the Akongo lateritic profile (SW Cameroon). *Catena*. Vol. **21**: 173–177.

BRÜGGEN, M. J. 1950. Fundamentos de la Geología de Chile. Instituto Geográfico Militar.

CHAKHMOURADIAN, A. R. & WALL, F. 2012. Rare earth elements: minerals, mines, magnets (and more). *Elements*. Vol. **8**, (5): 333-340.

CHEN, J.; ZHU, X.; LIU, G.; CHEN, W. & YANG, D. 2018. China's rare earth dominance: The myths and the truths from an industrial ecology perspective. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. **132**: 139-140.

COLLAO S.; GONZÁLEZ, L.; HERNÁNDEZ L. & JIL D. 2015. Mineralogía y Anomalías Geoquímicas de U, Th y Tierras Raras, en Pegmatita de Coyanmahuida, VIII Región, Chile. 14° Congreso Geológico Chileno. Vol. **1**:126-129.

CONDIE, K.C.; DENGATE, J. & CULLERS, R. 1995. Behavior of rare earth elements in a paleoweathering profile on granodiorite in the Front Range, Colorado, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. **59**: 279–294.

CREIXELL, C. 2001. Petrología y Geotermobarometría de las rocas Intrusivas de la Cordillera de la Costa entre los 36°30' S y 38°00' S. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 149 pp., Concepción.

CUCURELLA, J. 1978. Estudio geológico y radiométrico del valle inferior del río Bío-Bío, Provincia de Concepción, VIII Región. Tesis Doctoral, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.

DEADY, É. A.; MOUCHOS, E.; GOODENOUGH, K.; WILLIAMSON, B. J. & WALL, F. 2016. A review of the potential for rare-earth element resources from European red muds: examples from Seydişehir, Turkey and Parnassus-Giona, Greece. *Mineralogical Magazine*. Vol. **80**, (1): 43-61.

DEER, W.A.; HOWIE, R.A. & ZUSSMAN, J. 1982. Rock-Forming Minerals. Volume 1A Orthosilicates. Longman, London and New York: 444–465 pp.

DOSTAL, J. 2016. Rare metal deposits associated with alkaline/peralkaline igneous rocks. *Rev. Econ. Geol.* Vol. **18**: 33-54.

FERRARIS, F. 1981. Mapas geológicos preliminares de Chile. Hoja Los Ángeles-Angol, escala 1:250.000. Instituto de Investigaciones Geológicas. Chile.

GAJARDO, A. 1981. Hoja Concepción-Chillán, Región del Biobío. Escala 1:250.000. Mapas Geológicos Preliminares de Chile, N°6. Instituto de Investigaciones Geológicas.

GANÁ, P.; WALL, R.; GUTIÉRREZ, A. & YAÑEZ, G. 1994. Geología de la Cordillera de la Costa, Regiones de Valparaíso y Metropolitana, al oeste de los 71 00'W. 7° Congreso Geológico Chileno. Vol. **1**: 43-46.

GIBSON, M. & PARKINSON, I. 2011. Once Ignored on the Periodic Table, Don't Ignore Them Now. A Rare Earth Element Industry Overview. *CIBC World Market Inc.* report

GIERÉ, R. & SORENSEN, S.S. 2004. Allanite and other REE-rich epidotegroup minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry.* Vol. **56**: 431–493.

GLODNY, J.; ECHTLER, H.; COLLAO, S.; ARDILES, M.; BURÓN, P. & FIGUEROA, O. 2008. Differential late paleozoic active margin evolution in south-central Chile (37 s–40 s)–the lanalhue fault zone. *Journal of South American Earth Sciences.* Vol. **26**, (4): 397-411.

GODOY, E. 1970. El granito de Constitución y su aureola de metamorfismo de contacto. Thesis, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.

GOLDSCHMIDT, V. M.; THOMASSEN, L.; ULRICH, F.; BARTH, T. F. W.; LUNDE, G. O. J.; ZACHARIASEN, W. H. & HOLMSEN, D. 1925. Geochemische verteilungsgesetze der elemente. *I kommission hos J. Dybwad.*

GONZÁLEZ-BONORINO, F. & AGUIRRE, L. 1970. Metamorphic facies series of the crystalline basement of Chile. *Geologische Rundschau.* Vol. **59**, (3): 979-994.

GOODENOUGH, K. M.; WALL, F. & MERRIMAN, D. 2018. The rare earth elements: demand, global resources, and challenges for resourcing future generations. *Natural Resources Research.* Vol. **27**, (2): 201-216.

- GREEN, T.H. & PEARSON, N.J. 1986. Rare earth element partitioning between sphene and coexisting silicate liquid at high pressure and temperature. *Chemical Geology*. Vol. **55**: 105–119.
- HARLAVAN, Y. & EREL, Y. 2002. The release of Pb and REE from granitoides by the dissolution of accessory phases. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. **66**: 837–848.
- HATCH, G. P. 2012. Dynamics in the global market for rare earths. *Elements*. Vol. **8**, (5): 341-346.
- HERVÉ, F. 1988. Late Paleozoic subduction and accretion in Southern Chile. *Episodes*. Vol. **11**, (3): 183-188.
- HERVÉ, F. & MUNIZAGA, F. 1978. Evidencias geocronológicas de un magmatismo intrusivo Triásico Superior–Jurásico en la Cordillera de la Costa de Chile entre los 35°30'S y 36°30'S. 7° Congreso Geológico Argentino, Tomo **2**: 43-52.
- HERVÉ, F.; CALDERÓN, M.; FANNING, C. M.; PANKHURST, R. J. & GODOY, E. 2013. Provenance variations in the Late Paleozoic accretionary complex of central Chile as indicated by detrital zircons. *Gondwana Research*. Vol. **23**, (3): 1122-1135.
- HERVÉ, F.; FAUNDEZ, V.; CALDERÓN, M.; MASSONNE, H. J. & WILLNER, A. P. 2007. Metamorphic and plutonic basement complexes. *The Geology of Chile*. Teresa Moreno & Wes Gibbons. The Geological Society: 5-19 pp. London.
- HERVÉ, F.; GODOY, E.; PARADA, M. A.; RAMOS, V.; RAPELA, C.; MPDOZIS, C. & DAVIDSON, J. 1987. A general view on the Chilean-Argentine Andes, with emphasis on their early history. *Circum-Pacific Orogenic Belts and Evolution of the Pacific Ocean Basin*. Vol. **18**: 97-113.
- HERVÉ, F.; MUNIZAGA, F.; MANTOVANI, M. & HERVÉ, M. 1976. Edades Rb-Sr neopaleozoicas del basamento cristalino de la Cordillera de Nahuelbuta. 1° Congreso Geológico Chileno. Vol. **1**: 19-26.

- HERVÉ, F.; MUNIZAGA, F.; PARADA, M. A.; BROOK, M.; PANKHURST, R. J.; SNELLING, N. J. & DRAKE, R. 1988. Granitoids of the Coast Range of central Chile: geochronology and geologic setting. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **1**, (2):185-194.
- HEUSSER, C.J. 1990. Ice age vegetation and climate of subtropical Chile. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. Vol. **80**: 107-127.
- HEUSSER, L.; HEUSSER, C.; MIX, A. & MCMANUS, J. 2006. Chilean and Southeast Pacific paleoclimate variations during the last glacial cycle: directly correlated pollen and $\delta^{18}\text{O}$ records from ODP Site 1234. *Quaternary Science Reviews*. Vol **25**: 3404-3415.
- HOLTSTAM, D.; ANDERSSON, U. B.; BROMAN, C. & MANSFELD, J. 2014. Origin of REE mineralization in the Bastnäs-type Fe-REE-(Cu-Mo-Bi-Au) deposits, Bergslagen, Sweden. *Mineralium Deposita*. Vol. **49**, (8): 933-966.
- HOSKIN, P.W. & SCHALTEGGER, U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in mineralogy and geochemistry*. Vol. **53**: 27–62.
- HUO, M.Y. 1992. Distribution characteristics of the weathering-crust-type rare-earth resources in Nanling, China. *Journal of Natural Resources*. Vol. **7**: 64–70.
- INNOCENZI, V.; DE MICHELIS, I.; FERELLA, F.; BEOLCHINI, F.; KOPACEK, B. & VEGLIÒ, F. 2013. Recovery of yttrium from fluorescent powder of cathode ray tube, CRT: Zn removal by sulphide precipitation. *Waste management*. Vol. **33**, (11): 2364-2371.
- IPPOLITO, N. M.; INNOCENZI, V.; DE MICHELIS, I.; MEDICI, F. & VEGLIÒ, F. 2017. Rare earth elements recovery from fluorescent lamps: a new thermal pretreatment to improve the efficiency of the hydrometallurgical process. *Journal of cleaner production*. Vol. **153**: 287-298.
- JIL, D. 2014. Uranio, torio, itrio y tierras raras en pegmatitas paleozoicas, sector de Florida, octava región, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 95 pp., Concepción.

JORDENS, A.; CHENG, Y. P. & Waters, K. E. 2013. A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*. Vol. **41**: 97-114.

LÉPEZ, L. 2002. Análisis estructural del Triásico de Santa Juana al sur y occidente del río Biobío, VIII Región del Biobío, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito).

LI, Y. H. M.; ZHAO, W. W. & ZHOU, M. F. 2017. Nature of parent rocks, mineralization styles and ore genesis of regolith-hosted REE deposits in South China: an integrated genetic model. *Journal of Asian Earth Sciences*. Vol. **148**: 65-95.

LI, Y. H. M.; ZHOU, M. F. & WILLIAMS-JONES, A. E. 2019. The Genesis of Regolith-Hosted Heavy Rare Earth Element Deposits: Insights from the World-Class Zudong Deposit in Jiangxi Province, South China. *Economic Geology*. Vol. **114**, (3): 541-568.

LOTTERMOSER, B. G. 1990. Rare-earth element mineralisation within the Mt. Weld carbonatite laterite, Western Australia. *Lithos*. Vol. **24**, (2): 151-167.

LUCASSEN, F.; TRUMBULL, R.; FRANZ, G.; CREIXELL, C.; VÁSQUEZ, P.; ROMER, R. L. & FIGUEROA, O. 2004. Distinguishing crustal recycling and juvenile additions at active continental margins: the Paleozoic to recent compositional evolution of the Chilean Pacific margin (36–41 S). *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **17**, (2):103-119.

MARKS, M. A.; HETTMANN, K.; SCHILLING, J.; FROST, B. R. & MARKL, G. 2011. The mineralogical diversity of alkaline igneous rocks: critical factors for the transition from miaskitic to agpaitic phase assemblages. *Journal of Petrology*. Vol. **52**, (3): 439-455.

MCDONOUGH, W. F. & SUN, S. S. 1995. The composition of the Earth. *Chemical geology*. Vol. **120**, (3-4): 223-253.

MELNICK, D.; BOOKHAGEN, B.; STRECKER, M. R. & ECHTLER, H. P. 2009. Segmentation of megathrust rupture zones from fore-arc deformation patterns over hundreds to millions of years, Arauco peninsula, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. Vol. **114**, (B1).

MENAD, N.; & SERON, A. 2017. Characteristics of Nd-Fe-B Permanent Magnets Present in Electronic Components. *Int J Waste Resour.* Vol. **7**: 263.

MOLDOVEANU, G. A. & PAPANGELAKIS, V. G. 2012. Recovery of rare earth elements adsorbed on clay minerals: I. *Desorption mechanism. Hydrometallurgy.* Vol. **117**: 71-78.

MUNIZAGA, F.; HERVÉ, F.; DRAKE, R.; PANKHURST, R. J.; BROOK, M. & SNELLING, N. 1988. Geochronology of the Lake Region of south-central Chile (39–42 S): Preliminary results. *Journal of South American Earth Sciences.* Vol. **1**, (3): 309-316.

NIELSEN, S. N. 2005. The Triassic Santa Juana Formation at the lower Biobío River, south central Chile. *Journal of South American Earth Sciences.* Vol. **19**, (4): 547-562.

NISHIMURA, T. 1971. On the geology of the Magellan geosyncline. *Reports of the Geological Survey of Hokkaido.* Vol. **44**, 45-53.

OBBER, J. A. 2017. Mineral commodity Summaries 2017. *US Geological Survey.* 202 pp.

PARADA, M. A. 1991. Geochemistry of the Triassic to Jurassic plutonism of central Chile (30° to 33°S); Petrogenetic implications and a tectonic. *Andean Magmatism and its tectonic setting.* Vol. **265**: 99-112.

PINEDA, V. 1983. Evolución Paleogeográfica de la Península de Arauco durante el Cretácico Superior–Terciario. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología y Geofísica (Inédito): 278 pp., Santiago.

PIPER, D. Z. & BAU, M. 2013. Normalized rare earth elements in water, sediments, and wine: identifying sources and environmental redox conditions. *American Journal of Analytical Chemistry.* Vol. **4**, (10): 69-83.

PLÁŠIL, J.; DUŠEK, M.; NOVÁK, M.; ČEJKA, J.; CÍSAŘOVÁ, I. & ŠKODA, R. 2011. Sejkoraite-(Y), a new member of the zippeite group containing trivalent cations from Jáchymov (St. Joachimsthal), Czech Republic: description and crystal structure refinement. *American Mineralogist.* Vol. **96**, (7): 983-991.

PRICE, J.R.; VELBEL, M.A. & PATINO, L.C. 2005. Allanite and epidote weathering at the Coweeta Hydrologic Laboratory, western North Carolina, USA. *American Mineralogist*. Vol. **90**: 101–114.

PROWATKE, S. & KLEMME, S. 2005. Effect of melt composition on the partitioning of trace elements between titanite and silicate melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. **69**: 695–709.

REIMER, M.; SCHENK-MATHES, H.; HOFFMANN, M.; & ELWERT, T. 2018. Recycling Decisions in 2020, 2030, and 2040—When Can Substantial NdFeB Extraction be Expected in the EU?. *Metals*. Vol. **8**: 867.

RUDNICK, R. L. & GAO, S. 2003. Composition of the continental crust. *Treatise on geochemistry*. Vol. **3**: 659.

SANEMATSU, K. & KON, Y. 2013. Geochemical characteristics determined by multiple extraction from ion adsorption type REE ores in Dingnan County of Jiangxi Province, South China. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*. Vol. **64**: 313–330.

SANEMATSU, K.; KON, Y.; IMAI, A.; WATANABE, K. & WATANABE, Y. 2013. Geochemical and mineralogical characteristics of ion-adsorption type REE mineralization in Phuket, Thailand. *Mineralium Deposita*. Vol. **48**: 437–451.

SANEMATSU, K. & WATANABE, Y. 2016. Characteristics and genesis of ion adsorption-type rare earth element deposits. *Rev. Econ. Geol.* Vol. **18**: 55-79.

SALVI, S. & WILLIAMS-JONES, A. E. 2006. Alteration, HFSE mineralisation and hydrocarbon formation in peralkaline igneous systems: Insights from the Strange Lake Pluton, Canada. *Lithos*. Vol. **91**, (1-4): 19-34.

SCHALLER, M.; EHLERS, T. A.; LANG, K. A.; SCHMID, M. & FUENTES-ESPOZ, J. P. 2018. Addressing the contribution of climate and vegetation cover on hillslope denudation, Chilean Coastal Cordillera (26–38 S). *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. **489**: 111-122.

SCHROEDER, P.A.; MELEAR, N.D.; WEST, L.T. & HAMILTON, D.A. 2000. Metagabbro weathering in the Georgia Piedmont, USA: implications for global silicate weathering rates. *Chemical Geology*. Vol. **163**: 235–245.

STRECKEISEN, A. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth-science reviews*. Vol. **12**, (1): 1-33.

SUAZO, H. 2005. Estudio Petrográfico, Mineralógico y Geoquímico de los Intrusivos Jurásicos de la Cordillera de la Costa VII Región del Maule y VIII Región del Bío-Bío, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 154 pp., Concepción.

TARBUCK, E. J. & LUTGENS, F. K. 2005. Ciencias de la Tierra. *Prentice-Hall*.

TAVERA, J. 1960. El Triásico del valle inferior del río Biobío. *Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Instituto de Geología*. Vol. **18**: 317-345.

TAYLOR, S. R. & MCLENNAN, S. M. 1985. The continental crust: its composition and evolution.

TKACZYK, A. H.; BARTL, A.; AMATO, A.; LAPKOVSKIS, V. & PETRANIKOVA, M. 2018. Sustainability evaluation of essential critical raw materials: cobalt, niobium, tungsten and rare earth elements. *Journal of Physics D: Applied Physics*. Vol. **51**, (20): 1-27.

VÁSQUEZ, P. S. 2001. Petrología y Geotermobarometría del Basamento Metamórfico de la Cordillera de la Costa entre los 36°30'S y 38°00'S. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito).

VELÁSQUEZ, R. 2012. Petrografía y Mineralogía de la Pegmatita Granítica Poñen e Intrusivos en el Batolito Costero del Sur, Región del Biobío, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 107 pp., Concepción.

WALL, F. & MARIANO, A. N. 1995. Rare earth minerals in carbonatites: a discussion centred on the Kangankunde Carbonatite, Malawi. *Mineralogical Society Series*. Vol. **7**: 193-226.

WU, C.Y.; HUANG, D.H. & GUO, Z.G. 1990a. REE geochemistry in the weathered crust of granites, Longnan area, Jiangxi Province. *Acta Geologica Sinica*. Vol. **3**: 193–210.

YUNG, C. 2016. Petrografía y Geocronología de las unidades intrusivas del Complejo Plutónico Penco, Región del Biobío, Chile: Nuevos antecedentes para el Batolito Costero del Sur. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito).

ZHANG, H.; XIAO, R.; WANG, D.; ZHONG, Z.; SONG, M.; PAN, Q. & HE, G. 2009. Catalytic fast pyrolysis of biomass in a fluidized bed with fresh and spent fluidized catalytic cracking (FCC) catalysts. *Energy & Fuels*. Vol. **23**, (12): 6199-6206.





ANEXO I

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

Muestra RLS-01

Coordenada Este: 676255

Coordenada Norte: 5878885

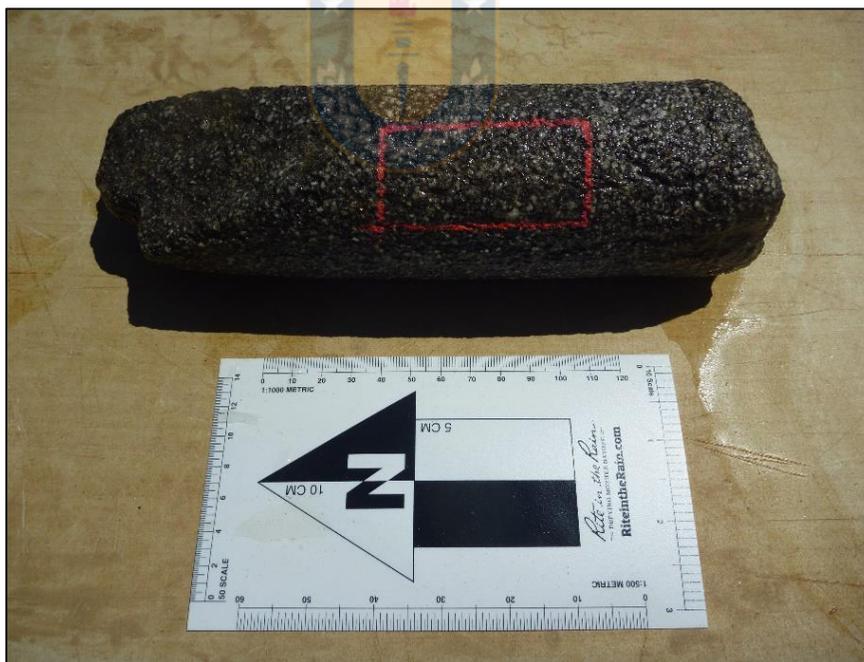


Descripción: Tonalita de anfíbol y biotita con textura fanerítica equigranular de grano grueso. Composicionalmente presenta 25% cuarzo, 40% plagioclasa, 25% biotita y 10% anfíbol. Exhibe leve alteración clorítica afectando a máficos. Se reconoce foliación mineral a 50° con respecto al eje del testigo. Localmente alternan bandas máficas de hasta 2 cm. Contiene pequeños diques microdioríticos de 2,5 cm de ancho. Sondaje con 12,8 mts de tramo rocoso.

Muestra RLS-02

Coordenada Este: 676003

Coordenada Norte: 5878773



Descripción: Diorita con textura fanerítica equigranular de grano medio. Composicionalmente presenta 45% plagioclasa y 55% biotita. Contiene vetillas locales de clorita a 30° c/r al eje del testigo y otras de plagioclasa-cuarzo a 50° con respecto al eje del testigo. 4,3 mts de tramo rocoso. Litología solamente observada en RLS-02 por lo que fue seleccionada para realización de sección delgada.

Muestra RLS-02

Coordenada Este: 676003

Coordenada Norte: 5878773

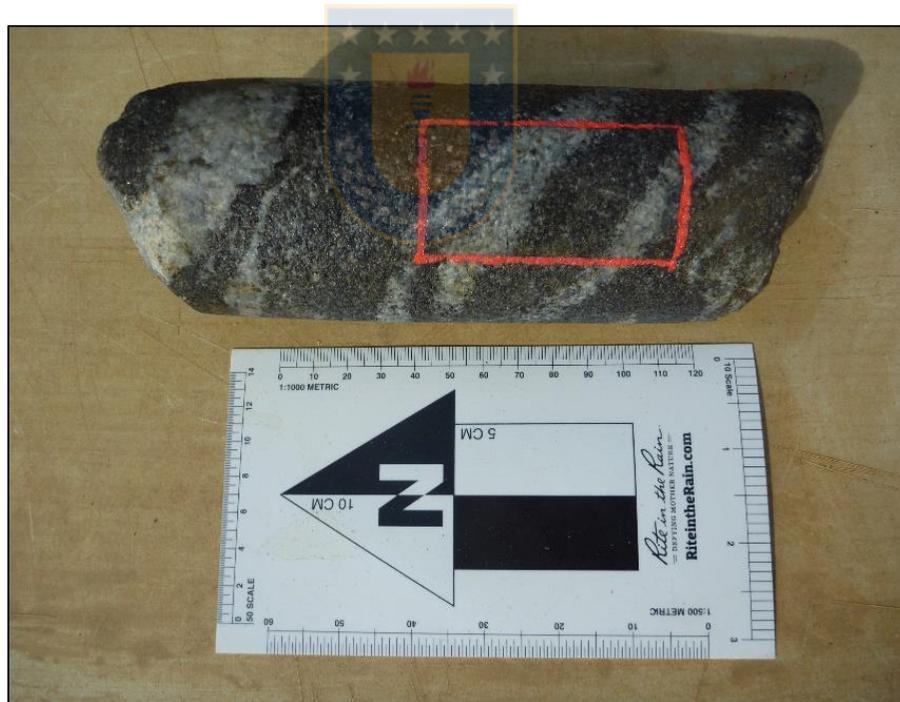


Descripción: Tonalita de biotita con textura fanerítica equigranular de grano grueso. Composicionalmente presenta 20% cuarzo, 50% plagioclasa y 25% biotita. 1,5 mts de tramo rocoso. Muestra seleccionada para realización de sección delgada por estar en contacto con litología diorítica perteneciente al mismo sondaje.

Muestra RLS-03

Coordenada Este: 675790

Coordenada Norte: 5878860

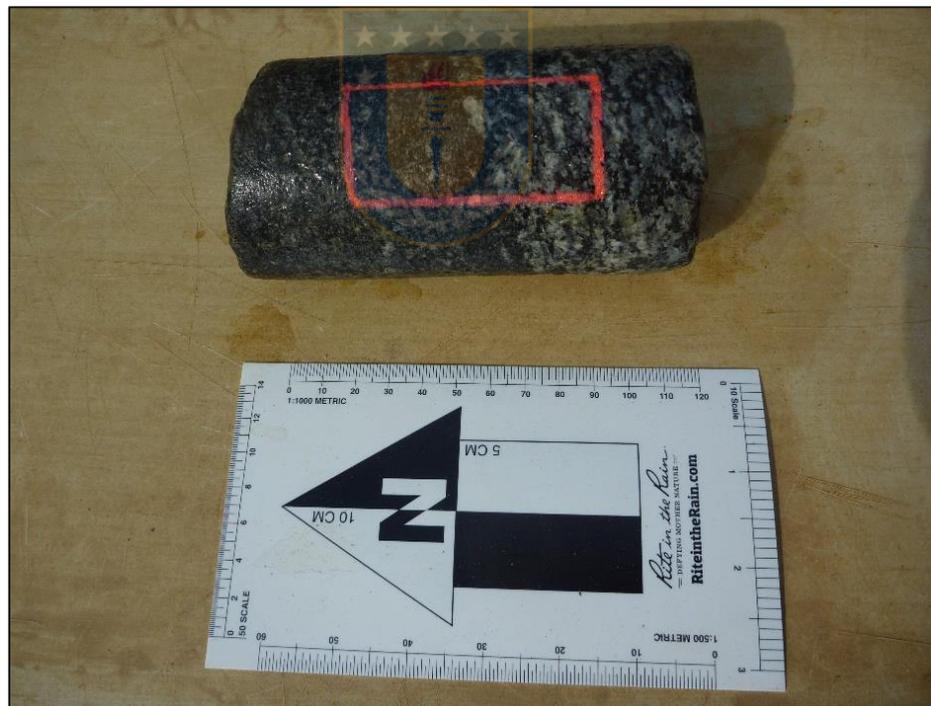


Descripción: Migmatita de textura bandeada y grano medio. El leucosoma se compone de 40% cuarzo y 60% feldespato mientras que el melanosoma está constituido por 55% biotita, 40% plagioclasa y 5% granate. Las plagioclasas se observan en cúmulos. El ángulo de las bandas es de 40° con respecto al eje del testigo. Tramo rocoso de 4,7 mts fuertemente fracturado, el testigo más largo mide 17 cm. Litología seleccionada para realización de sección delgada ya que es el único sondaje correspondiente a esta litología.

Muestra RLS-04

Coordenada Este: 676335

Coordenada Norte: 5878987



Descripción: Tonalita de anfíbol y biotita con textura fanerítica equigranular de grano grueso. Composicionalmente presenta 30% cuarzo, 40% plagioclasa, 25% biotita y 5% anfíbol. Se reconocen diques microdioríticos elongados de 2-7 cm de ancho orientados a 55° con respecto al eje del sondaje. Exhibe trazas de calcopirita. Tramo rocoso de 4,2 mts. Muestra seleccionada para realización de sección delgada ya que presenta una buena porción de dique microdiorítico cortando a la unidad tonalítica.

Muestra RLS-05

Coordenada Este: 676145

Coordenada Norte: 5878773



Descripción: Tonalita de biotita y granate con textura fanerítica equigranular de grano grueso. Composicionalmente presenta 30% cuarzo, 40% plagioclasa, 25% biotita y 5% granate. Lo característico de este tramo es que a los 58,35-58,45 mts aparecen cúmulos de un mineral color rosado vítreo y hábito cristalino (granate). Debido a la presencia de este mineral la muestra se selecciona para realización de sección delgada. Tramo rocoso de 6,9 mts.

Muestra RLS-06

Coordenada Este: 676244

Coordenada Norte: 5878680

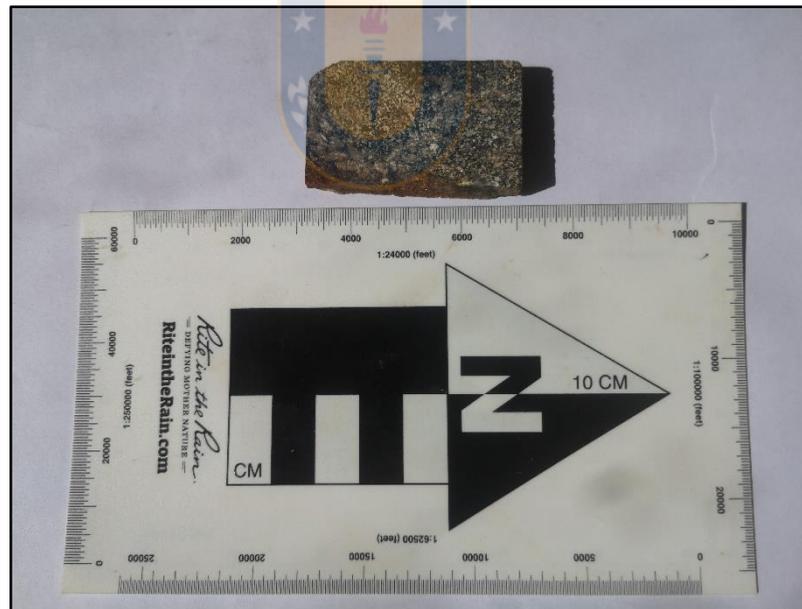


Descripción: Tonalita de anfíbol y biotita con textura fanerítica equigranular de grano grueso. Composicionalmente presenta 30% cuarzo, 45% plagioclasa, 20% anfíbol y 5% biotita alterada a clorita y. Presenta diques microdioríticos elongados similares a los vistos anteriormente. Muestra seleccionada para realización de sección delgada. Tramo rocoso de 5,0 mts.

Muestra RLS-07

Coordenada Este: 677269

Coordenada Norte: 5879184



Descripción: Anfibolita con textura granoblástica de grano fino. Composicionalmente presenta 50% anfíbol, 30% plagioclasa fuertemente alterada a caolín, 15% cuarzo y 5% de un mineral en tono rosa amarillento pálido, hábito cristalino y brillo vítreo (corindón?). Única muestra de roca de esta litología. Tiene un tamaño de 10 cm aproximadamente y está localizada en la parte superior del sondaje. Muestra seleccionada para realización de sección delgada por ser la única en este tipo de litología y estar ubicada en una zona enriquecida en REE.

Muestra RLS-07

Coordenada Este: 677269

Coordenada Norte: 5879184



Descripción: Tonalita de anfíbol y biotita con textura fanerítica equigranular de grano grueso. Composicionalmente presenta 30% cuarzo, 40% plagioclasa, 20% biotita y 10% anfíbol. En el metraje 26,6 mts se observa un enclave microdiorítico parcialmente digerido con bordes irregulares. Muestra seleccionada para realización de dos secciones delgadas una que abarque el enclave y otra para la litología en particular. Tramo rocoso 5,2 mts.

Muestra RLS-11

Coordenada Este: 676826

Coordenada Norte: 5878089



Descripción: Tonalita de anfíbol y biotita con textura fanerítica equigranular de grano grueso. Composicionalmente presenta 30% cuarzo, 45% plagioclasa, 15% biotita y 10% anfíbol. Se observa un enclave microdiorítico con textura porfídica con una masa de 90% máficos (biotitas alteradas a clorita) y fenocristales de plagioclasa de 6 a 8 mm. Muestra seleccionada para realización de sección delgada en el área del enclave microdiorítico. Tramo rocoso 40 cm.

Muestra RLS-12

Coordenada Este: 676643

Coordenada Norte: 5877935



Descripción: Tonalita de anfíbol y biotita con textura fanerítica equigranular de grano medio. Composicionalmente presenta 30% cuarzo, 45% plagioclasa, 20% biotita y 5% anfíbol. Exhibe un leve bandeamiento de minerales a 60° con respecto al eje del testigo. Tramo rocoso 25 cm.

Muestra RLS-13

Coordenada Este: 676370

Coordenada Norte: 5877928



Descripción: Tonalita de anfíbol y biotita con textura fanerítica equigranular de grano grueso. Composicionalmente presenta 25% cuarzo, 40% plagioclasa, 20% biotita y 15% anfíbol. En la primera fotografía se observa una roca de grano grueso sin bandeamiento y en la segunda se observa una roca con un bandeamiento orientado a 55° con respecto al eje del testigo. Tramo rocoso 20 cm cada uno.

Muestra RLS-15

Coordenada Este: 676951

Coordenada Norte: 5878728



Descripción: Tonalita de anfíbol y biotita con textura fanerítica equigranular de grano grueso. Composicionalmente presenta 20% cuarzo, 40% plagioclasa, 25% biotita y 15% anfíbol. Presenta diques microdioríticos elongados con textura porfídica de 7 cm de largo y 3 de ancho compuestos por biotita y plagioclasa. Muestra seleccionada para realización de sección delgada para definir semejanzas o diferencias composicionales con respecto a las demás litologías tonalíticas de anfíbol y biotita del sector. Tramo rocoso 1,7 mts.

Muestra RLS-20

Coordenada Este: 675691

Coordenada Norte: 5877232

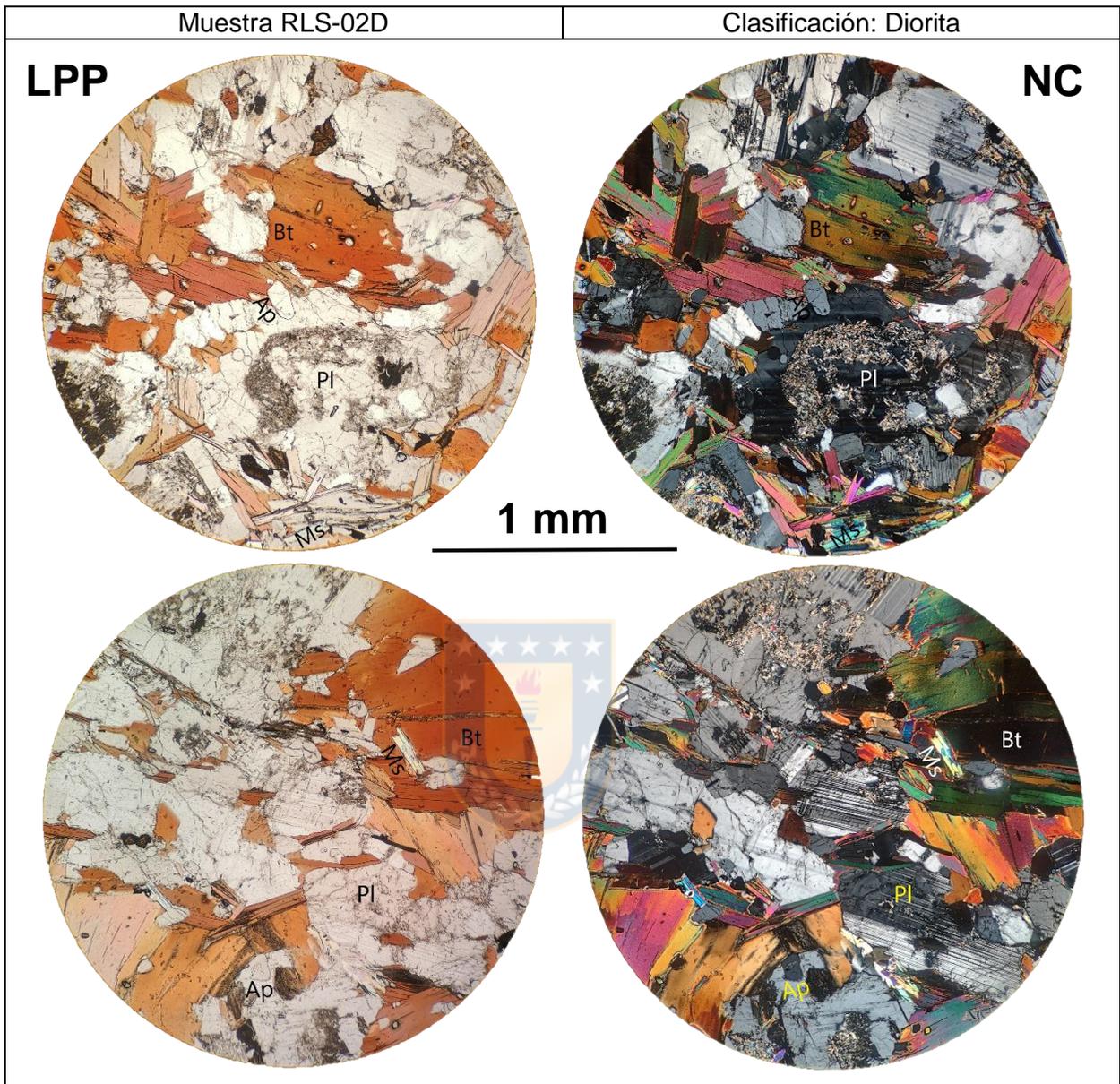


Descripción: Tonalita de anfíbol y biotita con textura fanerítica equigranular de grano grueso. Composicionalmente presenta un 30% cuarzo, 40% plagioclasa, 20% biotita y 10% anfíbol. Presenta diques microdioríticos con textura porfídica compuestos por biotita y plagioclasa. Se observa un bandeamiento mineral a 60° con respecto al eje del testigo. Muestra seleccionada para realización de sección delgada para definir semejanzas o diferencias composicionales con respecto a las demás litologías tonalíticas de anfíbol y biotita del sector. Tramo rocoso 2,7 mts.



ANEXO II

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA MICROSCÓPICA



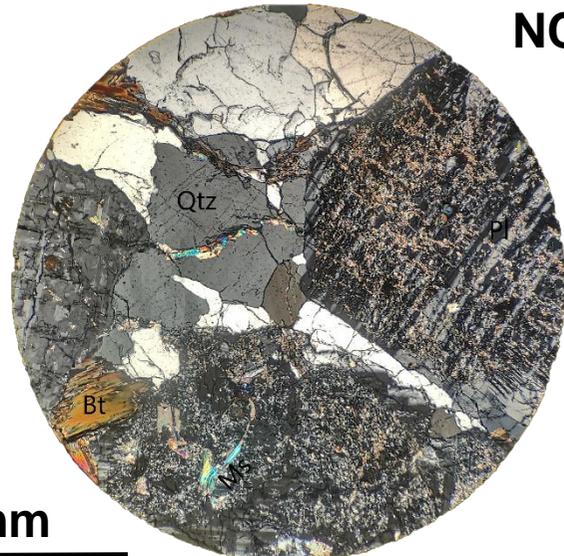
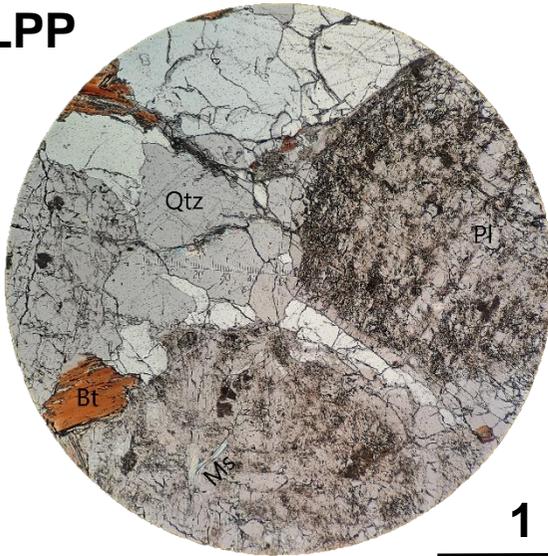
La muestra presenta una textura hipidiomórfica granular de grano medio. La mineralogía está conformada por plagioclasa (49%) de hábito subhedral y tamaño de grano entre 0,1-2,0 mm que evidencia una alteración a sericita y arcilla de carácter moderado afectando el centro de los cristales principalmente. Biotita (39%) que ocurre como cristales subhedrales de color pardo con un tamaño de grano entre 0,1-2,0 mm. Muscovita (9%) caracterizada por sus colores brillantes de birrefringencia exhibe una forma y tamaño similar a la biotita. Apatito (2%) que destaca por su hábito euhedral subredondeado, extinción recta y birrefringencia baja presenta un tamaño de grano de 0,1 mm algo poco usual para este mineral que comúnmente se observa con un tamaño mucho menor o en inclusiones. Suele estar englobado por biotitas o adyacente a éstas al igual que cristales de zircón (1%).

Muestra RLS-02T

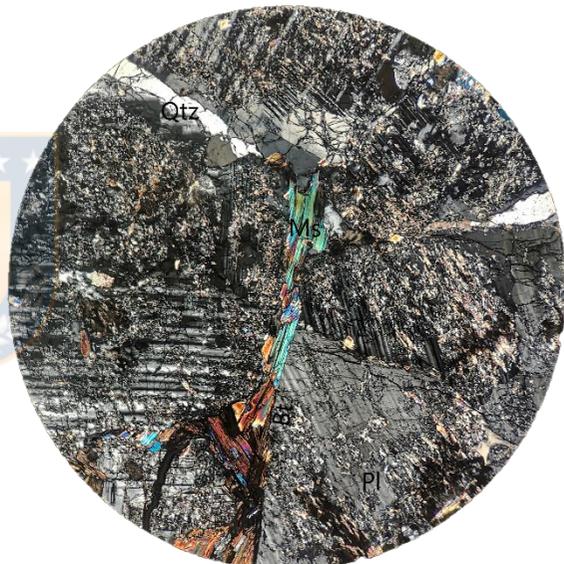
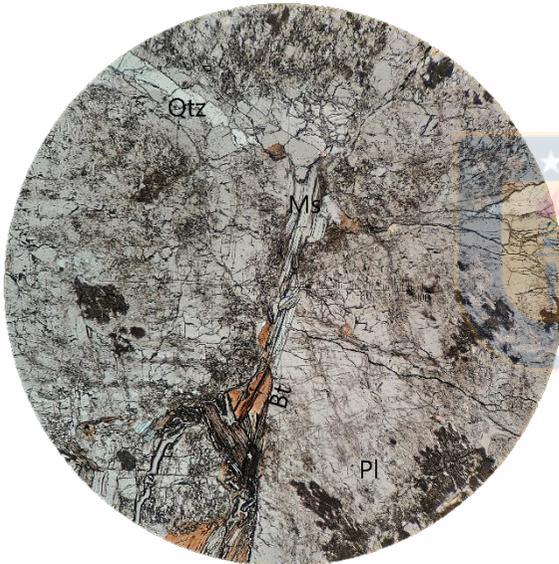
Clasificación: Tonalita de biotita

LPP

NC



1 mm

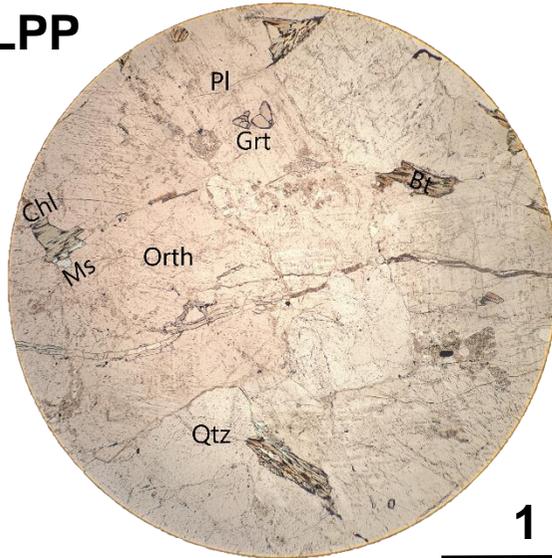


La muestra exhibe una textura hipidiomórfica granular de grano medio a grueso. Está constituida por plagioclasa (48%) que presenta cristales subidiomórficos de 5,0 mm de tamaño. Contiene una densa masa de mica fina (sericita) que aparece como resultado de la hidrólisis de plagioclasa. Afecta de forma masiva a los cristales aunque en ocasiones sigue direcciones preferenciales de los planos de foliación. Cuarzo (18%) alotriomórfico se dispone intersticialmente. Biotita (10%) único mineral máfico presente, destaca por su color pardo, extinción recta, y forma subhedral con un tamaño de grano entre 0,5-1,0 mm. Muscovita-Sericita (22%) ocurre como pequeños cristales subhedrales de hábito laminar menores a 1 mm y muestra colores brillantes de birrefringencia. Por último, calcita (2%) subhedral presente en una vetilla reconocida por su maclado y colores anómalos de interferencia (color pastel).

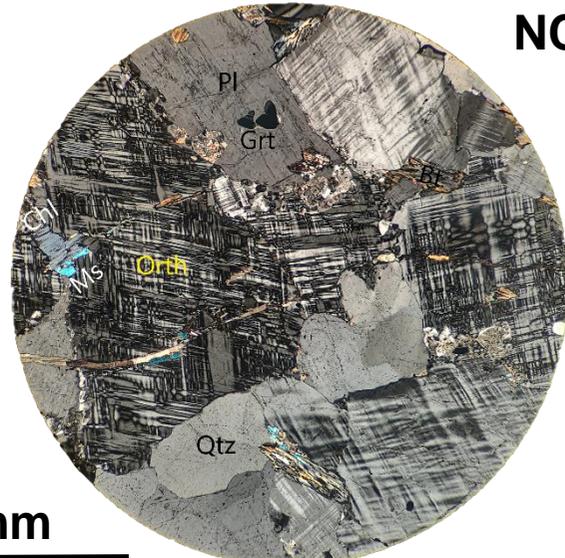
Muestra RLS-03

Clasificación: Migmatita

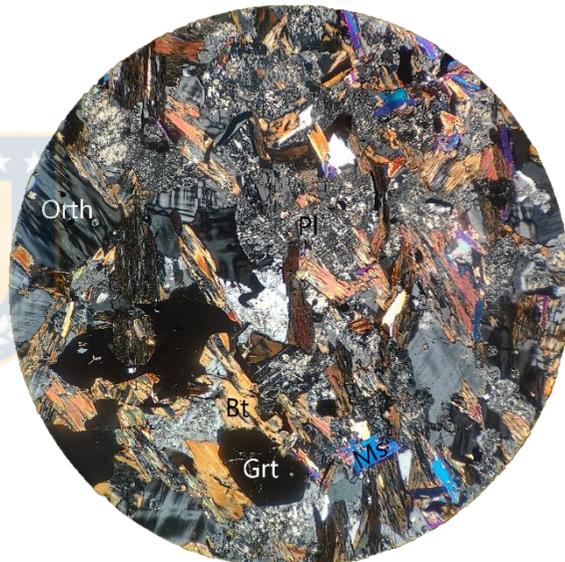
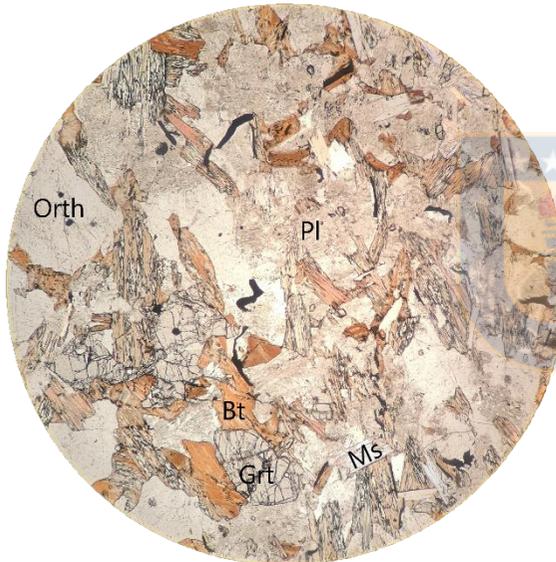
LPP



NC



1 mm

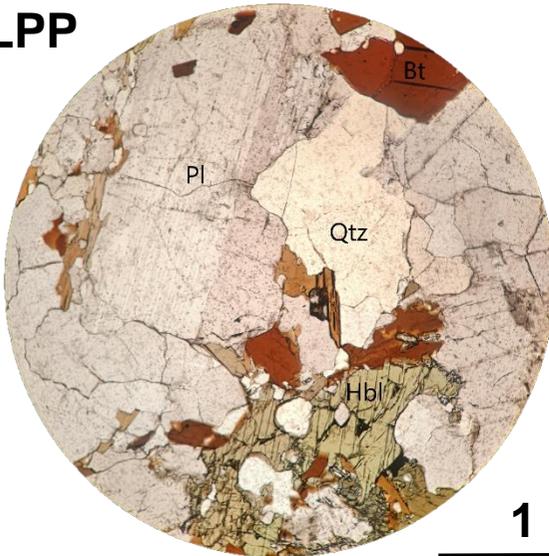


La muestra está compuesta por dos bandas distintas entre sí; una banda clara (leucosoma) que exhibe una textura granoblástica de grano medio caracterizada por la presencia de ortoclasa (58%) subhedral de 0,5-2,0 mm además de cuarzo (24%) anhedral y plagioclasa (8%) subhedral. Se observan en menor proporción y tamaño cristales subhedrales de biotita (5%), clorita (3%), muscovita (1%) y granate (1%). Y una banda oscura (melanosoma) que presenta una textura granoblástica de grano fino definida por la presencia de cristales subhedrales de plagioclasa (46%), ortoclasa (21%), biotita (15%), clorita (7%) y granate (5%) de 0,1-0,5 mm de tamaño como constituyentes principales. En menor cantidad, también es posible observar minerales como muscovita (3%), calcita (1%) presente en una vetilla, apatito (1%) y rutilo (1%).

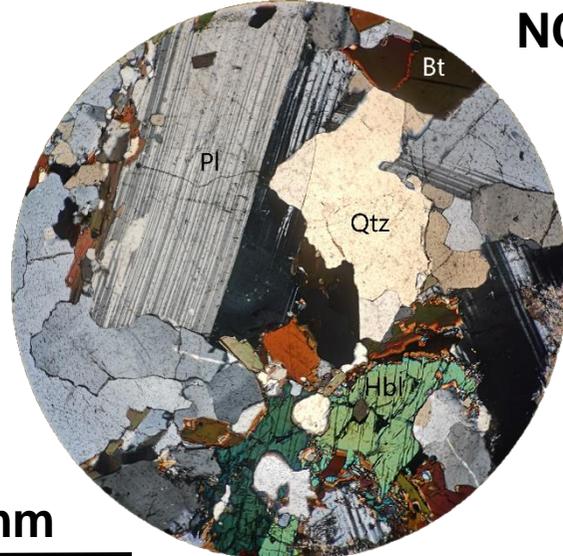
Muestra RLS-04

Clasificación: Tonalita de anfíbol y biotita

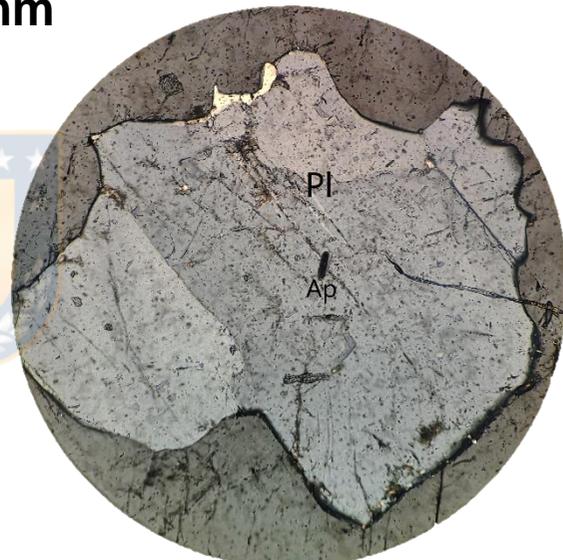
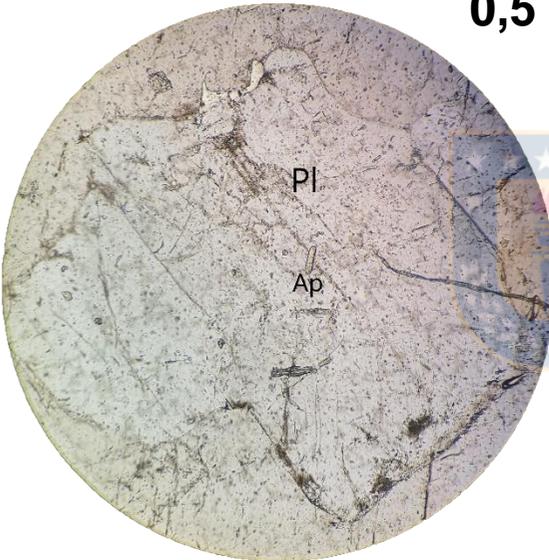
LPP



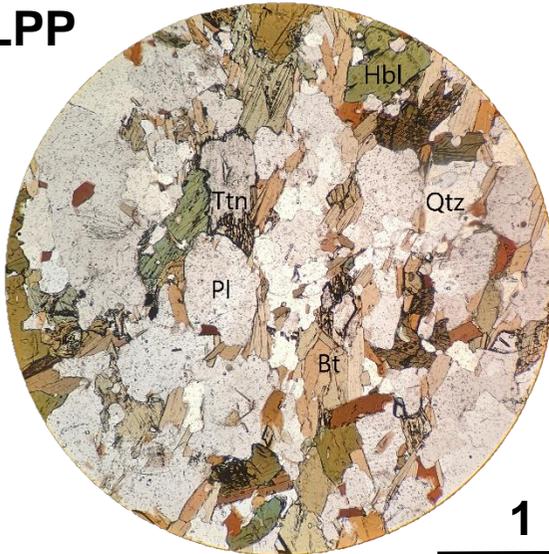
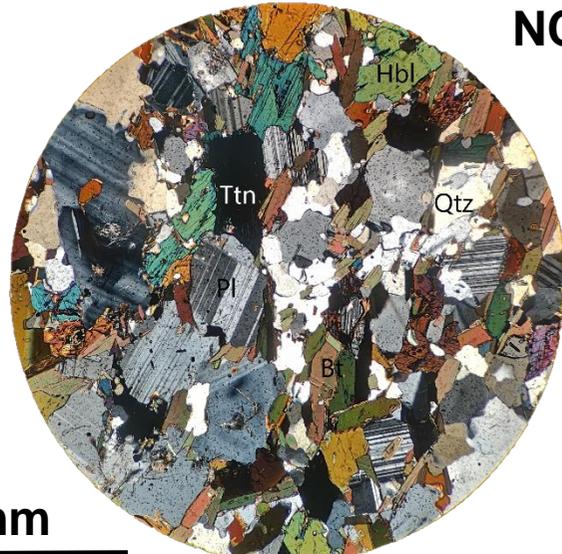
NC



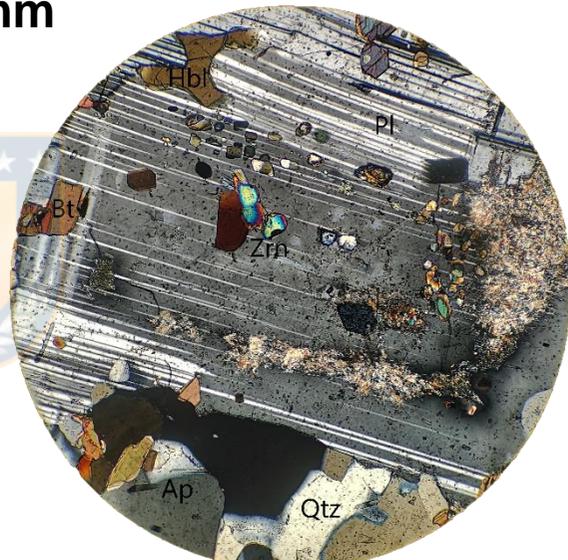
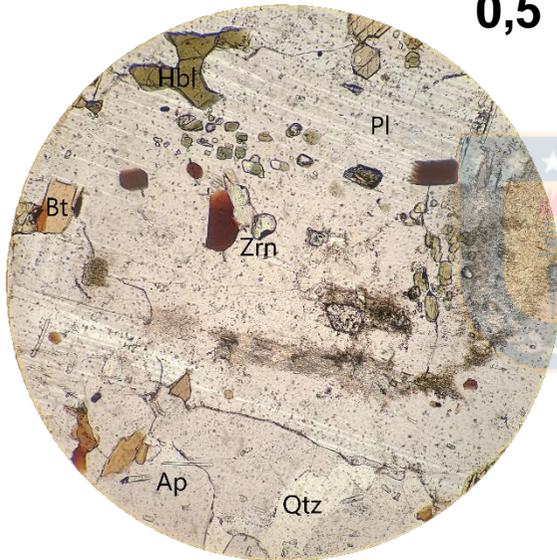
1 mm
0,5 mm



La sección presenta dos litologías. Una de ellas es la roca caja y la otra el dique que la intruye. La roca caja muestra en general una textura dimensional seriada heterométrica variante entre grano fino a grueso y puntualmente una textura poiquilítica. Mineralógicamente, está conformada por plagioclasa (48%) subidiomórfica de 0,2-5,0 mm las que comúnmente se observan en cristales adyacentes de distinto tamaño. Se le asocia una alteración a sericita de carácter leve que afecta principalmente a los cristales de menor tamaño. Cuarzo (26%) que se presenta como cristales anhedral de color blanco y aspecto limpio. Cúmulos de minerales máficos de biotita (16%) y anfíbol (9%) de hábito subhedral y tamaño de grano fino 0,1-1,0 mm. Por último, apatito (1%) como mineral accesorio asociado a plagioclasa y cuarzo.

LPP**NC**

1 mm
0,5 mm

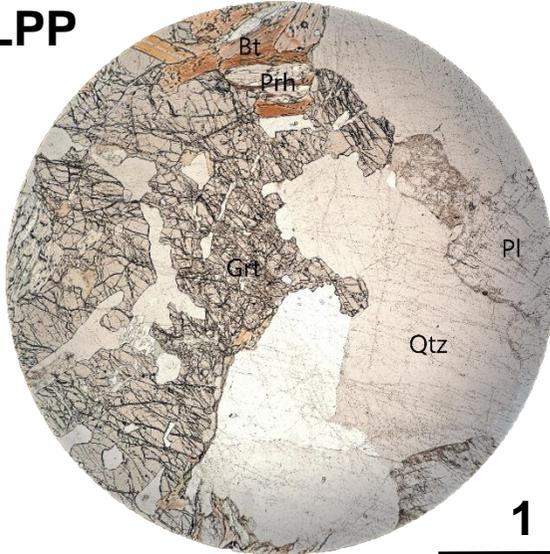


El dique exhibe una textura hipidiomórfica granular de grano fino con local desarrollo de una textura poiquilítica. Está compuesto por plagioclasa (46%) de hábito subhedral con un tamaño de grano entre 0,1-2,0 mm aunque solo dos cristales alcanzan el mayor tamaño; muy pocos cristales se encuentran alterados a sericita. Cuarzo (7%) se presenta como cristales anhedral relleno de espacios disponibles. Anfíbol (29%) mineral máfico predominante en la muestra posee un tamaño de grano entre 0,1-0,5 mm y hábito subhedral. Biotita (15%) de color pardo y hábito subhedral posee un tamaño de grano entre 0,1-0,5 mm. Como minerales accesorios se observan trazas de titanita (1%), apatito (1%) y zircón (1%).

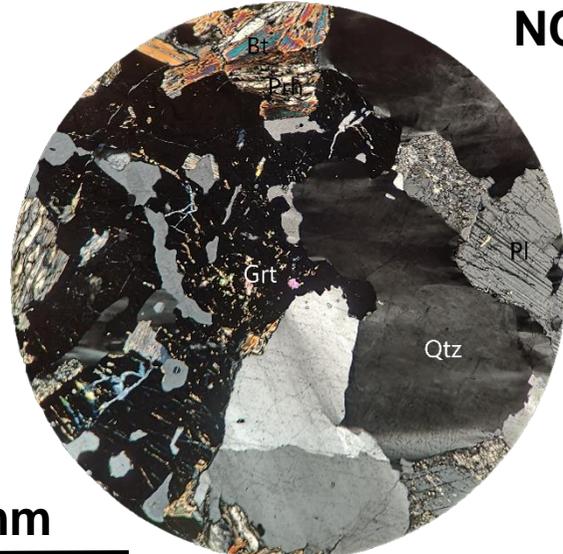
Muestra RLS-05

Clasificación: Tonalita de biotita y granate

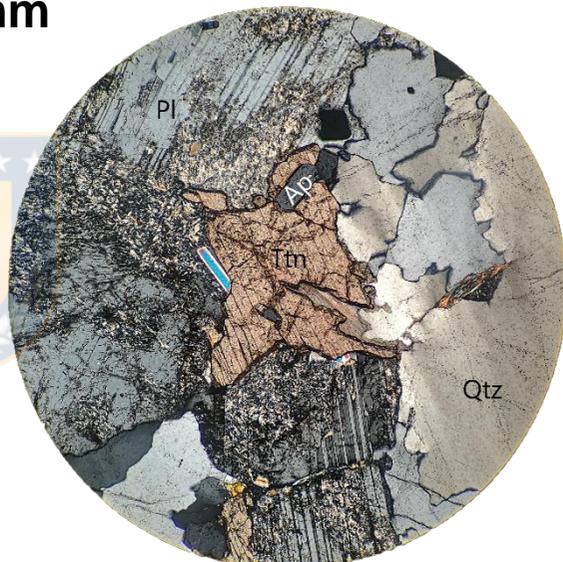
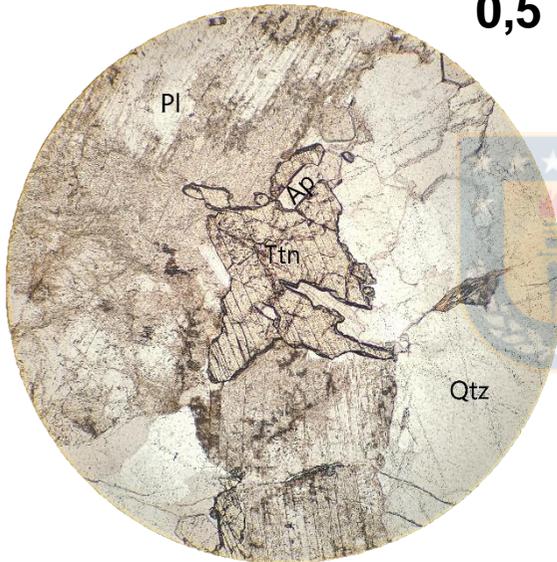
LPP



NC



1 mm
0,5 mm

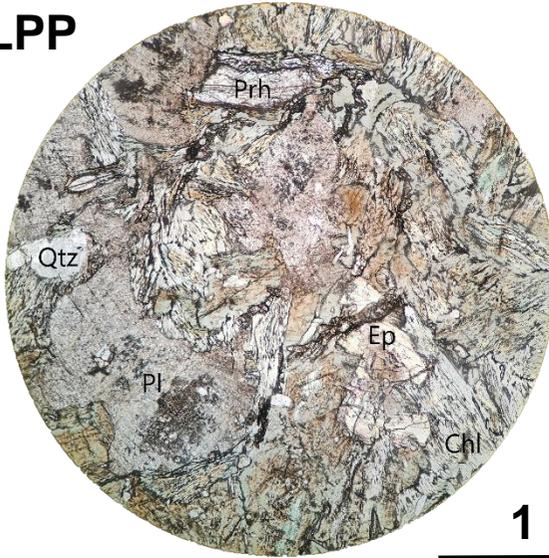


La muestra presenta una textura hipidiomórfica granular de grano medio a grueso. Su mineralogía está constituida por plagioclasa (40%) subidiomórfica de 5,0 mm de tamaño alterada de forma masiva a arcillas y sericita. Cuarzo (23%) alotriomórfico usualmente grueso > 3 mm. Biotita (18%) subidiomórfica comúnmente asociada a prehnita-pumpellyita (4%). Granate (9%) subidiomórfico correspondiente a un solo cristal fracturado de gran tamaño 1,5 cm. Trazas de calcita (3%), titanita (1%), apatito (1%) y zircón (1%) todos menores a 1 mm de tamaño.

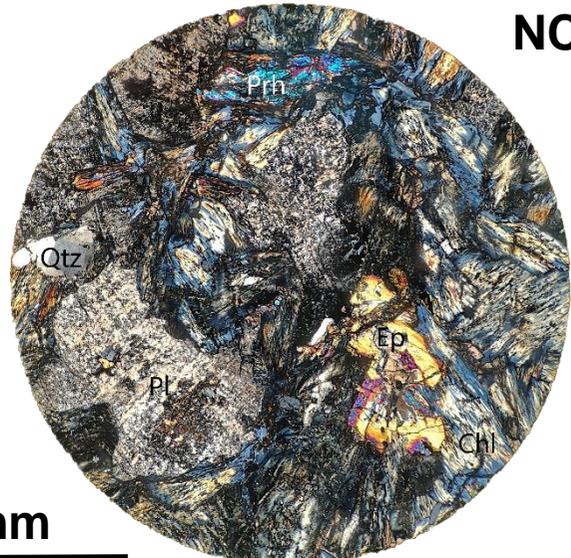
Muestra RLS-06

Clasificación: Tonalita de anfíbol y biotita

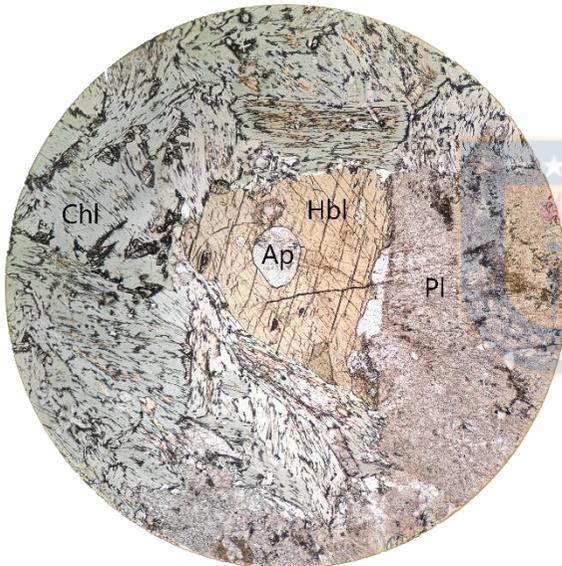
LPP



NC



1 mm

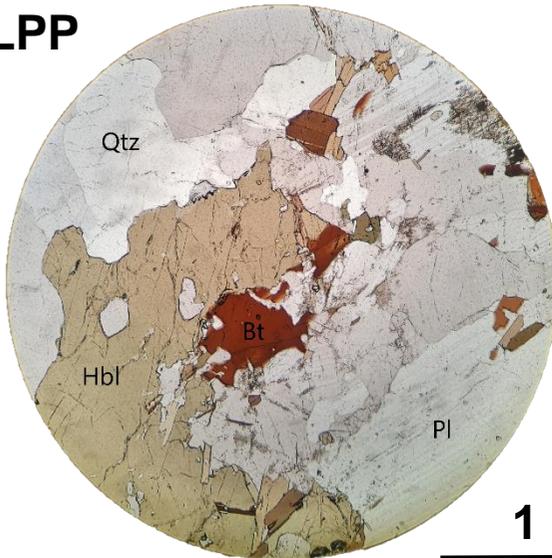


La sección exhibe una textura dimensional seriada variante entre grano fino a grueso. Mineralógicamente, se compone de plagioclasa (40%) subidiomórfica y tamaño de grano entre 1,0-4,0 mm que evidencia una alteración pervasiva de arcillas y sericita que afecta a casi la totalidad de los cristales. Cuarzo (12%) alotriomórfico de grano medio. Anfíbol (10%) subidiomórfico de 0,6-2,6 mm. Clorita (25%) subidiomórfica alterando completamente a biotitas; se dispone en agregados laminares de 0,8-1,6 mm. Epidota (3%) subidiomórfica de 0,2-0,8 mm asociada a clorita. Calcita (2%) restringida a un solo cristal de 1,5 mm de tamaño. Prehnita-pumpellita (5%) subidiomórfica de 0,4-2,0 mm en asociaciones con clorita y epidota. Por último, apatito (1%), titanita (1%) y zircón (1%) presentes como minerales accesorios. La ocurrencia de la asociación clorita-epidota-calcita en la muestra implica la acción de un fluido hidrotermal que provocó una alteración propilítica en la roca.

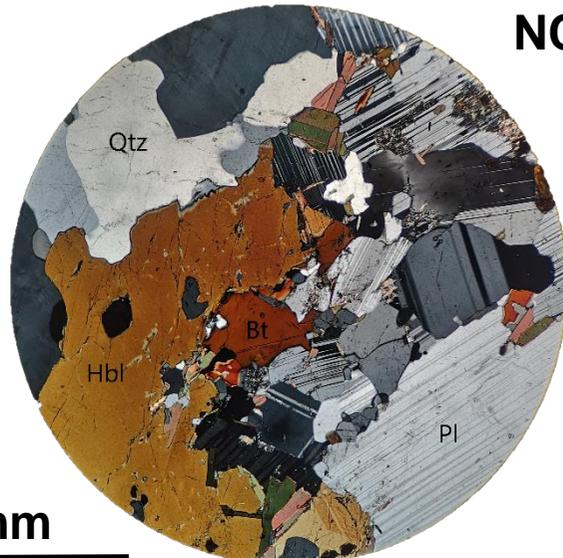
Muestra RLS-07T

Clasificación: Tonalita de anfíbol y biotita

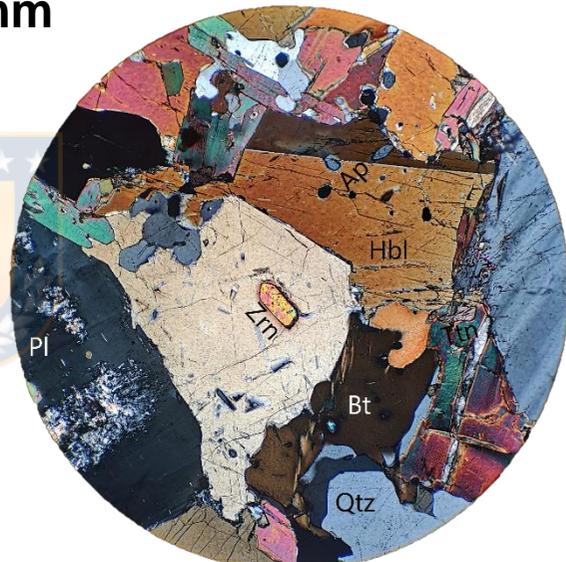
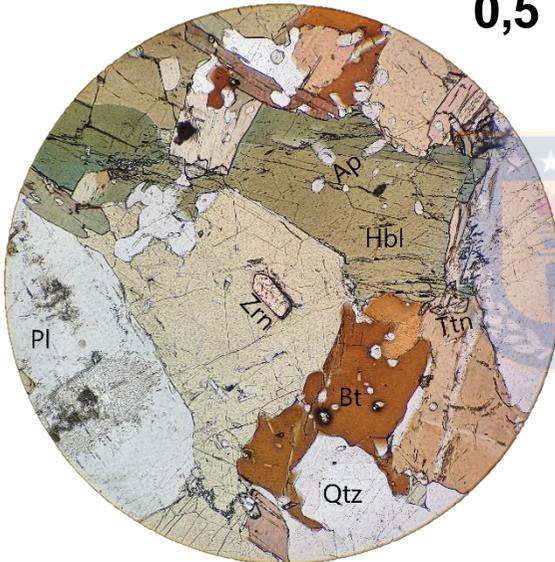
LPP



NC



1 mm
0,5 mm

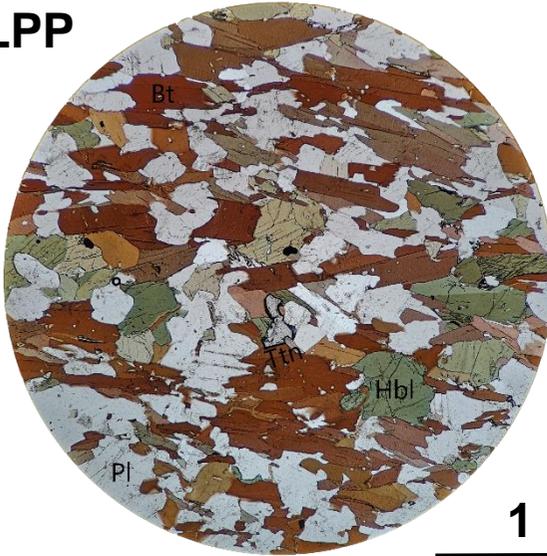


La sección muestra en general el desarrollo de una textura dimensional seriada variante entre grano fino a grueso y una textura mirmequítica puntualmente localizada. Su constitución mineralógica se compone de plagioclasa (54%) subidiomórfica de granulometría dispar entre 0,2-4,0 mm ligeramente alterada a arcilla y sericita. Cuarzo (17%) alotriomórfico relleno intersticios entre los cristales. Anfíbol (11%) subidiomórfico de tamaño diverso, en la que los cristales más grandes alcanzan 2,5 mm. Biotita (15%) subidiomórfica de menor dimensión que anfíbol no supera 1,5 mm. Apatito (1%), titanita (1%) y zircón (1%) como minerales accesorios comúnmente asociados a minerales máficos.

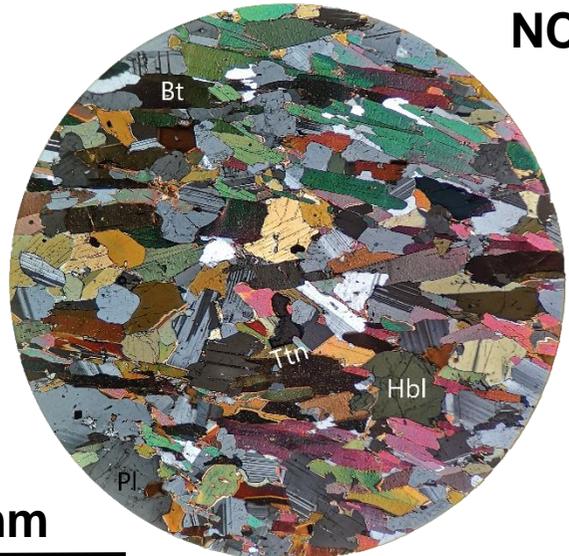
Muestra RLS-07B

Clasificación xenolito: Microdiorita de anfíbol y biotita

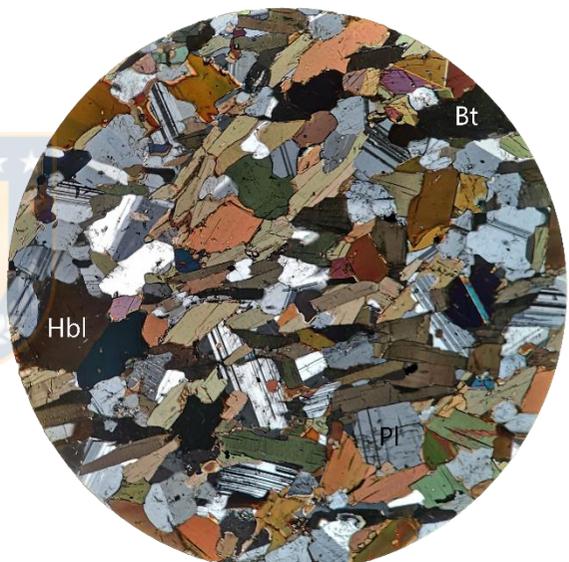
LPP



NC



1 mm

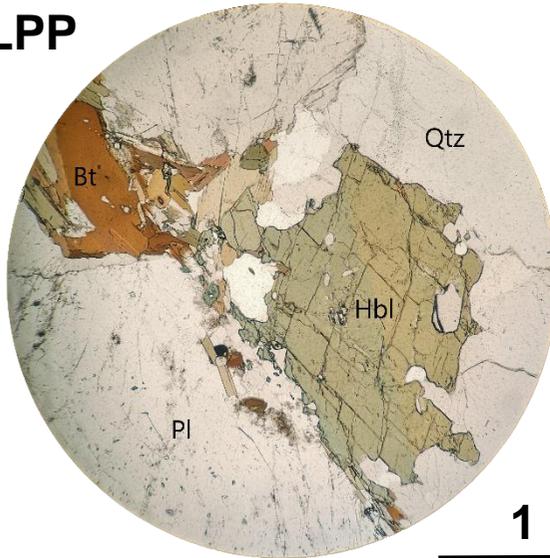


La muestra exhibe una textura hipidiomórfica granular de grano fino. Su mineralogía está conformada por cristales de plagioclasa (49%), biotita (30%) y anfíbol (19%) subidiomórficos de 0,6 mm de tamaño en promedio. Las plagioclasas presentan una leve alteración a arcilla y sericita. Por último, como minerales accesorios apatito (1%) y titanita (1%) de granulometría inferior a 0,1 mm.

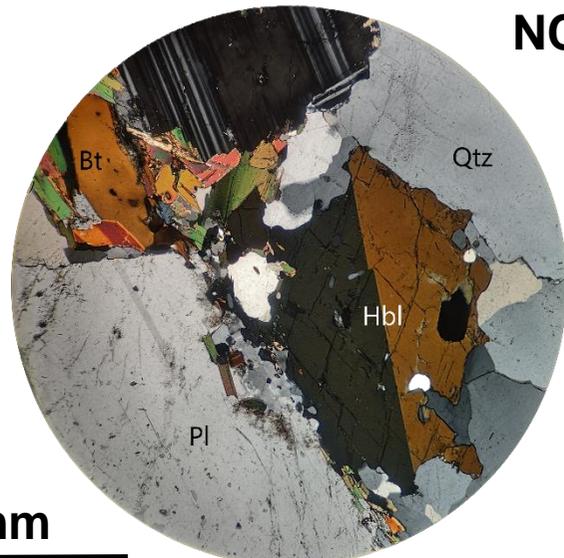
Muestra RLS-10

Clasificación: Tonalita de anfíbol y biotita

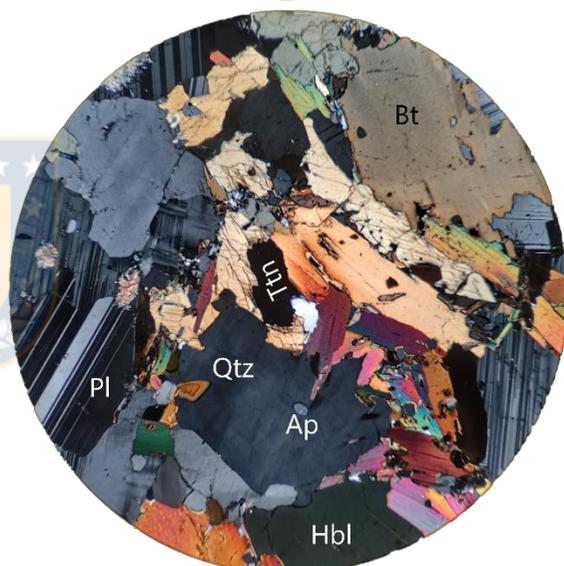
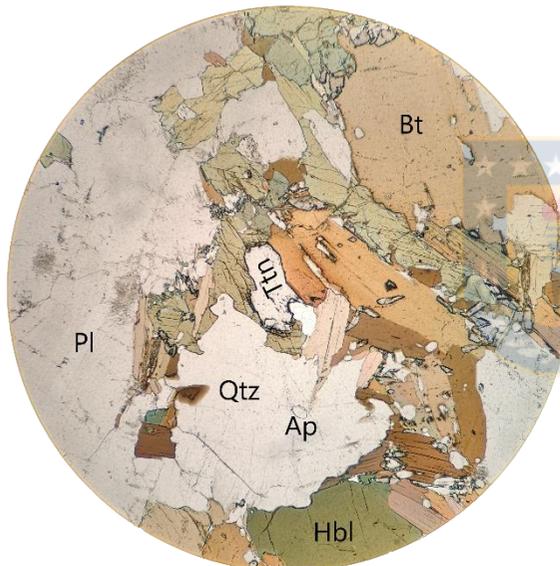
LPP



NC



1 mm

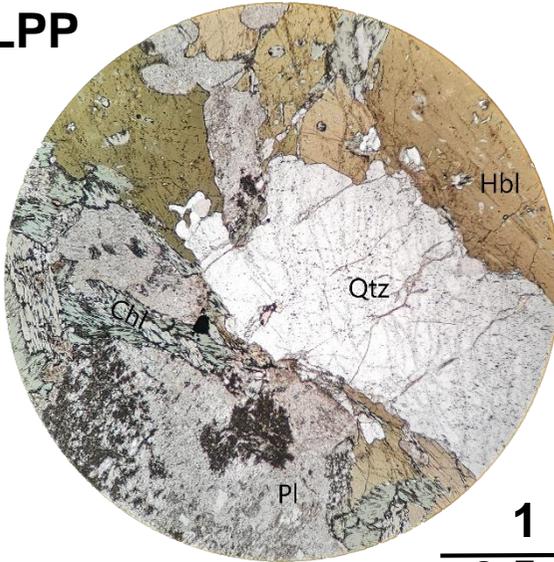


La roca muestra en general una textura dimensional seriada heterométrica variante entre grano fino a grueso y puntualmente una textura poiquilítica. Está constituida por plagioclasa (44%) subidiomórfica de diversos tamaños entre 0,2-6,0 mm aunque predominan los cristales gruesos. Se les sobrepone una leve alteración a sericita como resultado de la hidrólisis de plagioclasa. Cuarzo (28%) alotriomórfico en general de granulometría media a gruesa. Minerales máficos como anfíbol (12%) y biotita (13%) subidiomórficos. El anfíbol posee mayor tamaño 0,4-4,0 mm y 0,2-2,8 mm respectivamente. Apatito (1%), titanita (1%) y zircón (1%) como minerales accesorios comúnmente asociados a anfíbol y biotita.

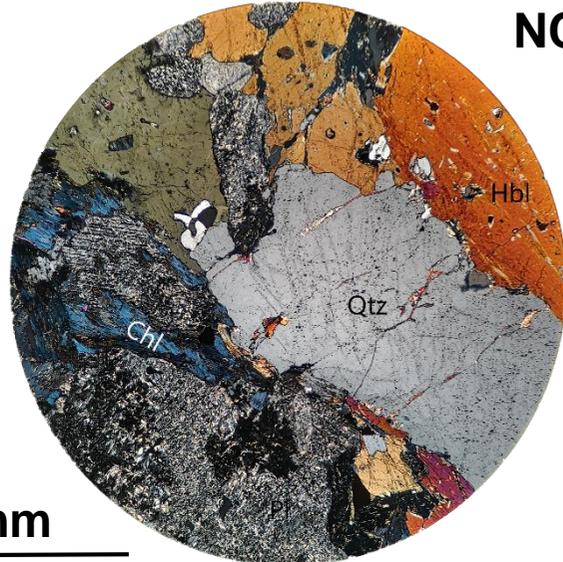
Muestra RLS-11

Clasificación: Tonalita de anfíbol

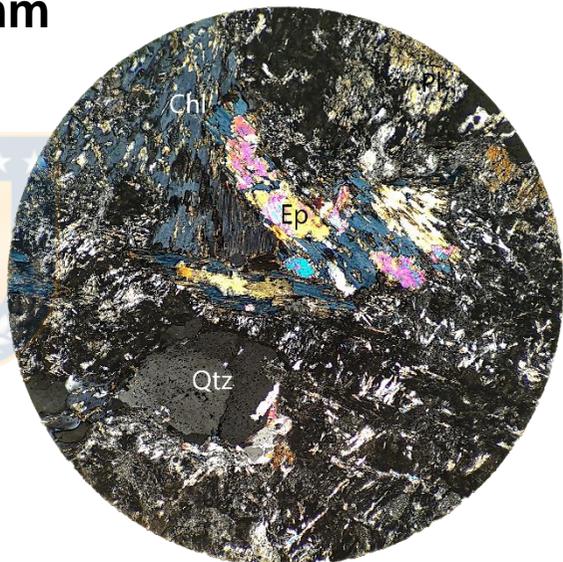
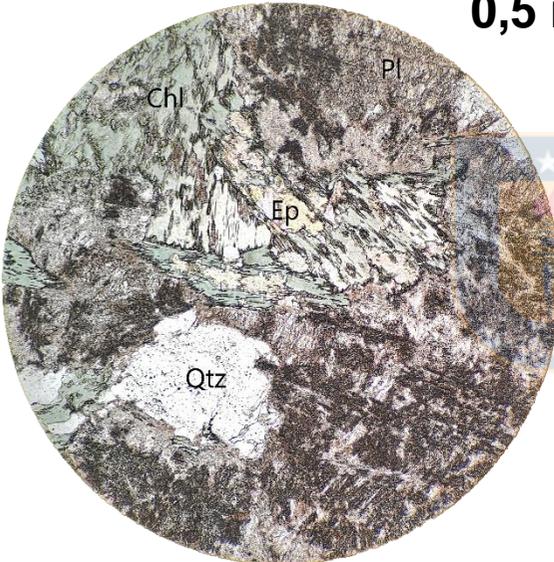
LPP



NC



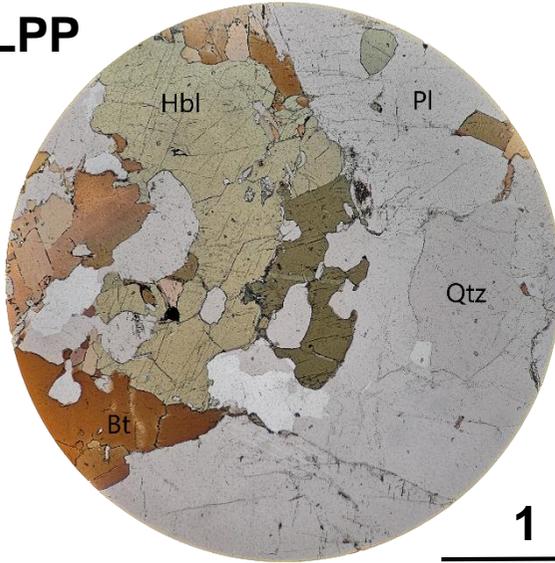
1 mm
0,5 mm



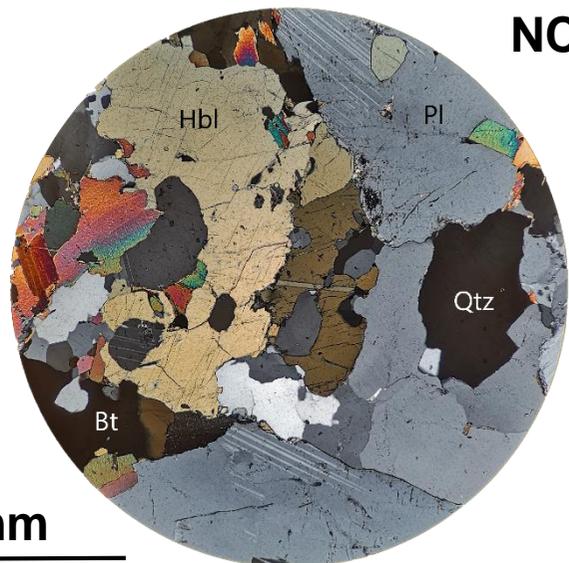
La roca presenta una textura dimensional seriada variante entre grano fino a grueso. Está conformada por plagioclasa (46%) subidiomórfica de granulometría variada 1,6-4,0 mm que evidencia una alteración a arcillas y sericita de carácter pervasivo. Cuarzo (22%) alotriomórfico usualmente de grano medio a grueso. Anfíbol (17%) subidiomórfico y tamaño de grano 0,6-2,6 mm sin alteración. Presencia de clorita (8%), epidota (2%) y calcita (2%) que sugieren la acción de un fluido hidrotermal que provocó una alteración propilitica. Trazas de muscovita (1%) observadas en una vetilla junto con calcita y minerales accesorios como apatito (1%) y zircón (1%).

Muestra RLS-15	Clasificación roca: Tonalita de anfíbol y biotita	Clasificación dique: Microdiorita de anfíbol y biotita
----------------	---	--

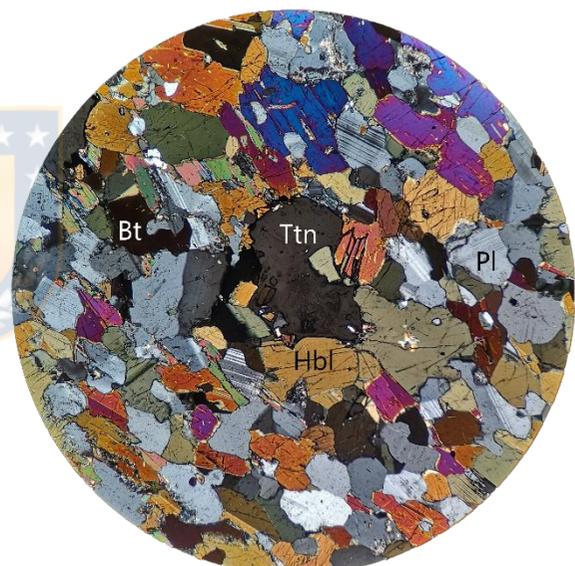
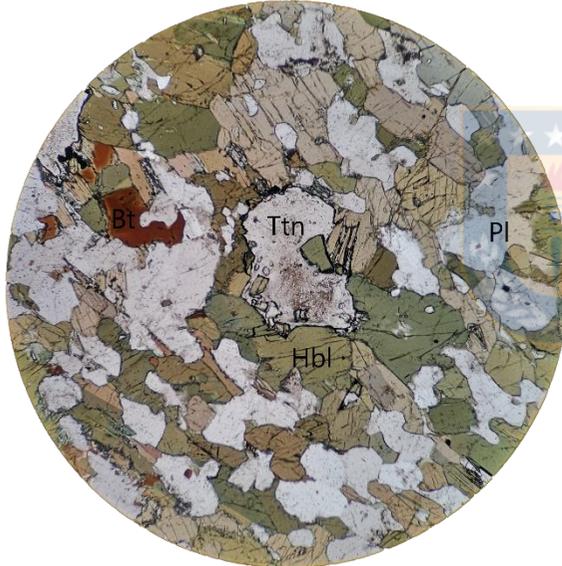
LPP



NC



1 mm

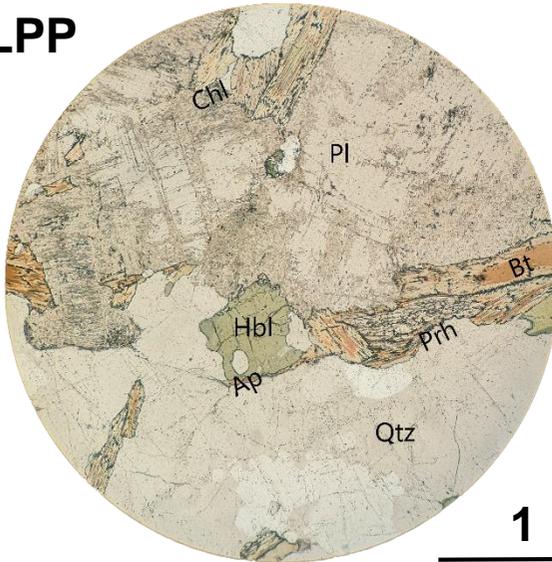


La sección presenta dos litologías; la roca caja y el dique que la intruye. La roca caja muestra en general una textura dimensional seriada heterométrica variante entre grano fino a grueso y puntualmente una textura poiquilítica. Mineralógicamente, se compone de plagioclasa (47%) subidiomórfica levemente alterada a arcillas y sericita y tamaño de grano 0,2-8,0 mm aunque solo un cristal alcanza el tamaño máximo. Cuarzo (18%) alotriomórfico de granulometría fina a media. Presencia de minerales máficos como anfíbol (24%) y biotita (8%) subidiomórficos. El anfíbol posee mayor tamaño 0,6-5,0 mm y 0,1-2,0 mm respectivamente. Apatito (1%), titanita (1%) y zircón (1%) como minerales accesorios. Por su parte el dique exhibe una textura hipidiomórfica granular de grano fino. Está conformado por cristales de plagioclasa (49%) subidiomórfica que en general miden 0,6 mm pero que algunos pueden ser de mayor tamaño (presencia de un cristal de 3,3 mm). Anfíbol (40%) subidiomórfico de 0,5 mm de tamaño. Biotita (8%) subidiomórfica de 0,2 mm. Por último, trazas de titanita (2%) y apatito (1%) como minerales accesorios.

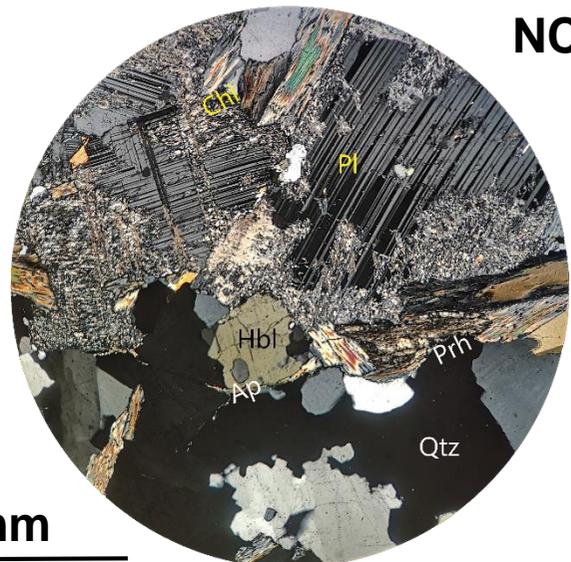
Muestra RLS-20

Clasificación: Tonalita de anfíbol y biotita

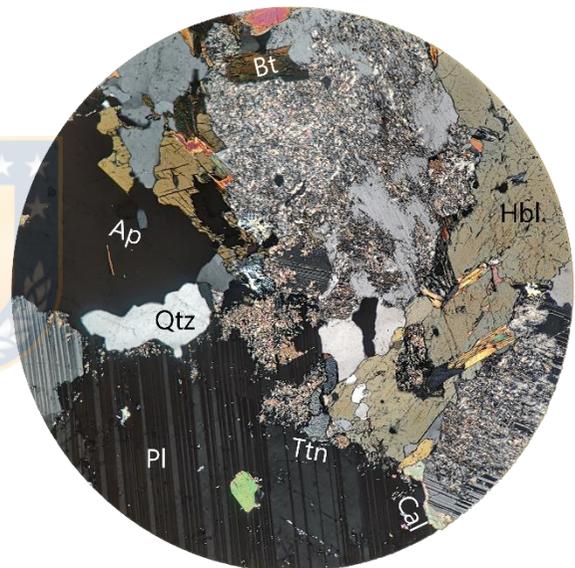
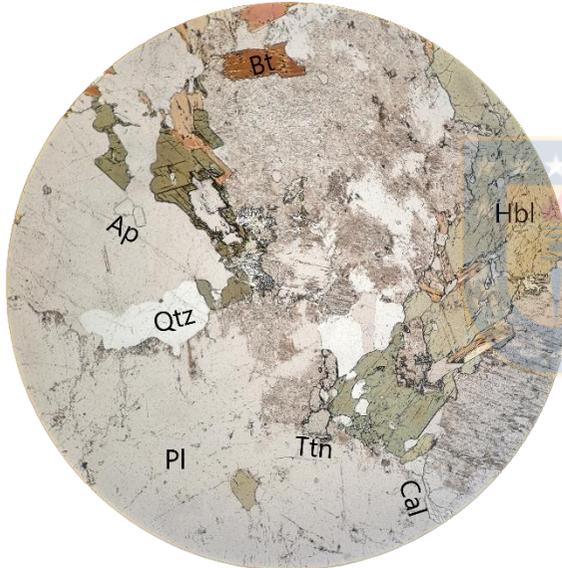
LPP



NC



1 mm



La sección exhibe una textura dimensional seriada variante entre grano fino a grueso. Su mineralogía está conformada por plagioclasa (46%) subidiomórfica de dimensiones variadas 0.5-8,0 mm aunque solo un cristal alcanza el tamaño máximo. Una densa masa de sericita y arcilla afecta de forma masiva a los cristales. Cuarzo (21%) alotriomórfico en general de granulometría gruesa como relleno de espacios. Biotita (15%) subidiomórfica dispuesta en agregados laminares no mayores a 1 mm siendo alteradas de manera que se observa en LPP escamas residuales de biotita marrón rodeadas de clorita verde pálida. Anfíbol (10%) subidiomórfico de mayor tamaño que biotita 0,1-3,6 mm; sus cristales no presentan signos de alteración. Prehnita-pumpellita (4%) asociada a biotita y de tamaño menor a 1 mm. Trazas de calcita (1%) y epidota (1%) que junto con la alteración a clorita de las biotitas siguieren la acción de una alteración propilitica de carácter leve. Por último, apatito (1%) y titanita (1%) presentes como minerales accesorios.