



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



**GEOLOGÍA Y METALOGÉNESIS DE LAS MINAS  
PRINCIPALES DEL DISTRITO MINERO EL TOQUI,  
REGIÓN DE AYSÉN, CHILE.**

**Memoria para optar al Título de Geólogo**

**Jorge Iván Correa Bravo**

**Profesor Patrocinante: Dra. Fernanda Carolina Álvarez Amado**

**Profesores Comisión: Prof. Ramiro Ulises Bonilla Parra  
Msc. Abraham Elías González Martínez**

**Concepción, 2018**



*A mi Amada Familia*

# ÍNDICE

	<b>Página</b>
<b>RESUMEN</b>	0
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>1.1 Generalidades</b>	1
<b>1.2 Objetivos</b>	1
<b>1.2.1. Objetivo General</b>	1
<b>1.2.2. Objetivos Específicos</b>	1
<b>1.3. Ubicación y Accesos</b>	2
<b>1.4. Clima</b>	4
<b>1.4.1. Clima Templado Frío con Máxima Invernal de Lluvias</b>	4
<b>1.4.2. Clima Continental Trasandino con Regeneración Estepárica</b>	5
<b>1.4.3. Clima de Hielo en Zonas de Altura</b>	5
<b>1.4.4. Clima de Estepa Fría</b>	6
<b>1.5. Hidrografía.</b>	7
<b>1.6. Agradecimientos</b>	9
<b>2. MARCO GEOLÓGICO DISTRITAL</b>	10
<b>2.1 Generalidades</b>	10
<b>2.2. Rocas Estratificadas</b>	12
<b>2.2.1. Formación Ibáñez.</b>	12
<b>2.2.2. Grupo Coyhaique</b>	13
2.2.2.1. Formación Toqui	14
2.2.2.2. Formación Katterfeld	19
2.2.2.3. Formación Apeleg	20
<b>2.2.3 Grupo Divisadero</b>	21
<b>2.2.4 Depósitos Glaciares y Fluvioglaciares</b>	22
<b>2.2.5 Depósitos No Consolidados</b>	23
<b>2. 3. Rocas Intrusivas</b>	23
<b>2.3.1 Pórfidos Andesíticos</b>	24
<b>2.3.2 Pórfido Andesítico de Anfíbol</b>	26
<b>2.3.3 Pórfido Diorítico</b>	27
<b>2.3.4. Pórfido Riolítico</b>	27
<b>2. 4. Geología Estructural del Distrito</b>	29
<b>3. METODOLOGÍA DE TRABAJO</b>	34
<b>3.1 Geología de Mina</b>	34
<b>3.1.1. Generalidades y Reseña Histórica de la Actividad Minera</b>	34
<b>3.2. Metodología de Trabajo</b>	37

<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE MINERALIZACIÓN DEL DISTRITO</b>	<b>43</b>
<b>4.1.</b>	<b>Generalidades Respecto de los Depósitos Tipo Skarn</b>	<b>43</b>
<b>4.2.</b>	<b>Sector Mina Aserradero</b>	<b>51</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Descripción General</b>	<b>51</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Análisis de los Procesos de Mineralización</b>	<b>54</b>
<b>4.3.</b>	<b>Sector Minas Profundas</b>	<b>63</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Descripción General</b>	<b>63</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Mina Profunda Norte</b>	<b>64</b>
<b>4.3.2.1</b>	<b>Análisis de los Procesos de Mineralización</b>	<b>65</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Mina Profunda 3</b>	<b>72</b>
<b>4.3.3.1</b>	<b>Análisis de los Procesos de Mineralización</b>	<b>73</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Sector Mina Profunda Oeste</b>	<b>81</b>
<b>4.3.4.1</b>	<b>Análisis de los Procesos de Mineralización</b>	<b>83</b>
<b>4.4.</b>	<b>Sector Mina Porvenir</b>	<b>89</b>
<b>4.4.1</b>	<b>Descripción General</b>	<b>89</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Análisis de los Procesos de Mineralización</b>	<b>92</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>104</b>
<b>6.</b>	<b>DISCUSIÓN</b>	<b>108</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>111</b>
<b>7.1.</b>	<b>Aspectos Litológicos y Mineralización de Mena y Alteración</b>	<b>111</b>
<b>7.2.</b>	<b>Aspectos Estructurales</b>	<b>113</b>
<b>7.3.</b>	<b>Propuestas de Trabajo</b>	<b>113</b>
	<b>REFERENCIAS</b>	<b>115</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1. 1.	Vías de Acceso Principales al Distrito El Toqui 3
1. 2.	Mapa Climático de la Región de Aysén 6
1. 3.	Cuencas Hidrográficas de la Región de Aysén 8
2. 1.	Mapa Geológico de la Región de Aysén 11
2. 2.	Mapa del Sector de Mina Profunda 3. Diques 25
2. 3.	Mapa Geológico Distrital 30
2. 4.	Mapa de Aserradero. Estructuras Asociadas a Mineralización 31
2. 5.	Mapa de Mina. Disposición de las Fallas de Primer Orden 32
3. 1.	Imagen Satelital del Distrito Toqui 35
3. 2.	Esquema de Muestreo Geoquímico por Niveles de Areniscas 38
3. 3.	Esquema de Muestreo por Barros de Perforación y Muestreo 39
4. 1.	Ambientes Geotectónicos de los Depósitos Tipo Skarn 44
4. 2.	Diagrama Relación $\text{SiO}_2$ vs $(\text{FeO Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})/\text{K}_2\text{O}$ 45
4. 3.	Etapas de Formación de los Depósitos Tipo Skarn 48
4. 4.	Mapa de Mina del Sector de Aserradero 53
4. 5.	Diagrama Temperatura de Homogenización-Salinidad 56
4. 6.	Gráfico Correlación de Pearson. Mina Aserradero Norte 59
4. 7.	Gráfico de la Correlación de Pearson. Mina Aserradero Sur 60
4. 8.	Mapa Sector Mina Aserradero. Fallas Principales Sectores N-S 62
4. 9.	Mapa de Mina del Sector Mina Profunda Norte 65
4. 10.	Gráfico Correlación de Pearson. Sector Mina Profunda Norte 67
4. 11.	Mapa Sector de Mina Profunda 3. Labores en Explotación 73
4. 12.	Diagrama Ternario de Composición de Piroxenos-Piroxenoides 76
4. 13.	Gráfico Correlación de Pearson. Sector Mina Profunda 3 79
4. 14.	Mapa de Mina Profunda Oeste. Labores y Estructuras 82
4. 15.	Gráfico Correlación de Pearson. Mina Profunda Oeste 87
4. 16.	Mapa del Sector Mina Profunda Oeste. Falla 8 88
4. 17.	Mapa de Mina Porvenir. Fallas Principales 91
4. 18.	Sector de Mina Porvenir. Detalle de Labores en Explotación 92
4. 19.	Gráfico Correlación de Pearson. Mina Porvenir 102
5. 1.	Columna Estratigráfica del Distrito El Toqui 104

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

<b>Fotografía</b>	<b>Página</b>
2. 1. Vista del Cerro Gemelos, Hacia el SW	26
2. 2. Cerro San Antonio. Unidad de Pórfido Riolítico	29
3. 1. Zona del Stock Pile del Distrito El Toqui	40
4. 1. Muestra de Roca de Mina Aserradero	57
4. 2. Mineralización de Mena y Alteración en Aserradero	61
4. 3. Muestra de Roca de Mina Profunda Norte	67
4. 4. Muestra de Roca de Mina Profunda Norte	68
4. 5. Muestra de Mina Profunda 3. Veta de Rodonita	75
4. 6. Muestra de Roca del Sector Mina Profunda 3 Sur	78
4. 7. Muestra de Roca del Sector de Mina Profunda Oeste	84
4. 8. Muestra de Roca del Sector Mina Profunda Oeste	85
4. 9. Muestra Plano de Falla Sector Mina Profunda Oeste	89
4. 10. Muestra de Roca de Mina Porvenir	93
4. 11. Muestra de Roca Mina Porvenir. Ilvaita y Anfíboles	94
4. 12. Muestra de Roca de Mina Porvenir. Granates	96
4. 13. Muestra de Mina Porvenir. Granates Masivos	98
4. 14. Muestra de Mina Porvenir. Mineralización Masiva	99
4. 15. Muestra de Porvenir. Marmatita Masiva	101

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
3. 1. Planilla Excel de Almacenamiento de los Muestreos Geoquímicos	42
4. 1. Interpretación de la Correlación de Pearson	51
4. 2. Promedio de Leyes de Sectores de Aserradero Norte y Aserradero Sur	58
4. 3. Datos de la Correlación de Pearson. Mina Aserradero Norte	58
4. 4. Datos de la Correlación de Pearson. Mina Aserradero Sur	60
4. 5. Datos de la Correlación de Pearson. Mina Profunda Norte	70
4. 6. Datos de la Correlación de Pearson. Mina Profunda 3	78
4. 7. Datos de la Correlación de Pearson. Mina Profunda Oeste	86
4. 8. Datos de la Correlación de Pearson. Mina Porvenir	101

## RESUMEN

Se presentan los aspectos geológicos, petrográficos y mineralógicos del Distrito Minero El Toqui, identificado como un depósito estratoligado de tipo skarn, dada la interacción de rocas hospedantes ricas en carbonatos con fluidos hidrotermales provenientes de cuerpos intrusivos, que generan un yacimiento rico en minerales calcosilicatados y una variada asociación de minerales de mena.

En este trabajo, enfocado en 5 zonas específicas del distrito, se entregan los antecedentes más importantes de cada área y los procesos involucrados en la formación de la mineralización metálica y de alteración presentes, estableciendo las diferencias existentes entre ellas.

A partir de los datos de muestreos geoquímicos y la correlación estadística realizada entre los diferentes elementos, se plantea la coexistencia de dos tipos de depósito dentro del distrito, que corresponden a un skarn de Zn-Pb y a un skarn de Au reducido, a partir de las clasificaciones recopiladas en la bibliografía, para este tipo de depósitos minerales.

Finalmente, se entregan las conclusiones y propuestas de trabajo a realizar dentro del distrito minero, como una forma de apoyar la búsqueda de nuevos recursos que permitan expandir la actividad económica de la zona de estudio.

## **1. INTRODUCCIÓN.**

### **1.1. Generalidades.**

El Distrito Minero El Toqui pertenece a la Sociedad Contractual Minera El Toqui (SCMET), y se encuentra ubicado a una distancia de 1.500 km al sur de la ciudad de Santiago y a unos 150 km al norte de la ciudad de Coyhaique, en el sector denominado Alto Mañihuales, en la XI región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. La propiedad minera cubre un área aproximada de 1.200 km<sup>2</sup>.

La mineralización del yacimiento se concentra en una secuencia estratificada de areniscas calcáreas de la Formación Toqui, de edad Cretácico Inferior, y, por argumentos petrográficos y mineralógicos, fue identificado por algunos autores como un yacimiento estratoligado de tipo skarn, dada la presencia de minerales calcosilicatados y asociación de sulfuros.

Este distrito minero constituye un importante centro de desarrollo económico y laboral para la región de Aysén y que, junto con el Distrito Fachinal, ubicado alrededor de 200 km al sur, cerca de la ciudad de Chile Chico, constituyen las 2 zonas mineras más importantes desarrolladas en esta zona del país en la actualidad.

### **1.2. Objetivos.**

#### **1.2.1. Objetivo General.**

Definir y caracterizar los modelos de mineralización y metalogénesis que se evidencian en el Distrito Minero El Toqui.

#### **1.2.2. Objetivos Específicos.**

- Caracterizar la geología, petrografía y mineralogía que se evidencian en el Distrito El Toqui, enfocándose en los sectores más importantes en producción.
- Establecer las diferencias geológicas entre los sectores analizados, las características de los fluidos hidrotermales provenientes de las fuentes magmáticas, la relación existente entre la



concentración de los elementos de importancia económica y la relación de las estructuras con los procesos de mineralización.

### **1.3. Ubicación y Accesos.**

El Distrito Minero Toqui se ubica en la región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, dentro del cuadrante formado por las coordenadas geográficas UTM 264.577 E – 5.011.186 N y 269.687 E- 5.007.062 N, a una distancia de 150 km al NW de la ciudad de Coyhaique y a alrededor de 1.530 km al sur de la ciudad de Santiago.

Las principales vías de acceso son por vía aérea, siendo el Aeropuerto de Balmaceda el terminal aéreo más importante en la región y, además, dos rutas terrestres principales que unen la zona con el resto del país.

Para acceder a la región de Aysén por medio terrestre, se utiliza la Ruta 7 o Carretera Austral y la Ruta 245 que conecta Balmaceda con Coyhaique y que proviene de territorio argentino, desde la Ruta 40.

El acceso terrestre al Distrito El Toqui se realiza desde la ciudad de Coyhaique por la Ruta 7, con dirección al norte, o Carretera Austral, y posteriormente al W a través de la ruta 240 que conecta la capital regional con Puerto Aysén, y que nace en el sector llamado Baguales, por medio de una bifurcación de la Carretera Austral.

La Ruta 7 continúa como camino de ripio, de regular estado, y que bordea el sector del valle Emperador Guillermo, hacia el sector de Villa Mañihuales.

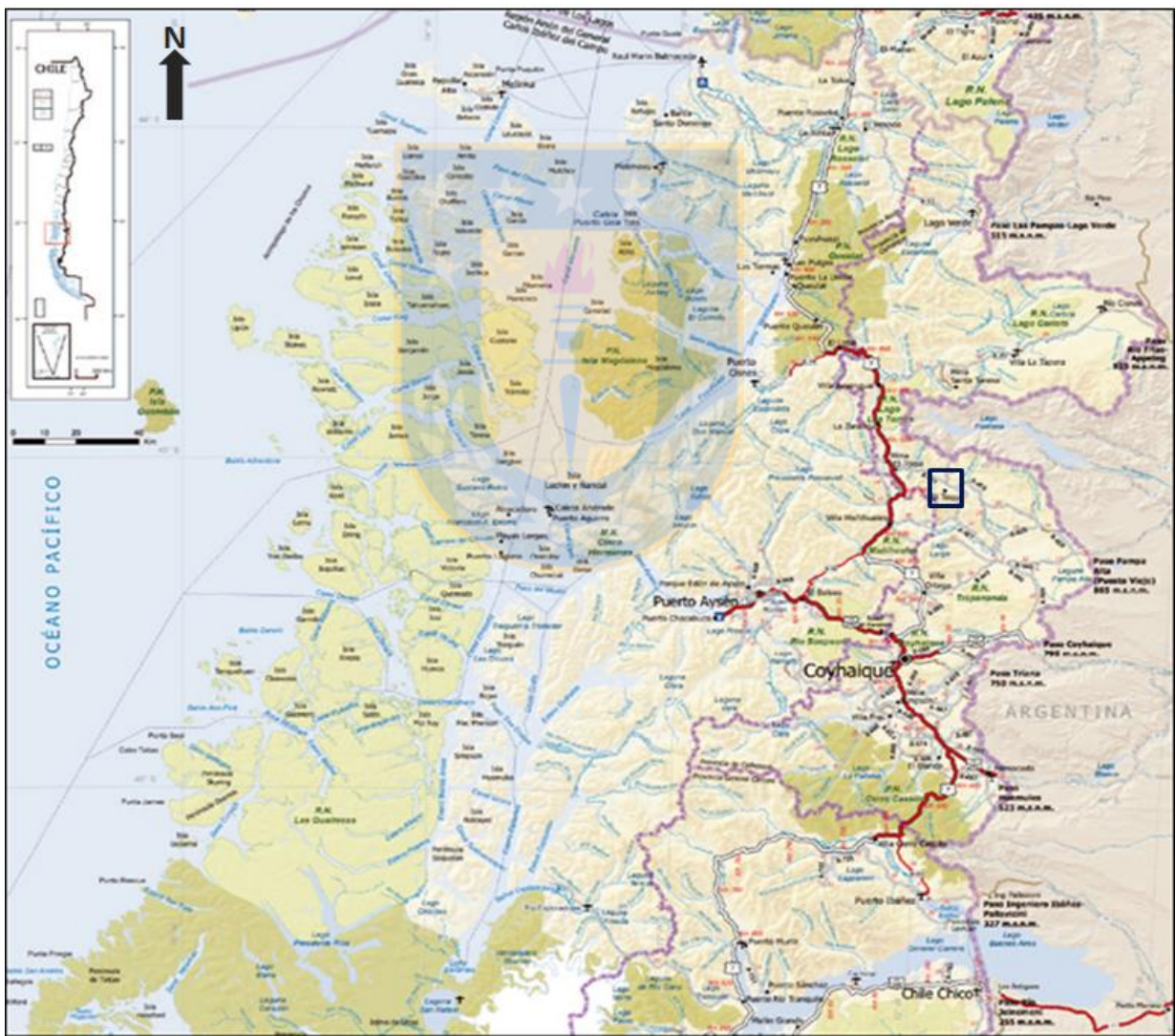
Por la Ruta 240, contigua a la cuenca del Río Simpson, se debe transitar hasta una bifurcación en el sector llamado Viviana, donde se enfila hacia el NE por la ruta X-50, por alrededor de 22 Kms, donde la vía vuelve a conectar con la Ruta 7 en el sector del puente Emperador Guillermo, para luego atravesar el pueblo de Villa Mañihuales.

Finalmente, la ruta 7 se intersecta con la ruta X-421, donde se accede al Distrito El Toqui, por un tramo de alrededor de 20 km, hasta llegar a la zona de estudio.

Otra forma de acceso a la zona es a través de la ruta internacional 240 que sale desde la ciudad de Coyhaique al este y, antes del paso fronterizo denominado Paso Coyhaique, enfilarse hacia el norte por la ruta X-565 hasta el pueblo de Baño Nuevo.

Luego, esta ruta se dirige hacia el W hacia la localidad de Ñirehuao desde donde se puede retomar la ruta X-421, descrita anteriormente, entrando hacia la zona de estudio por el acceso oriental de esta vía.

En la figura 1.1 se expone un mapa de la zona de estudio con los accesos terrestres principales.



**Figura 1.1:** Vías de acceso principales al Distrito El Toqui. Zona de estudio señalada en rectángulo de color negro. Región de Aysén. Carta Caminera del Ministerio de Obras Públicas de Chile, 2016.

Es importante señalar que algunas de las vías de acceso a la zona de estudio se encuentran bloqueadas durante los meses de invierno, debido a la cantidad de nieve que precipita, por lo que el acceso se realiza principalmente por las rutas más importantes, como la ruta 7 y X-421 en su parte occidental, que son mantenidas regularmente.

#### **1.4. Clima.**

Dentro de la región en estudio existe una geografía abrupta que permite la coexistencia de varios tipos de climas y que varían, en términos generales, según su cercanía al mar y zonas de canales y fiordos, disposición en la cordillera principal o en zonas ubicadas en el trasarco, hacia territorio argentino. Esto también se refleja en la pluviosidad y rangos de temperatura mínima y máximas que se presentan en las estaciones del año.

En el presente trabajo se considerarán cuatro tipos principales de clima que existen en la región de Aysén según la clasificación hecha por la Dirección Meteorológica de Chile.

##### **1.4.1. Clima Templado Frío con Máxima Invernal de Lluvias**

Se distribuye principalmente en la zona de los canales australes y la ladera occidental de la Cordillera Patagónica, con excepción de la zona de los Campos de Hielo.

Se caracteriza por las intensas precipitaciones que ocurren durante todo el año, siendo los meses de mayo a agosto los más lluviosos. Los totales anuales pueden alcanzar hasta los 4.000 mm, y estas precipitaciones son asociadas con vientos del noroeste y norte.

Las temperaturas disminuyen con la latitud, pero la influencia marina reforzada con la acción de los vientos causa que no haya valores excesivamente bajos. Las temperaturas medias de los meses más fríos bordean los 4°C, así mismo, las amplitudes térmicas no son muy elevadas.

Los altos valores de humedad atmosférica son manifestados por la influencia marítima y las altas precipitaciones. Predominio de gran cantidad de nubosidad durante todo el año.

#### **1.4.2. Clima Continental Trasandino con Regeneración Estepárica.**

Se dispone como una franja ubicada al E de la zona climática detallada anteriormente y se extiende desde el norte del río Cisnes hasta el extremo suroriental de la región de Aysén.

Este tipo de clima involucra una disminución importante en el régimen pluviométrico ya que las máximas precipitaciones que traen los sistemas frontales afectan la ladera occidental y zonas altas de la Cordillera Patagónica, las que actúan como una especie de barrera para la nubosidad que proviene desde el océano. Los totales anuales sólo llegan alrededor de los 1.200 mm en Coyhaique y a 700 mm en la ciudad de Cochrane, más al sur.

El periodo más lluvioso es de mayo a agosto, donde cae cerca del 50% del total anual. En la etapa invernal predominan bajas temperaturas, con poca amplitud térmica, llegando incluso hasta alrededor de los  $-15^{\circ}\text{C}$ , por lo que estas precipitaciones son principalmente nivosas.

En las estaciones de primavera y verano las amplitudes térmicas varían en forma importante e incluso las máximas en verano, principalmente fines de diciembre y enero alcanzan, incluso, sobre los  $25^{\circ}$  hasta más de  $30^{\circ}\text{C}$ .

Cabe destacar la gran cantidad de valles en esta zona que actúan como barreras climáticas frente a la nubosidad y la cantidad de precipitaciones que existen en zonas más occidentales y de los canales patagónicos.

#### **1.4.3. Clima de Hielo en Zonas de Altura.**

Corresponden a las zonas de los Campos de Hielo, ubicadas sobre la cota de los 800 m.s.n.m. Presenta pluviosidad muy alta, en especial en las laderas montañosas que descienden hacia el Pacífico o zona de los canales. También es afectada por fuertes vientos, lo que hace que las condiciones para el poblamiento sean prácticamente nulas.

Se infiere que las temperaturas medias deben ser inferiores a  $0^{\circ}\text{C}$  y que las temperaturas máximas medias superen los  $0^{\circ}\text{C}$  sólo en los meses de verano.

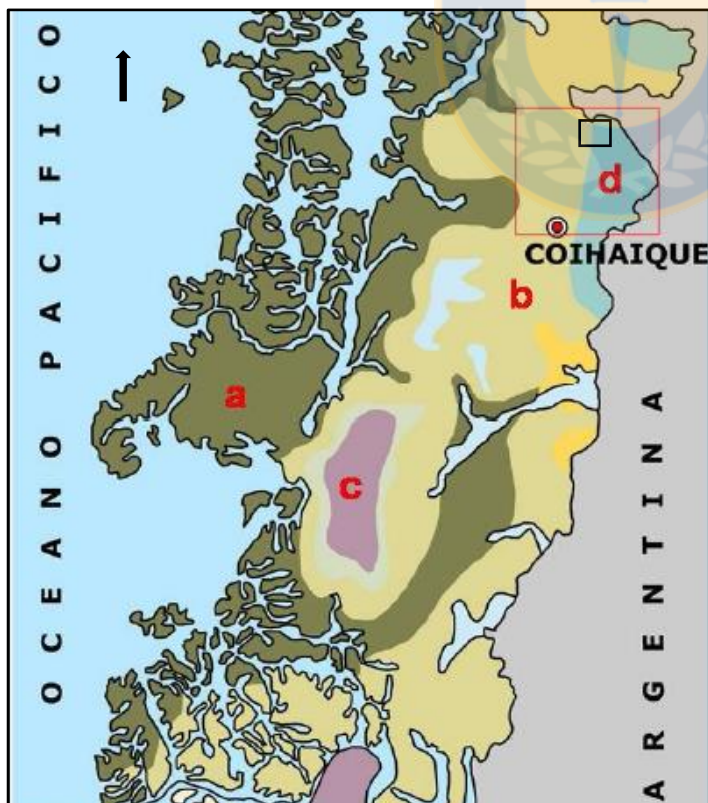
#### 1.4.4. Clima de Estepa Fría.

Abarca el sector más oriental de la región, adyacente a la frontera con Argentina, desde el río Cisnes hasta el sur de Cochrane y al oriente de la zona de clima trasandino con regeneración estepárica. Las precipitaciones presentan una disminución importante, incluso con algunos meses secos desde diciembre a marzo, y con totales mensuales de agua caída, inferiores a los 40 mm.

Este decrecimiento se manifiesta en el aumento en la fracción total anual que precipita en los cuatro meses más lluviosos (mayo a agosto), donde nuevamente cae entre el 55% y 62% del total anual.

Estas precipitaciones invernales son principalmente nivosas. Sin embargo, los vientos son abundantes y pueden alcanzar incluso, hasta más de 100 km/h. Coincide con zonas bajas de topografías suaves ubicadas en el trasarco.

Gráficamente, se detallan los climas principales presentes en la región de Aysén, en la figura 1.2.



**Figura 1.2: Mapa climático de la región de Aysén.** Se destacan los cuatro climas principales descritos A) Clima templado frío de costa occidental con máxima invernal de lluvias, B) Clima Continental trasandino con esteparia, C) Clima de hielo por efecto de la altura y D) clima de estepa fría. Zona de estudio indicada en recuadro negro. Tomado de Dirección Meteorológica de Chile, 2009.

## 1.5. Hidrografía.

Los ríos más importantes de esta región nacen en la vertiente oriental de la Cordillera Patagónica, escurriendo a través de ésta, hacia valles longitudinales y como drenajes de lagos contiguos a la cordillera. Poseen un caudal importante, respecto de otros ríos de otras zonas del país, debido a la importante alimentación pluviosa, glaciar y nivosa que éstos poseen. En su camino van confluyendo, alimentando y drenando lagos que se encuentran en sus cursos, a través de los diferentes elementos del relieve (Alfaro, 2012).

Existen 6 hoyas hidrográficas principales, las cuales son: Palena, Cisnes, Aysén, Baker, Bravo y Pascua.

La hoya del río Palena cubre un territorio de alrededor de 12.700 km<sup>2</sup>, de los cuales 4.670 km<sup>2</sup> se encuentran en esta región, correspondiendo a su parte media inferior. Los afluentes principales de este curso de agua son los ríos Tranquilo, Frío y Rosselot. Se ha estimado que el caudal medio de su curso principal es de 700 m<sup>3</sup>/seg (Fuente: Dirección General de Aguas, 2005)

El río Cisnes cubre un territorio aproximado de 5.050 km<sup>2</sup> y tiene un caudal medio de alrededor de 200 m<sup>3</sup>/seg. Los afluentes principales de éste corresponden a los ríos Cáceres, Pedregoso, Moro, Las Torres y Laguna Escondida.

Con respecto del río Aysén, éste cubre un área aproximada de 11.600 km<sup>2</sup>, y su curso principal presenta un caudal medio de alrededor de 510 m<sup>3</sup>/seg, siendo los ríos Simpson, Mañihuales y Blanco, sus afluentes principales.

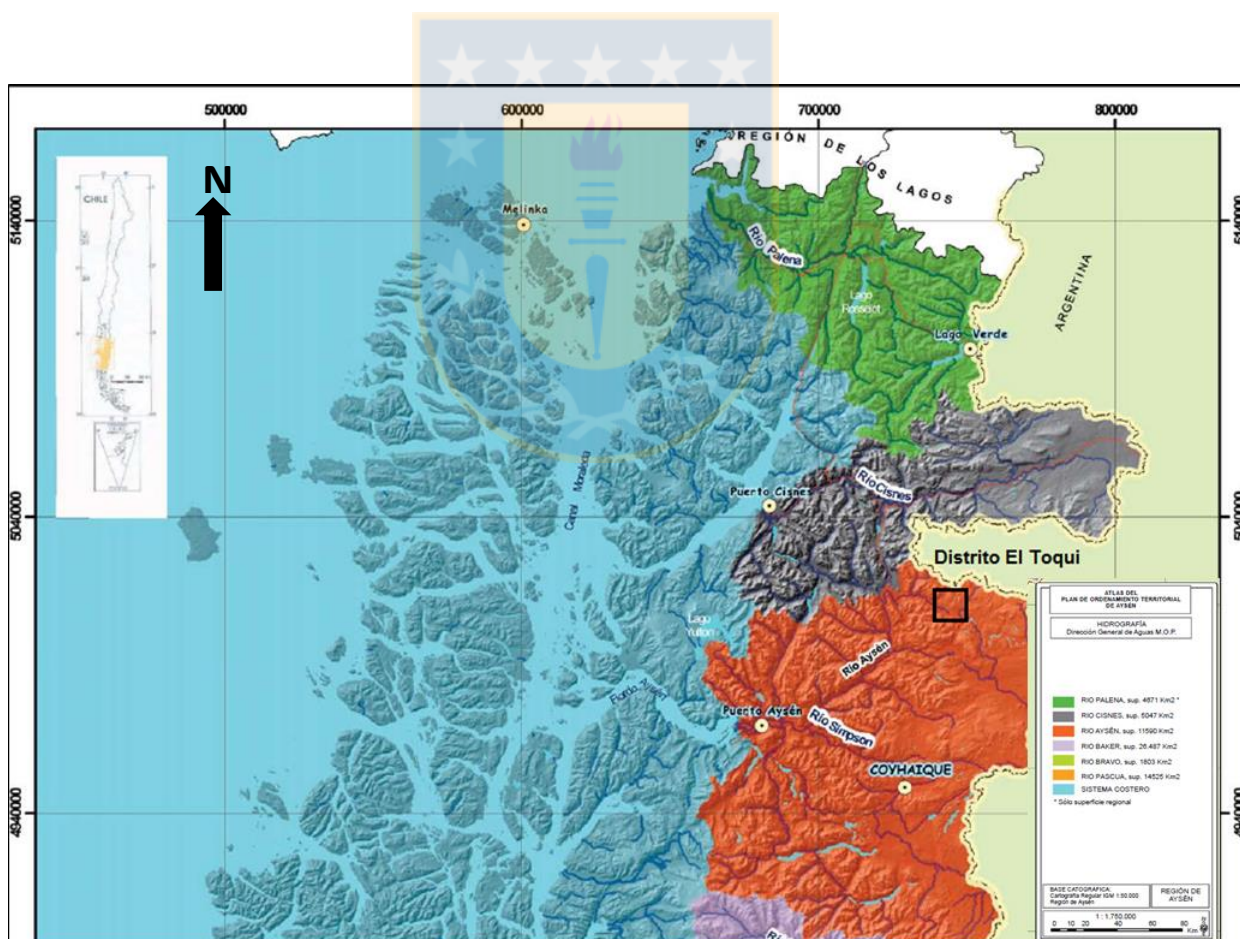
El río Baker es el elemento hidrográfico más importante de la región, drena una superficie de casi 26.500 km<sup>2</sup> y se ha estimado que su caudal aproximado es de 1.500 m<sup>3</sup>/seg en su desarrollo, lo que le otorga la categoría del río más caudaloso del país. Nace en el lago Bertrand, que corresponde a un desagüe del lago General Carrera, cuerpo lacustre más grande de Chile con alrededor de 1.050 km<sup>2</sup>.

Este curso de agua recorre 175 km hasta desembocar en el mar en la localidad de Caleta Tortel, hacia la zona occidental. Sus afluentes principales son los ríos Chacabuco, Cochrane, El Salto y Los Ñadis por el oriente; Nef, Colonia y Ventisqueros, por el occidente (Saavedra, 2009).

El río Bravo posee la hoya hidrográfica más pequeña de la lista entregada con alrededor de 1.800 km<sup>2</sup> y un caudal promedio de 150 m<sup>3</sup>/seg. Los afluentes más importantes son los ríos Desplayes, Año Nuevo y Del Camino.

Hacia el extremo sur de la región el río Pascua drena una cuenca de alrededor de 14.525 km<sup>2</sup>, de los cuales 7.150 km<sup>2</sup> corresponden a territorio nacional. Nace en el lago O'Higgins, en el extremo suroriental de la región. Tiene un recorrido de 63 km, desembocando, finalmente, en el Fiordo Steele, con un caudal medio estimado de 400 m<sup>3</sup>/seg (Alfaro, 2012).

En la figura 1.3 se muestran las principales cuencas hidrográficas de la región de Aysén, referidas a la zona de estudio, distribuidas de norte a sur y que conforman el sistema fluvial regional y que drenan los diferentes elementos del relieve presentes de norte a sur en esta zona del país.



**Figura 1.3:** Cuencas Hidrográficas de la Región de Aysén. Zona de estudio señalada en recuadro de color negro. Adaptado del Plan de Ordenamiento Territorial de la Dirección General de Aguas-Ministerio de Obras Públicas, 2005.

## 1.6. Agradecimientos.

A las personas con quienes trabajé en el Distrito Minero El Toqui, aportándome enseñanzas y conocimientos que intento plasmar en este trabajo. Además de humanidad y buenos mates compartidos. Del área de Geología Roberto, Sandra, Andrés, Juan Carlos Ramón y Juanito, Freddy, José Miguel, Luis Acevedo y Perico. De Operaciones Mina, Cristián Mansilla, Sr. Molina, Don David, Don Marco, Gastón y todo el equipo. De Ingeniería, Dámaso, Mauri, Ericks, don Máximo.

A mi profesora guía Fernanda y profesores de Comisión, además de mis docentes del Departamento de Ciencias de la Tierra, que me ayudaron en este camino personal y profesional, con sus enseñanzas, guías y correcciones, va mi agradecimiento sincero a todos. Recuerdo especial a usted profesor Leopoldo López-Escobar (Q.E.P.D), por sus conocimientos y humanidad.

Cristina, Fabián y Camila por ser mi familia que me ha amado, apoyado y por los cuales doy mi vida entera, Carlos y Sonia por no solo ser mis padres sino mi gran soporte en los momentos difíciles y por siempre creer en mi y en mi esfuerzo, guiándome y orientándome en cada momento y en cada decisión que he tomado. A Ramón y Cristina, como su yerno, por su afecto y apoyo brindado en nuestras vidas junto a Cristina y los niños.

Mis amigos de la Universidad y de la vida, Cristián Leal, Alvaro Merino, Alvaro Medina, Jorge Rivera, Felipe Vega, Verito Macaya, Nicolás Sartori, Gisela, Gisele, Karen (China), Rossy, Oscar Jeldres, Juan Carlos, Julio P-B, Meso, Mario Lagos, Mono y mis demás compañeros de generación. En especial a ti, mi amiga y hermana Cecilia Quilodrán.

Debo agradecer también a quienes hicieron grata mi estadia en Concepción, Sra. Norma, Sra. Antonia, Sr. Manhattan y a aquellos lugares misticos que con su ambiente y su música alegraron mis noches, Mal Paso, Martinez de Rozas, Neruda, Casa de Salud, Tia Tita, etc etc.

A mis hermanos del Metal, por la música, la amistad, el compañerismo y las risas brindadas, Miguel, Rodolfo, Rodrigo, Julio, Vicky, Moisés, RJ y otros.

A las personas y seres espirituales que partieron hacia otra dimension desde donde me han dado su energía para disfrutar los momentos felices de mi vida y afrontar los momentos difíciles, siempre en mis pensamientos y en mi corazón.



## **2.0. MARCO GEOLÓGICO DISTRITAL.**

### **2.1. Generalidades.**

En la zona de estudio se dispone una secuencia de rocas sedimentarias marinas y volcanoclásticas cuyas edades abarcan desde el Jurásico Superior al Cretácico Superior, según dataciones radiométricas y relaciones estratigráficas.

Las rocas más antiguas corresponden a un volcanismo de tipo intermedio-ácido que se extendió en un área considerable dentro de la región, desde fines del Jurásico Superior y que, posteriormente, producto de un proceso tectónico extensional, da lugar a una transgresión marina que se evidencia por un conjunto de depocentros donde se alternan depósitos sedimentarios marinos con aporte volcánico del arco contiguo y de otros procesos de depositación.

Posterior a la depositación de estas unidades sedimentarias marinas, se evidencian nuevamente depósitos volcánicos, de tipo ácido, que se extienden en gran parte de la zona de estudio y en otras zonas de la región.

Las rocas intrusivas que se disponen en el área de estudio comprenden diques andesíticos, brechas intrusivas del tipo peperita, que es una mezcla de lavas con sedimentos húmedos (Fisher, 1960), emplazados en la Formación Katterfeld, que tienen una edad estimada en alrededor de los 135 Ma (Aguirre-Ureta y otros, 2002, en Ianizzotto y otros, 2004), sills de composición riolítica que intruyen a las unidades de las formaciones Toqui y Katterfeld, datados en 120 Ma y, finalmente, se identifican en algunas zonas del distrito algunos sills dacíticos que afectan a estas mismas unidades y que fueron datados en 113 Ma, correspondientes al periodo comprendido entre el Aptiano y Albiano, pertenecientes al Cretácico Inferior.

A continuación en la figura 2.1 se muestra el mapa geológico general de la región de Aysén, mostrando las unidades litoestratigráficas y litológicas principales que afloran en este sector del país, y en donde se identifica la zona de estudio del presente trabajo.

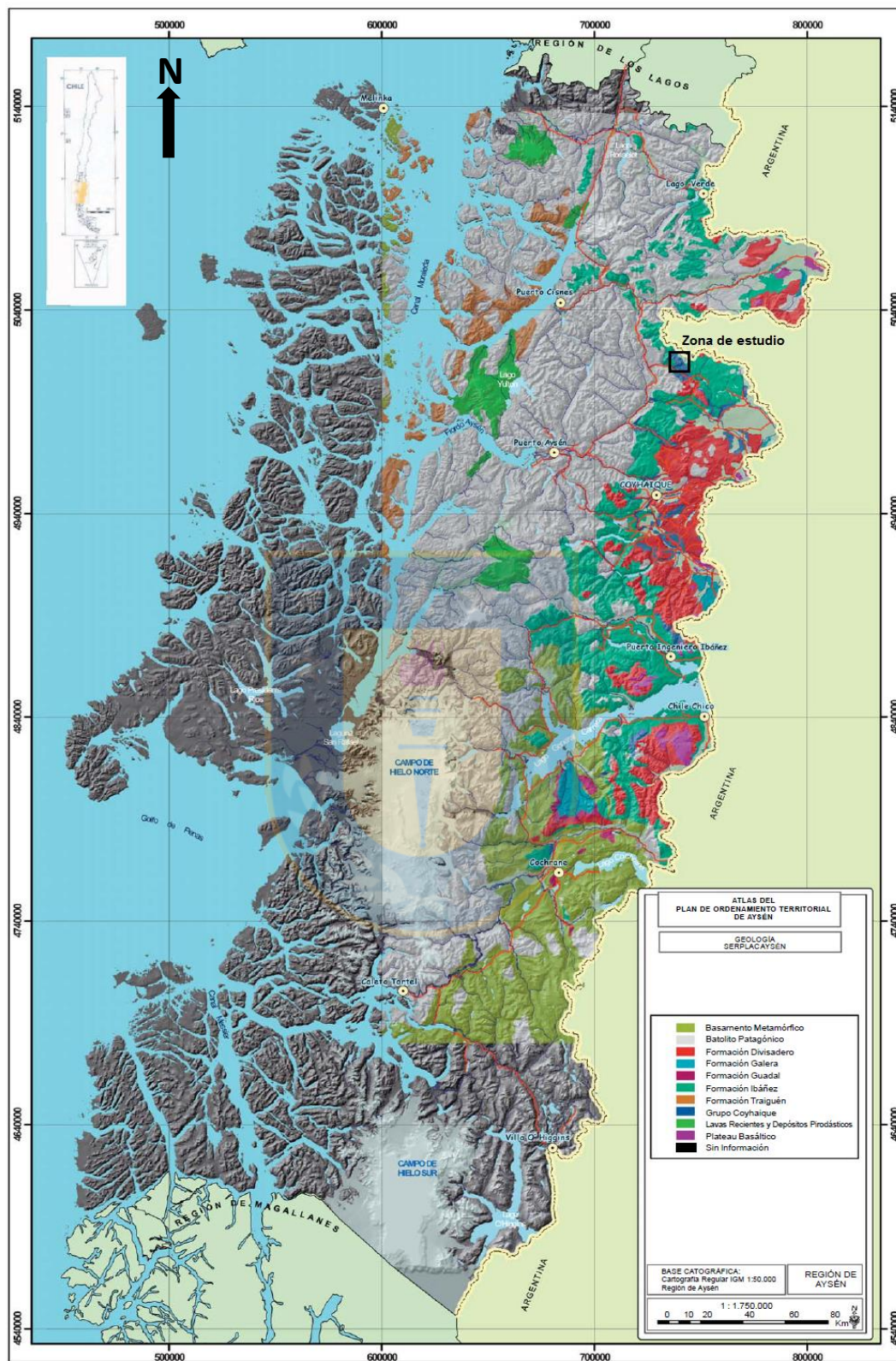


Figura 2.1: Mapa Geológico de la región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. Zona de estudio indicada en recuadro negro. Atlas región de Aysén, SERPLAC Aysén, 2005.

La edad de los intrusivos se sobrepone a la de la mineralización, la cual corresponde a: Re-Os de  $120 \pm 0,4$  Ma en molibdenita en Mallines-Cerro Elefantes,  $118 \pm 0,4$  en el área de Altazor y 110 Ma (Ar-Ar), en actinolita en el sector de Aserradero.

Se evidencian diques andesíticos de poco espesor que cortan la mineralización y que son interpretados como eventos post-mineralización.

En términos estructurales, la zona de estudio presenta plegamientos y manteos que bordean los  $25-30^\circ$  y las estructuras primarias más antiguas, presentan orientación WNW-SSE, y, en forma secundaria, estructuras más recientes de orientación ENE-SSW, que van conformando distintos graben en donde se van disponiendo las unidades litoestratigráficas.

## **2.2. Rocas Estratificadas.**

### **2.2.1. Formación Ibáñez.**

Unidad formal definida por Niemeyer (1975), formada por secuencias de rocas volcánicas, volcanoclásticas y, localmente, rocas sedimentarias marinas (Suárez y De la Cruz, 1997).

Subyace en forma concordante y/o en contacto de erosión, a las areniscas calcáreas de la Formación Toqui y, en otras zonas de la región, en contacto por paraconformidad, a las lutitas negras de la Formación Katterfeld. Además, subyace en discordancia de erosión y angular, a las unidades volcánicas del Grupo Divisadero.

Está compuesta principalmente por rocas piroclásticas de composición andesítica a riolítica, con alteración silícea pervasiva. También, está formada por lavas de composición andesítica, andesítico-basáltica y, en menor proporción, lavas de composición basáltica de tipo calcoalcalina (Suárez y De la Cruz, 2000; Quiroz, 2000; Quiroz y Bruce, 2010; Suárez y De la Cruz, 2001).

Este volcanismo estuvo principalmente asociado a procesos de subducción, sin embargo, según Suárez y De la Cruz (1994), esta formación fue sincrónica a un extenso volcanismo silíceo asociado a un proceso extensional de rifting desarrollado en la zona patagónica y que es precursor a la ruptura del Gondwana. Esta unidad litoestratigráfica se correlaciona con la Formación Lago La Plata, definida por Ramos (1976), en el lado argentino.

La edad relativa de esta unidad se puede estimar según las relaciones de contacto que presenta, y es post-Paleozoico y pre-Terciario. Las edades absolutas han sido obtenidas mediante dataciones K-Ar en biotitas en el área de Chile-Chico, que señalan una edad mínima probable de Jurásico Superior ( $145 \pm 3$ ,  $148 \pm 4$  y  $143 \pm 3$  Ma, en Suárez y De la Cruz, 1997), es decir, el rango Tithoniano-Berriasiano.

De forma casi sincrónica con este volcanismo, se produce un proceso de rifting que fue predecesor de un proceso de transgresión marina que produjo la sedimentación de las unidades marinas que sobreyacen a esta unidad litoestratigráfica.

Dentro del Distrito El Toqui, esta unidad constituye el límite inferior de la mineralización sulfurada que se distribuye en las rocas sedimentarias sobreyacentes. Se puede inferir que las características geoquímicas de estas rocas volcánicas no fueron favorables para la precipitación metálica.

### **2.2.2. Grupo Coyhaique.**

Definido por Haller y Lapido (1980), en la zona patagónica central. Agrupa a unidades sedimentarias siliciclásticas representativas de un ambiente marino contiguo a un arco volcánico, con variado contenido de material lítico más bioclastos de bivalvos, ammonites y peces.

Las variaciones granulométricas y contenido fosilífero representan una sucesión de eventos transgresivos y regresivos marinos, sumado a ambientes de cuencas someras-profundas (Suárez y De la Cruz, 1994), ocurridos desde fines del Jurásico Superior (Tithoniano), hasta fines del Cretácico Inferior (Hauteriviano Inferior).

Sobreyace en concordancia y, locamente en interdigitación, a las unidades volcánicas de la Formación Ibáñez y agrupa los depósitos sedimentarios de la Cuenca Aysén, formada por el proceso de rifting y transgresión marina diacrónica iniciada entre el Jurásico Superior e inicios del Cretácico Inferior.

Comprende a las unidades estratigráficas formales siguientes: Formación Toqui (Suárez y De la Cruz, 1994), Formación Katterfeld (Ramos, 1976), y la Formación Apeleg (Ploszkiewicz y Ramos, 1977).

A continuación, se describen las características más importantes de las unidades litoestratigráficas pertenecientes a este grupo.

### **2.2.2.1. Formación Toqui.**

Unidad litoestratigráfica definida por Suárez y De la Cruz (1994), y que agrupa a rocas sedimentarias marinas y volcanoclásticas. Se distribuye a lo largo de toda la zona de estudio y su localidad tipo se encuentra ubicada en la mina El Toqui, en el sector denominado Alto Mañihuales.

El reporte paleontológico del material faunístico efectuado por Tapia y otros (1984), identifica algunos restos como *Exogyra cf. Y Exogyra couloni* (DEFRANCE), basado en comparaciones taxonómicas con numerosas especies descritas para Chile y Argentina. Conviene destacar que *Exogyra couloni* (DEFRANCE), ha sido mencionada para el Neocomiano de la provincia de Neuquén y Mendoza en Argentina con un rango cronoestratigráfico variable entre el Tithoniano y Barremiano, aunque la especie posee una mayor distribución en el Valaginiano (Kakarieka, 2003).

Se describen a continuación, los miembros principales de la Formación Toqui, según los datos de terreno en el distrito, así como también los datos de sondajes recopilados. Ordenados de base a techo de la secuencia.

#### **A) Miembro Inferior o Areniscas Inferiores.**

Esta unidad litológica es denominada dentro del Distrito El Toqui como Areniscas Inferiores. Corresponden a una secuencia de hasta 15 m de potencia, de areniscas calcáreas, con fragmentos relictos de bioclastos indeterminados, las cuales presentan una alteración calcosilicatada, de tipo pervasiva, de anfíbol retrogrado (Actinolita-Tremolita), piroxenos ricos en Fe (wollastonita-hedenbergita), clorita, epidota, calcita.

La alteración es producto de un proceso de metamorfismo tipo skarn retrógrado (Meinert, 1992), que oblitera, casi por completo la matriz y bioclastos de las areniscas calcáreas de las rocas hospedantes y, producto de la interacción con aguas meteóricas y otros procesos fisicoquímicos, produce la precipitación de los metales desde la fuente.

La mineralización metálica se compone de marmatita, arsenopirita, pirrotina, electrum y oro nativo, cobaltita, bismutinita, calcopirita, sulfosales de Ag, localmente en la parte NW del yacimiento se evidencia rodonita, que se distribuyen en forma diseminada y como reemplazo de matriz y bioclastos relictos.

Respecto de la mineralización de Au, ésta es microscópica y asociada a sulfuros como marmatita, arsenopirita y cobaltita, además de minerales de alteración como anfíboles (actinolita), piroxenos ricos en Ca (wollastonita-hedenbergita), epidota, clorita, entre otros.

A lo largo de la secuencia se presentan niveles centimétricos de tobas fluidales de composición andesítico-dacítica y que se encuentran separados por distancias verticales de entre 0,3-1,20 m.

Esta unidad litoestratigráfica puede ser evidencia del inicio y desarrollo de una transgresión marina con interacción volcánica, en un ambiente marino somero, con abundante fauna de bivalvos y en un ambiente de energía baja a moderada, dada la presencia, en forma local, de conglomerados basales en la zona de contacto con la Formación Ibáñez.

Sobreyace en concordancia y, localmente, en discordancia de erosión, a las rocas volcánicas y volcanoclásticas de la Formación Ibáñez e infrayace en conformidad a la unidad de Pórfido Riolítico que se describe más adelante.

La edad relativa de esta unidad se puede estimar a partir de sus relaciones de contacto y por posición estratigráfica, dando una edad mínima Berriasiano Inferior y máxima Tithoniano Superior.

## **B) Miembro Calcáreo-Coquinoídeo o Manto Principal.**

Dentro del Distrito El Toqui, se denomina a esta unidad Manto Principal, y corresponde a una secuencia de areniscas calcáreas, en parte coquinoídeas, con bioclastos de *Gryphaea sp.*, y *Exogyra couloni* (Tapia, 1984, en Kakarieka, 2003), y otras especies indeterminadas.

Sobreyace en concordancia al pórfido riolítico e infrayace en concordancia al nivel de tobas bandeadas., que se describen más adelante.

Presenta una alteración pervasiva de piroxenos, granate cálcico y anfíboles. La mineralización metálica, comprende marmatita, pirrotina, pirita, arsenopirita, calcopirita y sulfosales de Ag, además de cantidades menores de cobaltita y bismutinita. Localmente se identificó ilvaita, rodonita y óxidos de Mn.

En algunas zonas de la mina se identifica pirrotina como el sulfuro predominante, como reemplazo selectivo de marmatita y, en algunas zonas, reemplazo total de la matriz por mineralización sulfurada.

Al igual que las areniscas inferiores, según datos de terreno, se identifican al menos 3 niveles, de entre 10 a 50 cm de espesor, de tobas de lapilli fluidales, que separan los niveles de areniscas calcáreas, e inciden en la mineralización, tanto en la cantidad de marmatita, como en la de pirrotina, constituyendo barreras geoquímicas para los fluidos mineralizadores y factores de cambios fisicoquímicos en la precipitación de metales asociados a la mineralización sulfurada.

La edad relativa de este miembro, según contenido faunístico, es Berriasiano Superior (Suarez y De la Cruz 1994).

### **C) Miembro Piroclástico o Tobas Bandeadas.**

Corresponde a una secuencia de tobas y tufitas de color gris claro, con importante silicificación y sericitización. Su potencia varía entre 1,0 a 3,0 m de potencia, según datos de terreno, con bandeamiento rítmico entre capas leucocráticas y mesocráticas. Sobreyace en concordancia al Manto Principal e infrayace en concordancia al Manto Superior.

Las secuencias volcanoclásticas habrían sido depositadas en un ambiente de arco volcánico cercano a la costa, producto de erupciones explosivas con abundante aporte de cenizas volcánicas, además de fragmentos de feldespatos y cuarzo, variando entre una composición andesítica a riolítica.

Presentan una mineralización metálica de marmatita, arsenopirita, pirita y pirrotina sólo restringida, a niveles centimétricos, a las zonas de contacto, en sus límites de base y techo de la secuencia, de esta unidad con los mantos de areniscas pertenecientes al Manto Principal y Manto Superior, producto de un halo de alteración de los fluidos mineralizadores que interactuaron con

las areniscas calcáreas, aun cuando estas unidades no concentran mineralización sulfurada en su parte central.

Como mineralización de alteración se evidencian clorita, calcita, epidota y sericita, en alternancia rítmica entre las capas de esta secuencia.

Debido a ello, esta unidad litoestratigráfica se considera como una barrera geoquímica para la mineralización sulfurada que afecta a las areniscas calcáreas.

La edad relativa de esta unidad puede ser correlacionada con la edad determinada para el Manto Principal, es decir, Berriasiano Superior a Valanginiano Inferior.

#### **D) Manto Superior.**

Corresponde a una secuencia de areniscas calcáreas fosilíferas, en parte coquinoideas, de hasta 0,8 m de potencia que se dispone sobre la toba bandeada e infrayace a la unidad de areniscas laminadas grises, suprayacentes.

Presenta una alteración de anfíbol, piroxeno, epidota y calcita secundaria que indica un proceso de skarnificación pervasiva, de tipo retrógrado, que afecta a las areniscas calcáreas.

La mineralización, en forma predominante, corresponde a marmatita, aunque en algunas zonas locales del yacimiento se evidencio un reemplazo casi total de marmatita por pirrotina, en menor cantidad, se evidencia calcopirita, arsenopirita y pirita.

La edad relativa de esta unidad puede definirse en el rango entre el Berriasiano Inferior-Valanginiano, por relaciones de contacto y por posición estratigráfica.

#### **E) Areniscas Laminadas Grises.**

Esta unidad se compone de una secuencia clástica de areniscas finas, con laminación paralela a la estratificación, que se disponen en forma concordante sobre las areniscas calcáreas del Manto Superior.



La potencia estimada para esta unidad es de 20-30 m, según datos de sondajes e interpretaciones de terreno.

Presenta mineralización local de pirita en forma diseminada y vetilleo polidireccional de calcita, lo que indica que la mineralización se produjo en un ambiente reductor diferente a las unidades subyacentes que componen mineralización principal del distrito.

La edad relativa de estas unidades puede determinarse por relaciones de contacto y correspondería a una edad mínima Berriasiano Superior-Valanginiano y máxima Valanginiano. Faltan estudios adicionales para determinar una edad absoluta, dada la carencia de estudios radiométricos en detalle.

#### **F) Tobas Cineríticas.**

Corresponde a una secuencia de tobas líticas y cineríticas, además de niveles centimétricos de areniscas medias, con abundantes líticos volcánicos, que se disponen en concordancia sobre la unidad de areniscas laminadas e infrayacen en discordancia angular o de erosión, a las unidades del Grupo Divisadero.

Son representativas de la transición de una cuenca marina profunda a una cuenca sedimentaria continental con importante aporte volcánico. No se observa mineralización metálica dentro de la unidad. En cuanto a procesos de alteración se evidencia silicificación y sericitización de la roca caja.

Según datos recopilados en diversos sondajes realizados, la potencia estimada de esta unidad litoestratigráfica varía entre 50-70 m.

Respecto de la edad relativa de esta unidad, puede ser inferida por relaciones de contacto o posición estratigráfica, dando como edad mínima en el rango Valanginiano-Hauteriviano.

#### **G) Areniscas Calcáreas Superiores o Manto Alto.**

Según la denominación litológica realizada en el distrito, corresponden a la unidad Manto Alto, y se componen de areniscas calcáreas fosilíferas con mineralización sulfurada. Se disponen en concordancia sobre las unidades de Tobas Cineríticas y Fluidales e infrayacen en concordancia a un nivel de tobas fluidales centimétrico que separa esta unidad de las lutitas de la Formación Katterfeld, descrita en el punto a continuación.

La mineralización metálica se compone, en orden de abundancia, de marmatita, pirrotina, pirita y calcopirita. La alteración se compone de anfíbol y piroxeno, mayoritariamente.

La edad relativa de esta unidad, por relación de contacto y posición estratigráfica, se asigna al Valanginiano Superior-Hauteriviano inferior, aun cuando faltan estudios para determinar su edad absoluta con mayor precisión.

Según Suárez y De la Cruz (2007), la Formación Toqui representa el inicio de la transgresión marina ocurrida a fines del Jurásico y comienzos del Cretácico Inferior. Se intercalan episodios volcánicos de importancia y movimientos importantes en la profundidad de la cuenca marina, dadas las variaciones granulométricas de los sedimentos.

Se interpretan como depósitos acumulados en las últimas etapas del rifting de edad Jurásica, por la existencia de la cuenca de transgresión marina y durante la etapa de subsidencia térmica post-rifting, por el contiguo arco volcánico activo.

#### **2.2.2.2. Formación Katterfeld.**

Sobreyace en conformidad a las unidades litoestratigráficas de la Formación Toqui y se compone de lutitas y areniscas finas, de alrededor de 150 m de potencia, que son indicadores de procesos de sedimentación en depocentros marinos profundos, debido a que presentan fósiles de bivalvos y ammonoideos, distribuidos en forma local. Estudios sedimentológicos indican que son indicadores de un ambiente de baja salinidad y baja energía de corrientes, dado el grado de conservación de los bioclastos y la matriz de arenisca fina (Ianizzotto y otros, 2004). Subyace en concordancia a la Formación Apeleg,

La edad relativa de esta unidad se asigna al Hauteriviano Superior, por relaciones de contacto y asociación faunística, adicional a ello, a partir de estudios isotópicos de  $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$  en bioclastos de *Gryphaea sp.*, que arrojaron una edad de 135 Ma (Olivero y Aguirre Urreta, 2002).

Dentro de la zona de estudio, y según datos de terreno, la Formación Katterfeld constituye una barrera geoquímica para la mineralización sulfurada de las unidades inferiores y solo presenta vetilleo local, incluso diseminado, de calcita y pirita local. No se observa mineralización de otros sulfuros.

### **2.2.2.3. Formación Apeleg.**

Esta unidad litoestratigráfica fue definida por Ploszwiewicz y Ramos (1977), como una secuencia marina fosilífera, compuesta por areniscas de grano medio y fino, de buena selección, de colores verdes y marrón, con laminación pelítica e intercalaciones de lutitas negras y gris oscuras en la base (Suárez y De la Cruz, 2000).

Sobreyace en conformidad, con evidencia de engranaje lateral, a la Formación Katterfeld y subyace en discordancia, localmente en forma transicional, a las unidades del Grupo Divisadero (Quiroz y Bruce, 2001). Su espesor relativo, según Suarez y De la Cruz (1994), varía entre los 35 y los 100 m, como señala Bell y otros (1994),

Su contenido faunístico permite asignarle una edad Hauteriviano-Aptiano Inferior (Suárez y de La Cruz, 1994).

Las sedimentitas de esta unidad corresponden a depósitos de una cuenca marina de tras-arco que se ubicaba al este del arco magmático representado, principalmente, por el Batolito Patagónico (Niemeyer y otros, 1984).

Se infiere, dadas las características litológicas de los depósitos, que hubo un cambio en las condiciones físicas de depositación y un aumento de la energía de las corrientes desde el Hauteriviano Medio al Aptiano Inferior, infiriendo el paso desde aguas profundas a una disminución de la profundidad del mar o un embahamiento hacia un océano más abierto de mayor

energía y capacidad de transporte de sedimentos más gruesos, evidenciada la presencia de intercalación de areniscas y fangolitas (Suarez y De la Cruz 1994).

Hacia el lado argentino, Ianizzotto y otros (2004), describen que estas unidades se componen de areniscas litorales correspondientes a una plataforma deltaica que progradó hacia el oeste, lateralmente hacia el este y hacia el tope de la secuencia pasa a facies continentales de planicies de inundación (González Bonorino y Suárez, 1995).

Según Aguirre-Ureta y Ramos (1981), existió un diacronismo (depositación sincrónica en diferentes lugares), de la regresión del mar cretácico inferior en estas latitudes, especialmente en el sentido norte a sur y también evidenciado en el sentido este-oeste.

Dentro de la zona de estudio, se identifica por sondajes exploratorios y, localmente, en partes altas de los cerros que rodean dicha zona, sin embargo, la cobertura vegetal impide ver con claridad las relaciones de contacto con el resto de las unidades litoestratigráficas.

### **2.2.3. Grupo Divisadero.**

Fue definido por Helm (1940, en Saavedra, 2009), y corresponde a una secuencia de rocas volcánicas y volcanoclásticas de composición andesítica a riolítica que tienen una amplia distribución geográfica dentro de la región de Aysén y Los Lagos, entre los 43° y los 47° de Latitud Sur, incluso hacia territorio argentino.

Haller y Lapido (1980), definen como grupo a estas secuencias volcanoclásticas de edad cretácica, que sobreyacen a las unidades volcanosedimentarias del Grupo Coyhaique, principalmente por su asociación de facies y amplia distribución geográfica.

Se ha determinado que el Grupo Divisadero tiene una potencia aproximada de entre 270 a 900 m (Wellmer y otros, 1983), y sus relaciones de contacto van desde una paraconformidad con las unidades de la Formación Ibáñez, sobreyace en posible conformidad con la Formación Apeleg, aunque no se ha evidenciado un contacto reconocido, y en discordancia con la Formación Galera (Espinoza y Fuenzalida, 1971), y las unidades terciarias que se encuentran al S de la ciudad de Coyhaique.

La edad relativa de esta unidad ha sido determinada por dataciones radiométricas en biotitas, correspondiendo al rango estratigráfico Aptiano, incluso hasta Cenomaniano (Suarez y otros, 1994), en el Cretácico Superior.

Dentro de la zona de estudio se reconoce esta unidad en las cumbres más altas que rodean el Distrito y no se ha determinado mineralización en campañas de exploración.

#### **2.2.4. Depósitos Glaciares y Fluvioglaciares.**

##### **A) Depósitos Glaciares y Morrénicos de Edad Pleistoceno.**

Corresponden a depósitos de gravas polimícticas de matriz arenas y limo. Constituyen terrazas de superficie ondulada y montículos elongados. Además, forman depósitos con estratificación plana gruesa y cruzada, con intercalaciones de arena y limo (Suárez y De la Cruz, 2000), característico de depósitos fluvioglaciares, morrenas laterales y formas curvas indicativas de morrenas frontales.

Según Suárez y De la Cruz (2000), se distinguen dos sistemas morrénicos expuestos en el sector oriental de la zona de estudio. Uno en la localidad de Río Norte, y el otro, algo más al sureste de la cuenca, en la localidad de Ñirehuao.

Se reconocen varios cordones morrénicos, separados y depósitos fluvioglaciares, particularmente en el valle del río Toqui, en las localidades de El Risco, Ñirehuao, El Machi y Santa Magdalena y que han sufrido erosión fluvial por parte del río y sus afluentes, circunscribiendo el valle hacia la zona occidental, específicamente hacia el valle del río Mañihuales y al sector de la laguna Pedro Aguirre Cerda.

Presentan formas de terraza y disposición sub-horizontal y su mayor extensión areal es en las cercanías de la localidad de Baño Nuevo, hacia la frontera con Argentina.

Según Suárez y De la Cruz (2007), la edad de los depósitos fluvioglaciares y glaciales de fondo ha sido asignada al Pleistoceno, debido al engrane lateral y la contemporaneidad con los depósitos morrénicos. Sin embargo, los glaciolacustres han sido asignados al Pleistoceno Superior, ya que representan a un periodo de desglaciación regional contemporánea a los sedimentos lacustres datados por  $C^{14}$  AMS en 15.300 años (Thon-That y otros, 1999 en Saavedra, 2009).

Son interpretados por Suárez y De la Cruz (2000), como sedimentos generados por las últimas lenguas glaciares o remanentes de ellas, cuando se retiraron los casquetes de hielo (Saavedra, 2009).

### **2.2.5. Depósitos No Consolidados.**

#### **A) Depósitos Fluviales y Deltaicos del Pleistoceno Superior.**

Los principales afloramientos se exponen aledaños al cauce del río Toqui, como amplias terrazas que rodean la ruta X-421. Estos depósitos engranan con sedimentos fluvioglaciares, débilmente compactados y en forma de terrazas, compuestos por grava, arena y limo.

En base a la relación con los depósitos glaciolacustres asignados a una edad cercana de 15.000 años, descritos en el punto 2.2.4, se les asigna a ambas unidades una edad máxima pleistocena superior tardía.

#### **B) Depósitos Fluviales y Aluviales del Pleistoceno-Holoceno.**

Los depósitos fluviales están compuestos por grava, arena, limo y arcilla que conforman terrazas elevadas y erosionadas, cubiertas en parte por vegetación. La actividad biológica que se desarrolló en este ambiente está representada por restos vegetales y de vertebrados, datados por  $C^{14}$  entre 12.000 y 13.500 años (Velásquez y Mena, 2006, en Suárez y De la Cruz, 2000)

### **2.3. Rocas Intrusivas.**

Los extensos afloramientos de unidades intrusivas en la región de Aysén están constituidas por granodioritas, granitos, tonalitas, monzonitas y en menor grado, gabros que tienen una amplia distribución geográfica. Son producto de la subducción de placa oceánica bajo la corteza continental dando un carácter calcoalcalino a la gran mayoría de estas rocas intrusivas.

Se distribuyen en una franja NS, desde los 40° que forma una verdadera columna vertebral de la Cordillera Patagónica en el sector occidental (Pankhurst y otros, 1994).

Dataciones radiométricas y relaciones de contacto por intrusión dan un rango estratigráfico amplio que va desde el Jurásico Superior al Mioceno (Niemeyer y otros, 1984).

Hacia el oeste, el Batolito intruye al Complejo Metamórfico de Chonos, de edad Paleozoico Superior, y hacia el Este, a unidades volcanosedimentarias mesozoicas y paleozoicas, además de contar con algunos cuerpos intrusivos menores que intruyen a unidades litológicas terciarias y recientes.

Los tipos petrográficos más abundantes, según investigaciones realizadas entre los 45°S y 47°S, corresponden a granitos, granodioritas y tonalitas.

Se describen a continuación, los principales cuerpos intrusivos que se disponen dentro del Distrito Toqui.

### **2.3.1. Pórfidos Andesíticos**

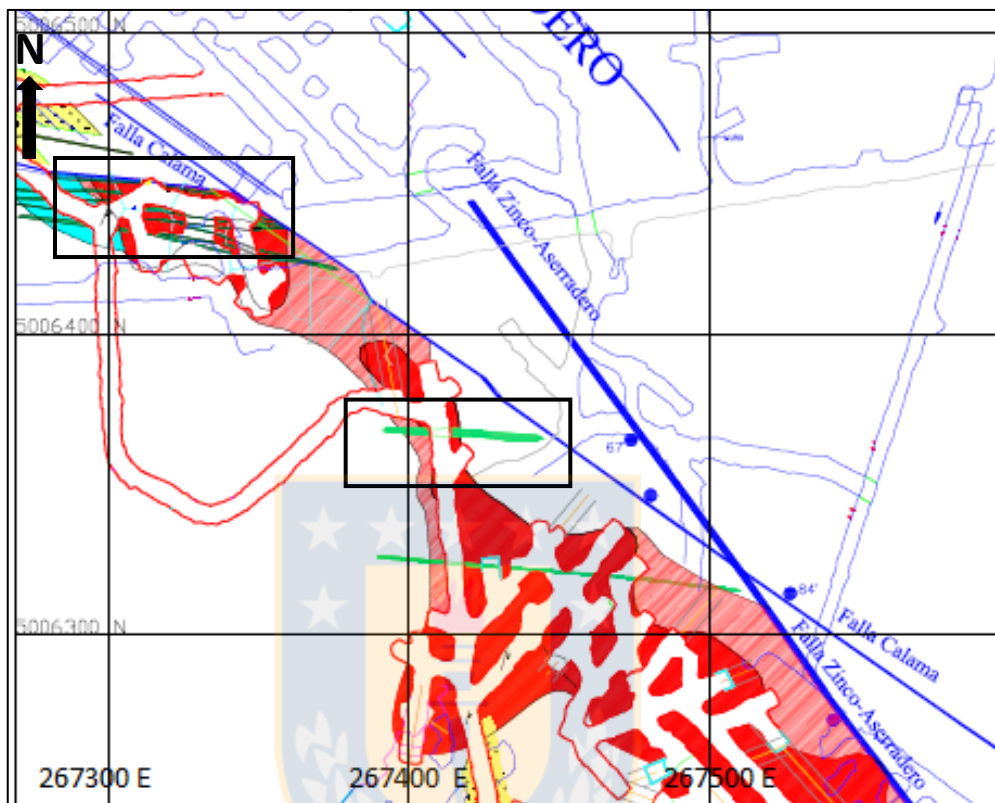
Estas rocas agrupan una serie de unidades intrusivas de composición gabro-diorítica, evidenciando texturas microcristalinas a porfídicas y un color verdoso.

Las alteraciones presentes son argilización, cloritización y hematización respectivamente.

Dentro de la masa fundamental microcristalina se observa alteración de clorita y epidota, dándole la tonalidad verdosa a las rocas de estas unidades intrusivas.

Se distribuye principalmente en la zona del túnel principal de acceso a la Mina Doña Rosa, y dentro de la mina, sobre todo en el sector de Mina Profunda 3, con numerosos afloramientos de rumbo ENE-WSW. En la zona exterior aflora formando el Cerro Gemelos.

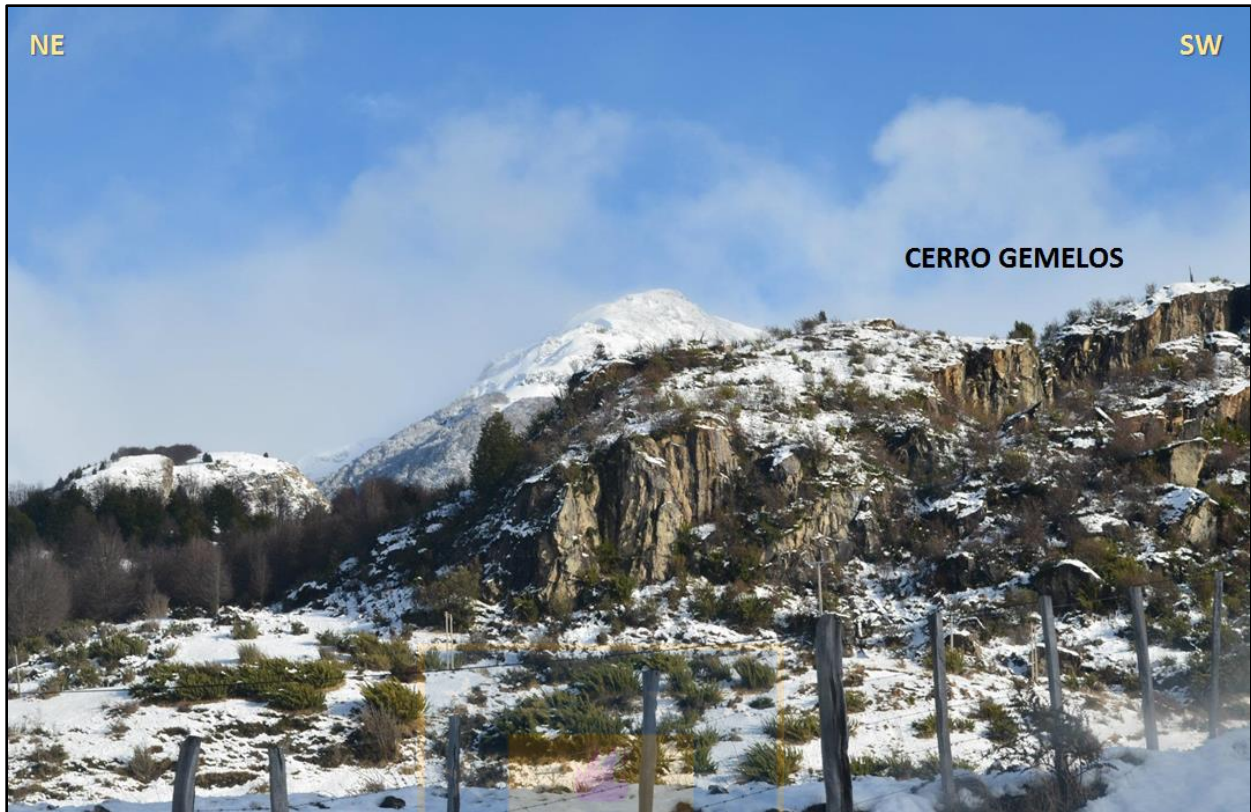
En la figura 2.2 se expone una parte de la zona de Mina Profunda 3 donde se ha evidenciado la existencia de estos pórfidos andesíticos en forma de diques, que cortan a las unidades litoestratigráficas del sector.



**Figura 2.2:** Sector de Mina Profunda 3. En línea verde se aprecia los diques basálticos-diorítico identificados en el sector en la parte NW y centro de la zona especificada. Tomado el Mapa geológico de Mina, 2012.

La fotografía 2.1 muestra la zona del Cerro Gemelos, donde aflora la unidad litológica en superficie.





**Fotografía 2.1.** Cerro Gemelos. Vista hacia el SE, formando un alto topográfico en los alrededores del distrito.

Faltan estudios de datación precisos para estos cuerpos intrusivos, sin embargo, observaciones de terreno evidencian que intruyen a las unidades de la Formación Ibáñez, las Areniscas Inferiores, el Manto Principal, e incluso, según describe Bussey y otros (2010), se evidencia que intruye hasta las unidades sedimentarias de la Formación Katterfeld no así al Pórfido Riolítico, por lo que puede inferirse que su edad mínima es Berriasiano Superior y, como edad máxima, el rango Aptiano-Albiano, edad mínima de depositación del Grupo Divisadero. No se observa mineralización metálica en estas unidades.

### **2.3.2. Pórfido Andesítico de Anfíbol.**

Corresponde a una roca de composición andesítico-dacítica de color verde claro con textura porfídica, en donde los fenocristales están constituidos mayoritariamente por anfíboles de hasta 2 cms de diámetro, además de cristales de plagioclasas más pequeños. Presenta una alteración

propilítica débil y argílica intermedia en las plagioclasas. Se distribuye al NE del Cerro San Antonio. No se observa mineralización metálica asociada.

### **2.3.3. Pórfido Diorítico.**

Corresponde a una roca de textura porfídica, con fenocristales de plagioclasas y anfíbol, que representan casi el 70% de la roca total. La masa fundamental consiste en microcristales de plagioclasas, piroxenos y anfíboles. A diferencia de los pórfidos anteriormente descritos, los stocks, sills y diques dioríticos muestran mineralización de pirita diseminada y localmente, pirrotina, calcopirita y esfalerita. La alteración presente en estas rocas es silicificación y epidotización

Según Palacios y otros (1996), la edad estimada de esta unidad es  $87 \pm 3$  Ma, a partir del análisis de una muestra fresca de diorita, dando un rango de datación Coniaciano-Santoniano, en el Cretácico Superior.

### **2.3.4. Pórfido Riolítico.**

Corresponde a un sill de textura porfídica, de características leucocráticas, de composición cuarzo feldespática, que tiene entre 10 a 120 m de potencia y se dispone concordante a la estratificación de las unidades de areniscas y rocas volcanoclásticas de la Formación Toqui, separando las areniscas del Miembro Inferior, de las areniscas calcáreas suprayacentes correspondientes al Manto Principal, tal como se evidencia por información de terreno y sondajes.

Se compone de una masa fundamental microcristalina de feldespatos, plagioclasas y cuarzo y fenocristales de cuarzo y, en menor grado, feldespatos subeuhedrales de hasta 6 mm de diámetro.

En zonas de contacto con las areniscas calcáreas, tanto en su base como en el techo, asociado a vetillas, presenta mineralización de blenda, marmatita, galena y en menor cantidad calcopirita, pero restringida a menos de 1 m de la zona de contacto de las unidades litológicas, tanto infrayacentes como suprayacentes, según observaciones de terreno.

Según datos de sondajes y evidencias de terreno, este pórfido intruye (aun cuando su base no se ha descrito en sondajes), en su parte inferior, al menos a las rocas volcánicas de la Formación Ibáñez y en su parte superior, a la parte basal del Grupo Divisadero.

Representa el ascenso de un magma muy diferenciado que se relacionaría con el volcanismo que rodeó la Cuenca Aysén y que, por factores tectónicos, ascendió hasta niveles superiores de la corteza en forma sincrónica con la depositación y diagénesis de las unidades sedimentarias, en ambiente profundo.

Lo anterior se expone a modo de hipótesis, dada la ausencia o casi nulas evidencias de aureolas de contacto en las unidades sedimentarias y volcanosedimentarias a las cuales este cuerpo rocoso intruye.

Sumado a lo anterior, se plantea la necesidad de estudios más profundos para determinar si este cuerpo intrusivo es una de las fuentes de la mineralización metálica del Distrito, considerando que intruye a las unidades sedimentarias y puede haber aportado fluidos hidrotermales responsables de los procesos de metalogénesis ocurridos en la zona en estudio.

Una muestra recolectada y analizada en el Cerro San Antonio arroja una edad de  $108 \pm 3$  Ma (Palacios y otros, 1996), aun cuando, y como se detalla anteriormente, se ha evidenciado en zonas fuera del área de estudio, que el pórfido riolítico intruye a las unidades del Grupo Divisadero, dando una edad mínima en el Albiano (Suarez y otros, 1994).

En la fotografía 2.2, se muestra al Cerro San Antonio, el cual representa un afloramiento en forma de domo del Pórfido Riolítico, y tiene una altura de 300 m sobre el valle del río Toqui.

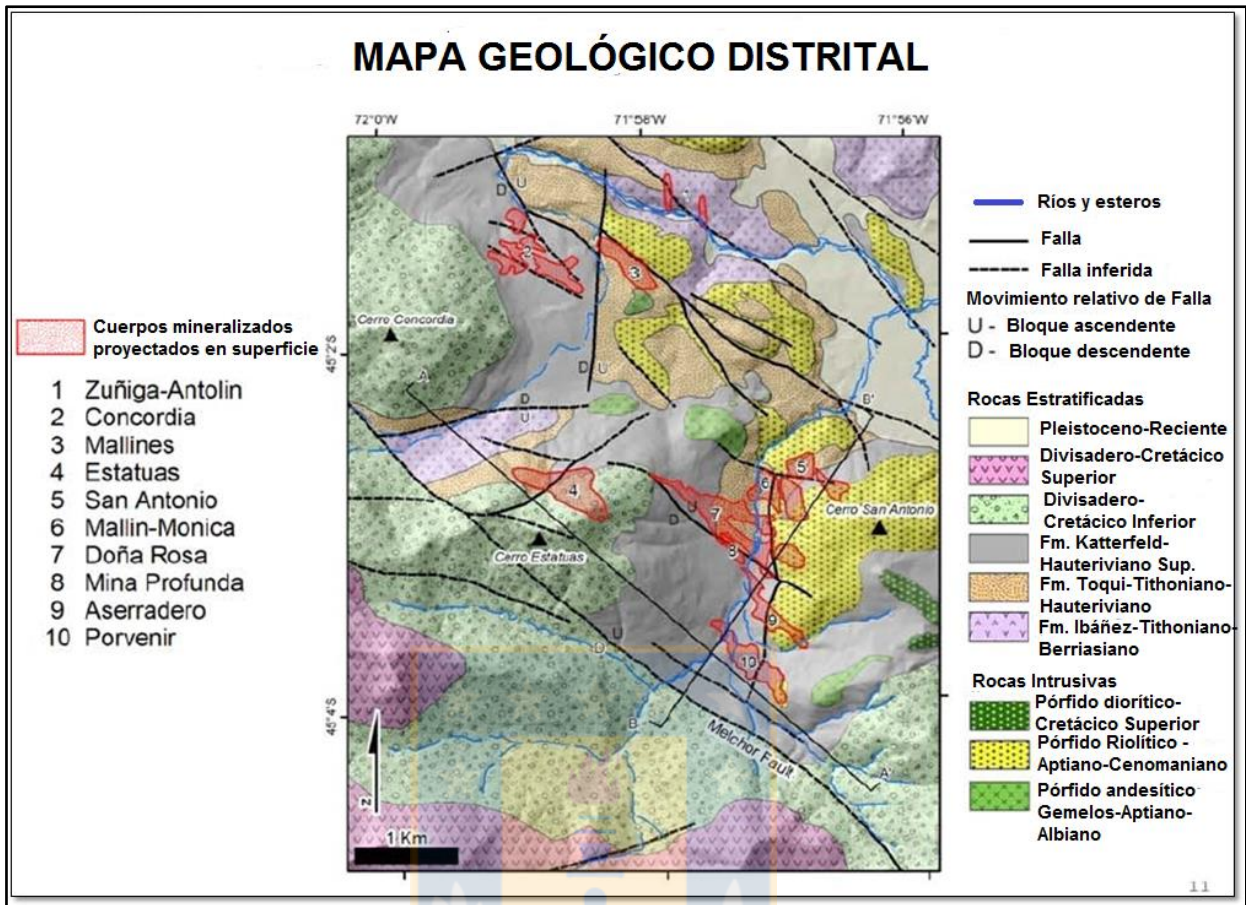


**Fotografía 2.2.** Cerro San Antonio. Está formado por rocas de la unidad de Pórfido Riolítico. Vista hacia el SE.

#### 2.4. Geología Estructural del Distrito.

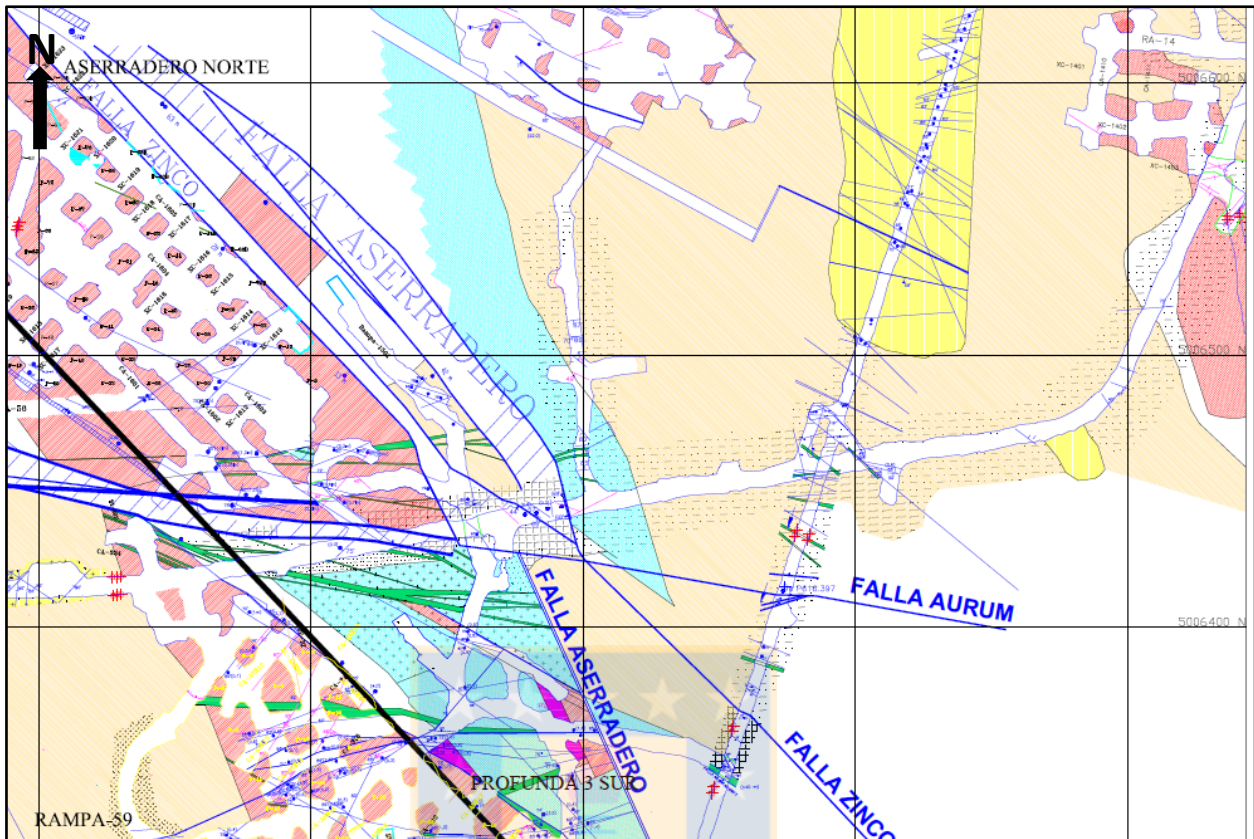
Dentro del Distrito El Toqui, se identifica un sistema estructural asociado al proceso de rifting y extensión tectónica que favoreció la coexistencia de un arco magmático y una cuenca marina ocurrida desde fines del Jurásico Superior a principios del Cretácico Inferior. Los principales sistemas estructurales, de tipo normal, tienen una dirección preferencial WNW-SSE y subordinadas a éstas, estructuras menores NNE-SSW.

En la figura 2.4 se expone un mapa geológico distrital evidenciando las unidades litológicas y estructurales más importantes identificadas en la zona de estudio.



**Figura 2.3: Mapa Geológico Distrital.** Se exponen las principales estructuras presentes, con su orientación preferencial. Basado en fotolinesamientos y datos en terreno. Modificado de Alfaro (2012).

En la figura 2.4, se expone un mapa de interior mina donde se ilustran algunas estructuras de primer orden, de orientación principal NNW-SSE, y que se asocian a zonas mineralizadas aledañas. Las labores interior mina aparecen detalladas y algunos cuerpos mineralizados identificados según datos de sondaje y terreno.



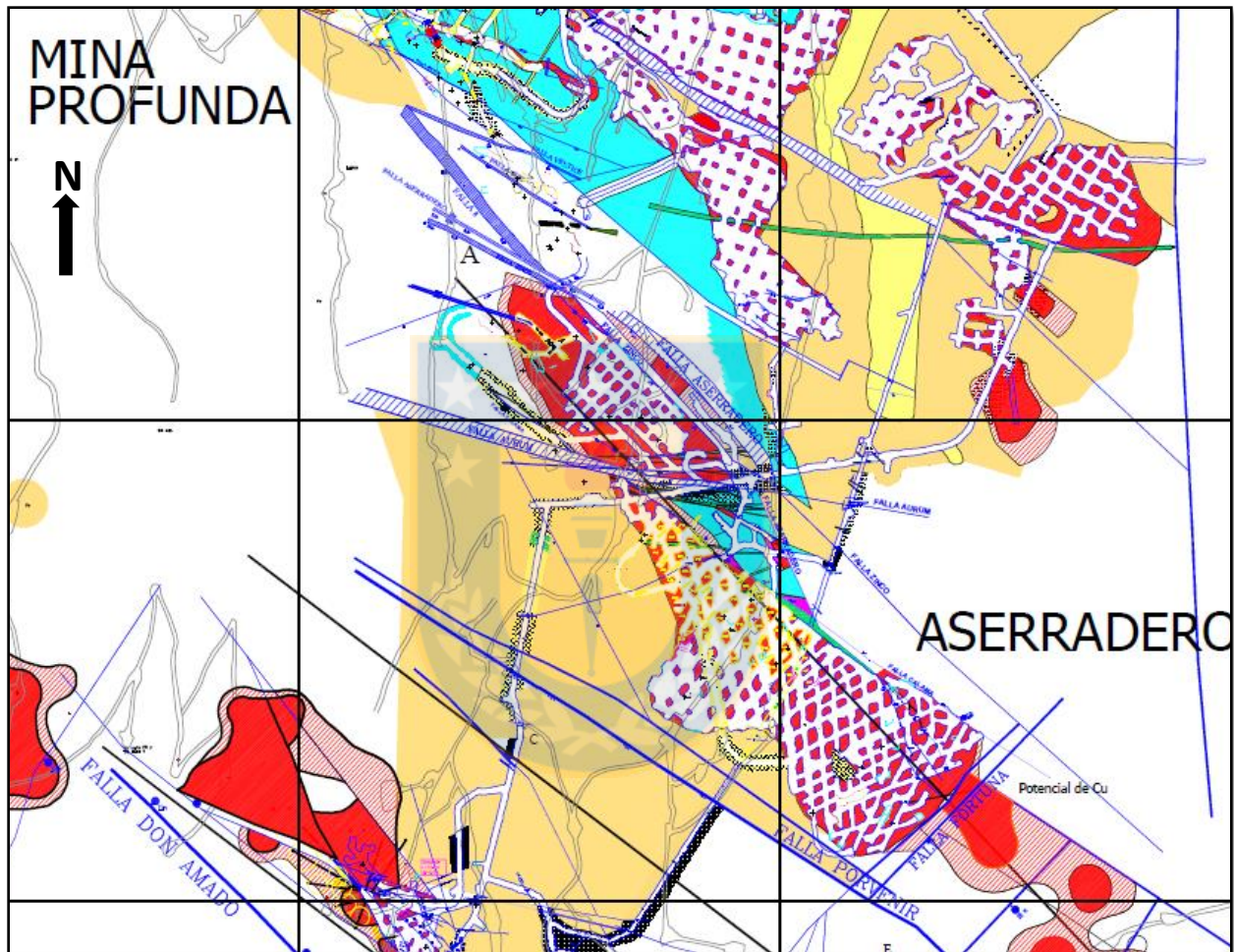
**Figura 2.4:** Mapa del Área de Aserradero. En línea continua azul, se ilustran las estructuras NNW-SSE asociadas a la mineralización. Escala 1:500. Tomado de Mapa geológico de Mina, 2012.

Según Alfaro (2012), la falla Melchor, de rumbo NW-SE, identificada en la figura 2.3, produce un salto de más de 100 m en la vertical, levantando el bloque del SW y dejando expuestas las unidades de la Formación Divisadero en los cerros aledaños al distrito, y disponiendo en zonas muy profundas las rocas de la Formación Toqui.

Por el contrario, la zona de la falla Toqui, ubicada al N, produce un salto de entre 150-200 m en la vertical, dejando en la zona N del distrito expuestas en superficie a las unidades de las formaciones Toqui y Katterfeld.

Esto se evidencia en que la zona de la Mina Porvenir, en la zona más S, está ubicada alrededor de 200 m bajo la superficie y la zona de Mina Profunda, en la parte central, que está a una profundidad de alrededor de 300 m. En la primera zona, la secuencia mineralizada corresponde al Manto Principal, por otro lado, en Mina Profunda, la secuencia mineralizada corresponde a la unidad de Areniscas Inferiores.

Entre estas estructuras de primer orden, se encuentran otras fallas de tipo normal que van conformando el sistema estructural del distrito, entre las que se cuentan falla Zinco-Aserradero, de actitud  $N35^{\circ}-40^{\circ}W/50^{\circ}-60^{\circ}SW$ , falla San Antonio, actitud  $N60^{\circ}W/55^{\circ}-60^{\circ}SW$ , falla Aurum, actitud  $N70^{\circ}W/60^{\circ}SW$ , falla Porvenir  $N60^{\circ}W/60^{\circ}SW$ , entre otras. Se detalla a continuación en la figura 2.5.



**Figura 2.5:** Mapa de Mina. Se muestra la disposición de las fallas de primer orden en línea azul. Escala 1:5000. Tomado de Mapa Geológico de Mina, 2012.

Todos estos antecedentes, muestran que la zona de estudio constituye una zona de graben y pilares tectónicos producto de la acción de estructuras de primer orden NNW-SSE y subsidiarias y más recientes, estructuras NNE-SSW, según estudios realizados por Folguera y otros (2003), en la zona que abarca la Cuenca Aysén-Río Mayo.

En relación a los procesos de mineralización y alteración, las estructuras NNW-SSE juegan un papel determinante en ello, actuando como posibles alimentadores de los fluidos hidrotermales. Palacios (1996), identifica una estructura brechizada y mineralizada al lado occidental de Doña Rosa, que interpreta como uno de los conductos principal de los fluidos mineralizadores (falla 5). Sin embargo, en este trabajo, se identifican otras estructuras de primer orden como canales de difusión de mineralización tales como falla Zinco-Aserradero, falla Porvenir, falla 8, falla Vértice, falla Calama, entre otras.

Bussey y Kakarieka (2010), documentaron zonación mineralógica y metálica a lo largo de estructuras NW-SE en Porvenir y Aserradero.

Los cuerpos mineralizados en el distrito tienen tendencia NW-SE paralelos a las estructuras que se evidencian como conductoras de fluidos. En relación a Mina Profunda, también la disposición es de tendencia NW-SE, en donde se identifican algunas estructuras tales como falla Zinco-Aserradero, falla 8, falla Aurum, falla Calama, entre otras.

En resumen, la zona de estudio formó parte de un conjunto de depocentros limitados por estructuras WNW-SSE y alineados en orientación NW-SE y que formaron la parte occidental de una serie de cuencas que se extendían desde la zona de antepaís, hacia la zona del arco volcánico y batolito patagónico en la parte occidental.

Éstos formaron parte de una topografía de cuencas marinas donde se disponían una serie de depocentros limitados por centros volcánicos de topografía positiva, donde existieron plataformas sobre las cuales se depositaron secuencias marinas, volcanoclásticas e intercalaciones calcáreas durante el Cretácico Inferior (Iannizotto y otros, 2004).



### **3. METODOLOGÍA DE TRABAJO.**

En este capítulo se exponen los aspectos más relevantes de la actividad minera desarrollada en el distrito y las distintas labores geológicas realizadas en interior mina, que permitieron recabar la información mineralógica, geoquímica y estratigráfica que sustenta este trabajo.

A continuación, se entrega una reseña histórica de la actividad minera dentro del distrito Toqui, para, posteriormente, detallar en la metodología de trabajo utilizada para la obtención de la información geológica, mineralógica, tanto de mena como alteración, metodologías de muestreo y obtención de datos geoquímicos y, por último, el tratamiento de la información recopilada.

#### **3.1. Geología de Mina.**

##### **3.1.1. Generalidades y Reseña Histórica de la Actividad Minera.**

En este capítulo se abordarán los aspectos más relevantes de las metodologías de trabajo utilizadas en interior mina, muestreo geoquímico y otros aspectos en la labor geológica realizada dentro del yacimiento.

Se detalla a continuación una reseña histórica del distrito minero, desde los primeros indicios de existencia de mineralización de importancia económica hasta el desarrollo de la mediana minería que actualmente se efectúa en la zona.

En el año 1963, habitantes del valle del río Toqui descubren muestras de roca con mineralización metálica en el cauce del río Concordia, que se identifica en a figura 3.1.

Estas evidencias llevaron al inicio de campañas de exploración minera a lo largo del curso del río Toqui y las zonas aledañas, encontrándose zonas favorables que llevaron al descubrimiento del distrito y al posterior inicio de la explotación de los recursos minerales que han sido encontrados a la fecha.



**Figura 3.1:** Imagen Satelital del Distrito Toqui. Zona del río Concordia, afluente del río Toqui, principal hoya hidrográfica en la zona de estudio. Se detalla la ubicación de diferentes minas del distrito. Imagen de Google Earth.

Posteriormente, en el año 1975, se funda la Sociedad Contractual Minera El Toqui, con sede en la ciudad de Coyhaique, la cual tiene la responsabilidad de administrar la propiedad minera del distrito Toqui y establecer las primeras instalaciones que harán la explotación del mineral de Zn y Pb que fueron halladas en la zona.

Entre los años 1976 a 1979 geólogos de la Metallgesellschaft de Alemania, descubren la Mina San Antonio, con leyes favorables de Zn, Pb, Fe y Cu, lo que da comienzo a un proceso de explotación sostenida, inaugurando la primera planta de proceso y estableciendo un promedio de reservas medidas de casi 1 millón de toneladas con leyes de 10% Zn, que resultan favorables económicamente. En el año 1991 se produce el descubrimiento de la Mina Doña Rosa, señalada en la figura 3.1, con leyes favorables de Zn, Fe y Cu.

Posteriormente, la empresa Lac Minerals y Breakwater Resources adquieren la propiedad minera y comienzan un periodo sostenido de explotación del yacimiento.

Cabe destacar que en los años 2000 y 2006 se producen los descubrimientos de 3 importantes minas, Estatuas, Aserradero y Concordia, que entregan leyes muy favorables en Zn-Pb-Fe y es en la Mina Aserradero donde se encuentran las primeras leyes económicamente rentables de Au, con leyes que superan los 5 g/t Au. Resulta importante destacar este hecho, ya que, a la fecha, no se habían descrito leyes de Au en el Manto Principal y el distrito era considerado como yacimiento de Zn, Pb y Cu sub-económico.

Por último, cabe destacar que, durante los años 2007 y 2008, después de una intensa campaña de sondeos que expandió los niveles estratigráficos de búsqueda, es decir, continuar sondeando hacia niveles más profundos desde el Pórfido Riolítico que subyace al Manto Principal, hasta encontrar la unidad litológica que subyace al Pórfido Riolítico, se descubre el nivel de Areniscas Calcáreas Inferiores, y que entregó promedios de 10-15 gr/t Au (Castañón, R., Comunicación verbal, 2012).

Esto se produce por los bajos precios del Zn en ese periodo y la necesidad de encontrar metales que pudieran darle valor agregado a los concentrados de metal que transaba la SCMET El Toqui en el mercado internacional.

Este descubrimiento significó una expansión sostenida de las campañas de sondeos, que tuvieron como objetivo atravesar la unidad de Pórfido Riolítico hacia los niveles subyacentes de areniscas calcáreas y efectuar los análisis correspondientes, producto de lo cual, los distintos análisis químicos permitieron establecer la existencia de una mineralización masiva de Au, Ag, Bi y Co en dichas unidades litológicas, logrando expandir el mercado de metales en la actividad minera del distrito.

Debido a lo anterior, se inicia una expansión de la actividad minera distrital, logrando la apertura de más de 6 nuevos sectores de explotación, de donde se extrae mineral del nivel de Areniscas Inferiores, con leyes de Au por sobre los 5 gr/t Au hasta incluso, los 60 gr/t Au como promedios ponderados por nivel estratigráfico de areniscas calcáreas.

Desde el año 2012 hasta el año 2016, la administración de la actividad minera estuvo a cargo de la compañía suiza Nyrstar Ltd. Actualmente, la empresa australiana Laguna Gold Inc., adquirió gran parte de las propiedades mineras del distrito Toqui, además de otras zonas aledañas, para la explotación y el inicio de un sostenido programa de exploración de recursos minerales y expansión de las labores en la zona.

### 3.2. Metodología de Trabajo.

En este capítulo se describen los procedimientos para el muestreo geoquímico del frente de producción, a partir del material extraído de la mina y con la cual se obtiene una ley promedio de la sección en explotación para obtener una ley ponderada de las minas que serán extraídas después del proceso de tronado y extracción desde la mina.

Esta sección del frente de explotación, es en la mayoría de los casos de 5 x 6 m de ancho y alto, respectivamente, definido como ideal para la explotación por factores operacionales. Sin embargo, en algunos sectores de Mina Profunda Oeste y Norte, las secciones de explotación fueron de 8 m de ancho x 15 m de alto, dada la potencia de la secuencia de la unidad de Areniscas Inferiores y las leyes favorables sobre todo de Au (en gr/t).

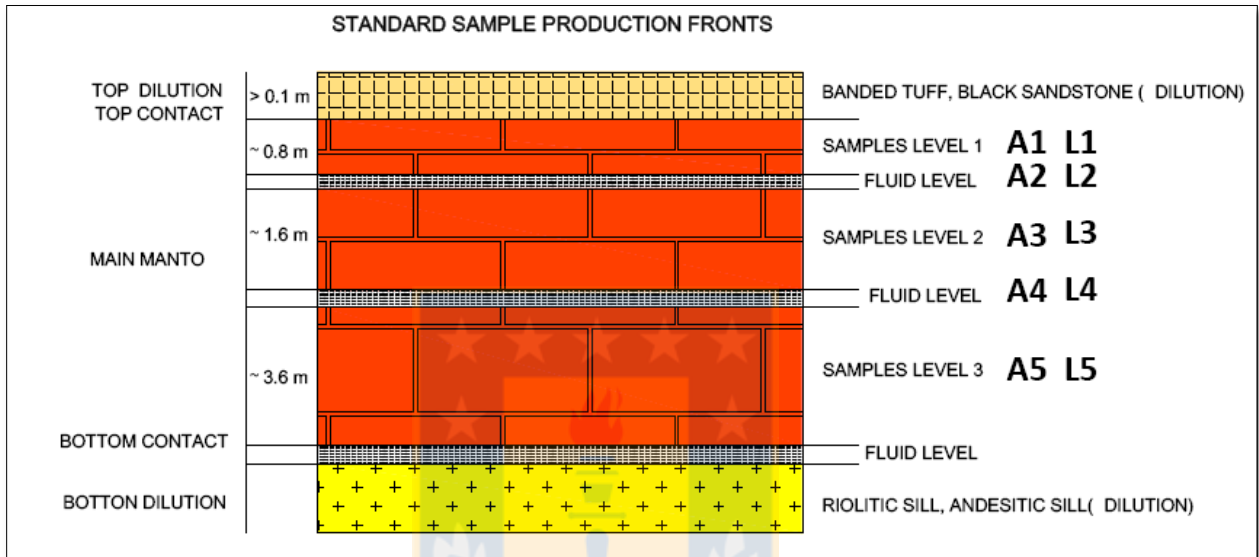
La sección medida para la explotación se define por criterios litoestratigráficos y se mide de dos formas, según las zonas de mina en explotación.

Para el caso de las Minas Profundas, el frente de explotación se ubica desde el contacto de las Areniscas Inferiores con el Pórfido Riolítico, hacia el techo de la secuencia y, en la base de esta unidad con el contacto con la Formación Ibáñez, límites de la unidad en el techo y base de la secuencia, respectivamente.

En el caso de Porvenir, Aserradero y otros sectores, las labores de explotación se mide desde el contacto del Manto Superior con la unidad de Areniscas Laminadas Grises, la parte superior, hasta el contacto del Manto Principal con el Pórfido Riolítico, en la parte inferior.

El primer caso que se detalla es el muestreo de frente, que considera un reconocimiento de la mena, y una identificación de la posición estratigráfica en que se encuentra la labor, a partir de la secuencia estratigráfica en la que se encuentra la zona en explotación, según los datos geológicos del distrito.

En la figura 3.2 se detalla un esquema de una sección de un frente de explotación definido para la mina, en la cual se extraen muestras de roca desde los niveles de areniscas que se encuentran, tanto en Manto Principal como Areniscas Inferiores, por niveles centimétricos de tobas líticas con texturas de flujo que separan los estratos de areniscas calcáreas y que, según muestreos geoquímicos, presentan variaciones en el contenido de Zn, Au, Ag, Co y Bi, dado que estos niveles volcanosedimentarios constituyen barreras geoquímicas para la mineralización.



**Figura 3.2:** Esquema de Muestreo Geoquímico por Niveles de Areniscas. Utilizado en el distrito. Informe Geológico Distrital. Superintendencia de Geología y Exploraciones Mina El Toqui, 2012.

La ley geoquímica del frente de explotación obtenida, se calcula con la formula siguiente.

$$LEY = A1 * L1 + A2 * L2 + A3 * L3 + A4 * L4 + A5 * L5$$

---


$$(A1 + A2 + A3 + A4 + A5)$$

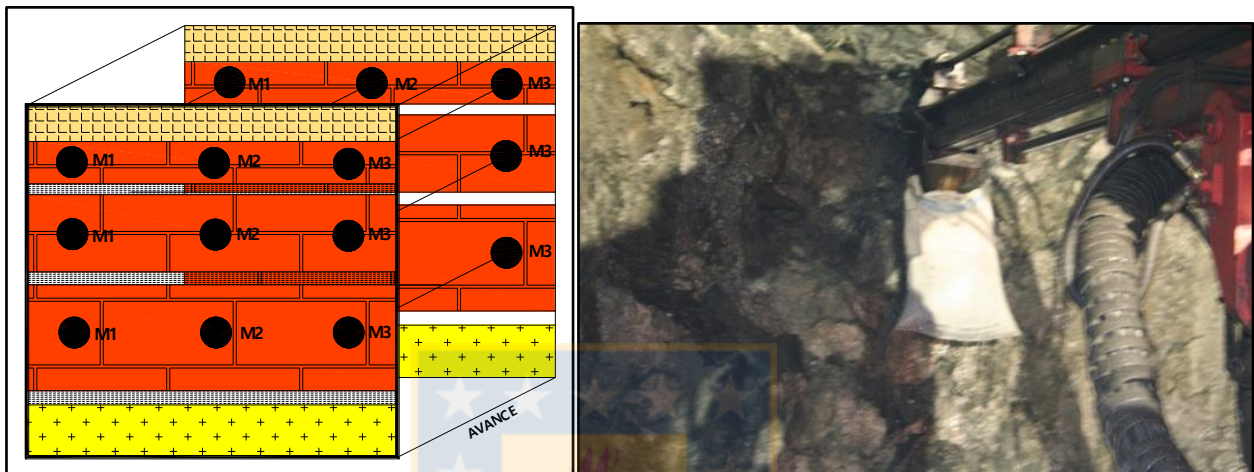
*Siendo A = área en m<sup>2</sup>*

*L = Ley geoquímica obtenida del laboratorio.*

Otro tipo de muestreo utilizado es el muestreo de Barros de Perforación, que comprende la utilización de un equipo de perforación, Jumbo o equipo apernador, al cual se adosa una bolsa o saco de muestreo que recoge los barros que se producen por la perforación de diamantina en el frente de roca.

Las barras de perforación tienen un largo de, aproximadamente, 3.0 m, lo que permite obtener una proyección de la ley de mineral en forma más exacta considerando, además, que el proceso de tronadura de un frente es de este mismo largo en el proceso de operación de la mina.

En la figura 3.3 se esquematiza el proceso de muestreo de barras de perforación.



**Figura 3.3: Esquema de Muestreo por Barros de Perforación y Muestreo.** Utilizando equipo perforador Jumbo. Tomado de Informe Geológico Distrital Superintendencia de Geología y Exploraciones Mina El Toqui, 2012.

Este muestreo consideraba la toma de entre 10-15 muestras que se envían a Laboratorio para análisis geoquímico de multielementos.

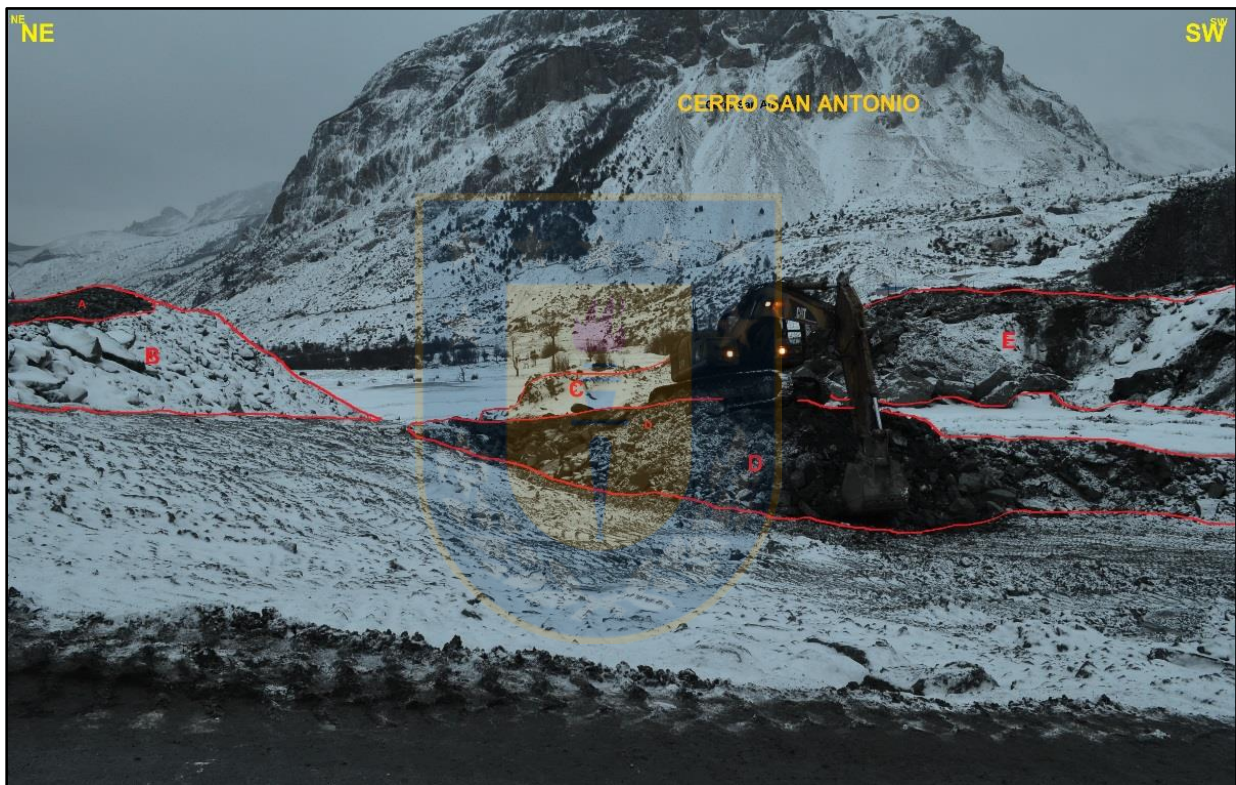
Esto permite proyectar la ley ponderada por cada nivel estratigráfico y establecer una proyección de cómo se comportará la ley final de la tronadura que se realiza en el frente.

También se utiliza el muestreo de marinas, es decir, el material extraído de la mina y acopiado en lo que se denomina Stock Pile, en donde se separa por ley y metal de importancia económica, ya sea Au-Zn-Pb. En este lugar se realiza un muestreo de partículas de roca con potencial económico, sub-económico y estéril, a fin de obtener un valor promedio del material extraído de mina, desde cada tronadura de un frente en producción.

Esto permite un ordenamiento del material acopiado, separación y, permite efectuar un proceso de Blending, o mezcla de mineral de leyes distintas, para obtener una ley promedio, que va destinado

para el proceso de Planta y obtención del concentrado metálico, que es en objetivo principal del negocio minero desarrollado en la zona de estudio.

En la fotografía 3.1, se muestra una imagen tomada en el Stock Pile, con el material sacado de mina, cuyos acopios son señalados con letras desde los acopios indicados con la letra A hasta la E, donde se depositan las diferentes marinas, ordenadas por metal (Zn, Zn-Pb, y Au), y según alta intermedia o baja ley, según los resultados de los muestreos geoquímicos previamente realizados.



**Fotografía 3.1. Foto de la Zona del Stock Pile del Distrito.** Se detallan, en rojo y con letras A-E, diferentes acopios de mineral, según metal y ley geoquímica. Vista al SE, Cerro San Antonio en el fondo.

Dentro de este acopio, se efectúa el muestreo de marinas, siguiendo protocolos establecidos. El muestreo considera un total de 10 kg de muestra por camionada de material, siguiendo protocolos de muestreo establecidos y normados, que se almacenan en bolsas plásticas de alta resistencia y luego se envían a laboratorio para su secado, triturado en molinos para lograr tamaño de partículas homogéneo, cuarteado y análisis geoquímico en el laboratorio químico.

Las muestras de frente y de marina son analizadas por procesos de Absorción atómica (AAS), *inductively coupled plasma emission spectrometry* (ICPES) y gravimetría para determinación de los siguientes elementos, descritos en el siguiente listado

<b>Au</b>	<b>Ag</b>	<b>Co</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>	<b>As</b>	<b>Al</b>	<b>As</b>	<b>Bi</b>	<b>Ca</b>	<b>Cd</b>	
<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Hg</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Mn</b>	<b>Mo</b>	<b>Na</b>	<b>Ni</b>	<b>P</b>	<b>Pb</b>	<b>Sb</b>
	<b>Sr</b>	<b>W</b>	<b>Zn</b>										

El último tipo de muestreo realizado en el distrito es el muestreo de sondajes, que considera los límites de estratificación para cada una de las secuencias de areniscas calcáreas mineralizadas, estimación de ley visual de Zn-Pb, alteraciones presentes y la relación de éstas últimas con paragénesis y presencia de leyes económicas en Au, Ag, Bi y otros elementos que se presentan en forma microscópica.

Para almacenamiento, validación y recepción de la información recopilada de los muestreos geoquímicos, se utiliza la siguiente planilla donde se detallan las muestras, ordenadas por compósito, información del sector de mina donde se extrajo, si es de frente o marina, el sector dentro del stock pile, y las leyes geoquímicas de 11 elementos de importancia económica.

Esto permite identificar intervalos de mineralización y utilizarlos en el modelamiento geológico posterior, para identificar y cuantificar los posibles cuerpos mineralizados que aporten nuevas reservas y recursos mineros a la actividad minera.

Lo anterior, se muestra en la tabla 3.1.



**Tabla 3.1. Planilla Excel** donde se almacena la información de los muestreos geoquímicos efectuados en Laboratorio, según correlativo de muestras, sector, tipo de muestreo y leyes obtenidas en laboratorio. Departamento de Geología de Mina SCMET, 2012.

Composito	N° Composito	MUESTRA	SECTOR	LABOR	POR	TIPO	Fecha	LeyVisual	%Zn	%Pb	%Fe	%Cu	%As	%Bi	%Cd	%Mn	%Co	Au g/t	Ag g/t
	5030	M-24073	MP3	DI-MP314S	CA-MP355	FRENTE	13-09-12	2.0	5.74	0.08	6.57	0.02	1.12	0.02	0.03	0.40	0.16	4.40	32.18
CF-5030			MP3	DI-MP314S	CA-MP355	FRENTE	13-09-12	2.0	5.74	0.08	6.57	0.02	1.12	0.02	0.03	0.40	0.16	4.40	32.18
	5031	M-24074	MP3	DI-MP313S	CA-MP354	FRENTE	13-09-12	2.0	3.22	0.02	8.14	0.02	0.68	0.02	0.02	0.60	0.10	5.15	11.54
	5031	M-24075	MP3	DI-MP313S	CA-MP354	FRENTE	13-09-12	2.0	3.25	0.04	6.39	0.04	0.54	0.03	0.02	0.48	0.14	12.45	13.57
CF-5031			MP3	DI-MP313S	CA-MP354	FRENTE	13-09-12	2.0	3.23	0.03	7.49	0.03	0.63	0.02	0.02	0.56	0.11	7.88	12.30
	5032	M-24076	PRV	CA-PRV317S	RA-PRV65	MARINA	13-09-12	1.0	3.54	0.04	6.13	0.03	0.02	0.01	0.02	0.33	0.01	1.28	3.32
	5032	M-24077	PRV	CA-PRV317S	RA-PRV65	MARINA	13-09-12	1.0	2.82	0.04	5.63	0.05	0.13	0.00	0.01	0.30	0.01	0.71	4.86
	5032	M-24078	PRV	CA-PRV317S	RA-PRV65	MARINA	13-09-12	1.0	3.31	0.04	5.09	0.04	0.10	0.00	0.01	0.29	0.01	0.84	3.31
CM-5032			PRV	CA-PRV317S	RA-PRV65	MARINA	13-09-12	1.0	3.22	0.04	5.62	0.04	0.08	0.00	0.01	0.31	0.01	0.94	3.83
	5033	M-24079	MM	BM-XCMM238W	CA-MM219	MARINA	13-09-12	7.0	5.69	0.04	16.99	0.07	0.10	0.01	0.02	1.13	0.01	0.07	8.95
	5033	M-24080	MM	BM-XCMM238W	CA-MM219	MARINA	13-09-12	8.0	5.64	0.03	17.39	0.08	0.05	0.01	0.02	0.98	0.01	0.09	7.66
CM-5033			MM	BM-XCMM238W	CA-MM219	MARINA	13-09-12	7.5	5.66	0.04	17.19	0.08	0.08	0.01	0.02	1.06	0.01	0.08	8.30
	5034	M-24081	PRV	CA-PRV317N	RA-PRV65	FRENTE	13-09-12	2.0	3.54	0.01	4.01	0.02	0.06	0.00	0.02	0.20	0.01	0.85	1.16
	5034	M-24082	PRV	CA-PRV317N	RA-PRV65	FRENTE	13-09-12	2.0	5.68	0.02	4.70	0.04	0.02	0.00	0.03	0.15	0.01	0.89	1.58
CF-5034			PRV	CA-PRV317N	RA-PRV65	FRENTE	13-09-12	2.0	5.04	0.02	4.49	0.04	0.03	0.00	0.02	0.16	0.01	0.87	1.46
	5035	M-24083	MPS	DI-MP18W	CA-MP216	MARINA	13-09-12	2.0	2.86	0.03	8.14	0.14	3.10	0.04	0.01	0.58	0.38	2.50	9.51
	5035	M-24084	MPS	DI-MP18W	CA-MP216	MARINA	13-09-12	2.0	3.48	0.02	7.91	0.12	2.29	0.02	0.02	0.54	0.25	1.35	10.10
CM-5035			MPS	DI-MP18W	CA-MP216	MARINA	13-09-12	2.0	3.17	0.02	8.02	0.13	2.69	0.03	0.02	0.56	0.32	1.93	9.80
	5036	M-24085	MPN	CA-MP124BS	RA-MP91	FRENTE	14-09-12	1.0	2.70	0.04	4.45	0.03	0.38	0.03	0.01	0.32	0.08	7.95	6.37
	5036	M-24086	MPN	CA-MP124BS	RA-MP91	FRENTE	14-09-12	1.0	1.99	0.02	6.09	0.08	0.32	0.01	0.01	0.38	0.05	1.90	4.65
	5036	M-24087	MPN	CA-MP124BS	RA-MP91	FRENTE	14-09-12	1.0	2.51	0.01	4.89	0.08	0.27	0.01	0.01	0.22	0.03	4.10	4.79
	5036	M-24088	MPN	CA-MP124BS	RA-MP91	FRENTE	14-09-12	1.0	3.52	0.02	5.81	0.09	0.94	0.03	0.02	0.31	0.02	11.10	4.74
CF-5036			MPN	CA-MP124BS	RA-MP91	FRENTE	14-09-12	1.0	2.76	0.02	5.52	0.08	0.55	0.02	0.01	0.31	0.04	6.63	4.96

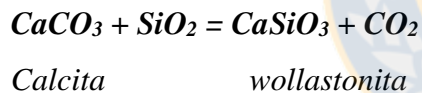
#### 4. ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE MINERALIZACIÓN DEL DISTRITO.

##### 4.1. Generalidades Respecto de los Depósitos de Tipo Skarn.

El Distrito Minero El Toqui, ha sido identificado como un depósito de tipo Skarn, con mineralización polimetálica de sulfuros de Zn, Pb, Au, Fe, Ag y Cu, entre otros metales como As, Bi, Co y Cd.

Cabe señalar que los depósitos tipo skarn son rocas dominadas por minerales calcosilicatados que se forman por reemplazamiento de litologías ricas en carbonato ya sea por procesos de metamorfismo regional o por procesos metasomáticos de contacto por la intrusión de un magma rico en fluidos y metales (Pirajno, 2009). Esto genera un complejo sistema hidrotermal de reemplazo mineralógico y precipitación de metales (Escalante y otros, 2010).

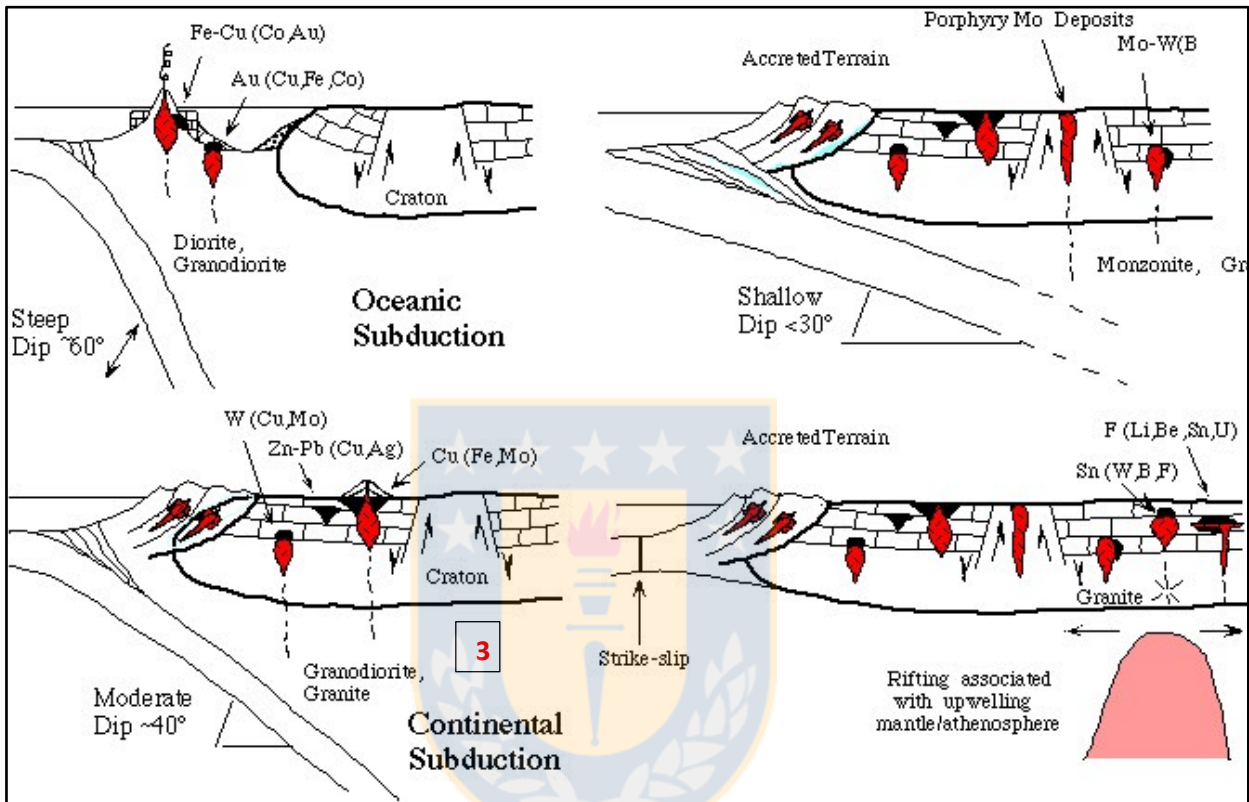
Pirajno (2009), expone el proceso de reemplazo de rocas ricas en carbonato de Ca por minerales silicatados, generalmente referidos a una adición de SiO<sub>2</sub> desde un cuerpo magmático, como se detalla en la siguiente reacción química.



La adición de grandes cantidades de sílice al sistema produce una amplia gama de minerales calcosilicatados. Con ello, los ensamblajes de minerales de alteración de rocas del skarn incluyen Ca, Fe, Mg, silicatos de Mn tales como epidota, clinozoisita, granates, clinopiroxenos, wollastonita, diópsido, vesubianita, tremolita-actinolita, andradita, grosularia, flogopita y biotita.

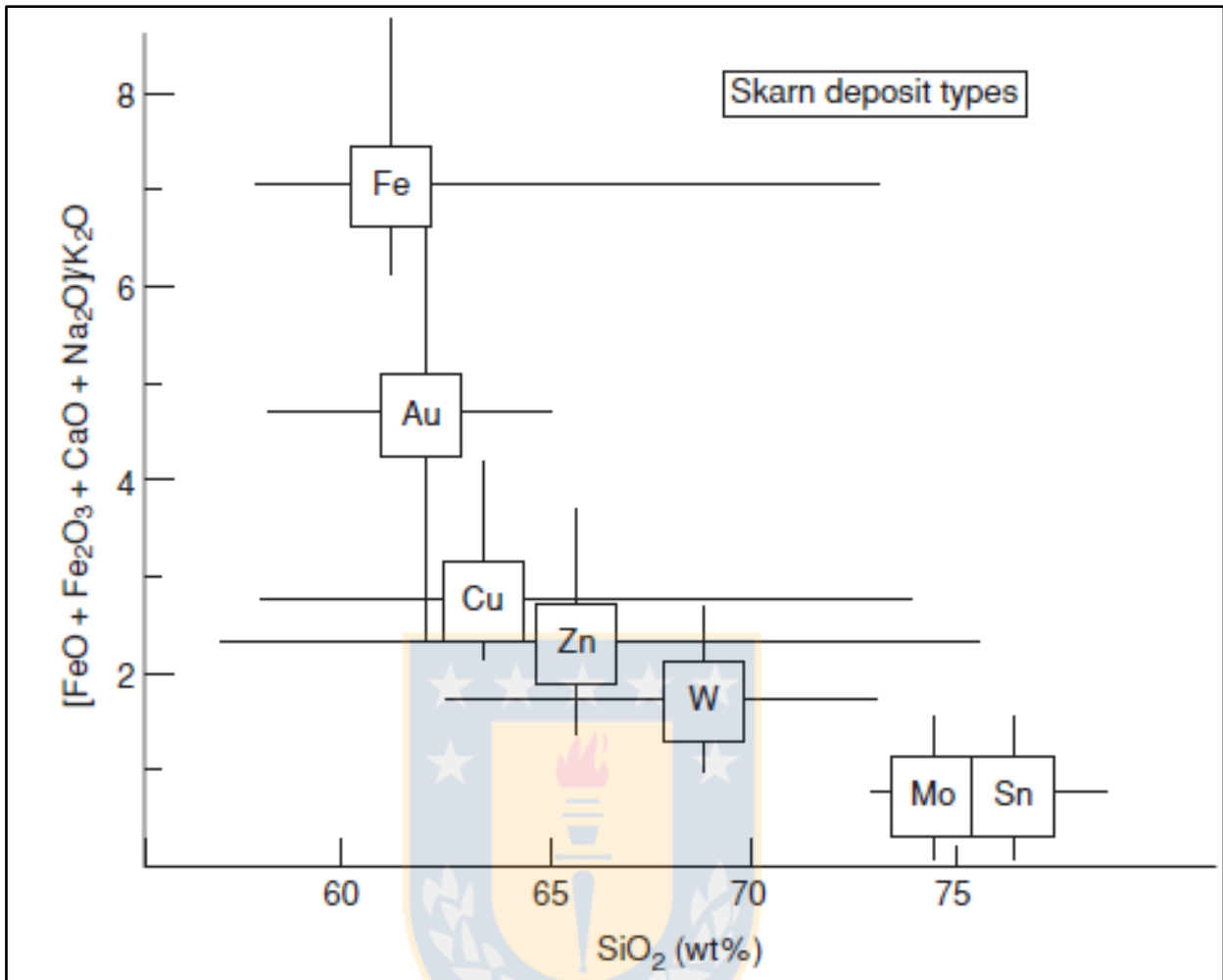
Estos depósitos se encuentran adyacentes a cuerpos intrusivos, a lo largo de fallas o zonas de cizalla mayores, en sistemas geotermales superficiales, en las profundidades del fondo marino asociado a zonas de dorsales oceánicas y volcanismo submarino y a profundidades mayores en terrains metamórficos profundos (Meinert, 1992).

Meinert y otros (2005), consideraron 4 ambientes geotectónicos principales, favorables para la formación de este tipo de depósitos minerales, los cuales corresponden a (1) subducción oceánica profunda, (2) subducción transicional de bajo ángulo, (3) subducción continental y (4) rifting continental. Esto se muestra en la figura 4.1.



**Figura 4.1:** Ambientes Geotectónicos de los Depósitos Tipo Skarn. Son producto de magmatismo y metasomatismo en rocas calcáreas. En el caso de la zona de estudio, según argumentos litológicos y mineralógicos, se identifica el tipo (3), de Subducción Continental. Modificado de Meinert (1983).

En cuanto a las características y composición química de las intrusiones ígneas y su relación con los metales dominantes en los depósitos tipo skarn, Meinert (1992), detalla este vínculo, a partir de las concentraciones de Fe-Ca-Na vs %SiO<sub>2</sub> según los distintos estudios geológicos realizados en diversos depósitos tipo skarn y su relación con los cuerpos intrusivos responsables de la mineralización, lo que se expone en la figura 4.2.



**Figura 4.2:** Diagrama de la Relación SiO<sub>2</sub> vs (FeO + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + CaO + Na<sub>2</sub>O)/K<sub>2</sub>O. Se muestra la relación entre composición de SiO<sub>2</sub> y el metal dominante, en los distintos depósitos de tipo Skarn. Tomado de Meinert (1992, en Robb, 2005).

Según la figura 4.2, es posible indicar, de forma preliminar, que para los skarn de Zn-Pb y skarn de Au existen altas concentraciones de Fe, Ca y Na, y los % SiO<sub>2</sub> de los intrusivos responsables de la mineralización son altos, desde composiciones granodioríticas-dacíticas hasta graníticas-riolíticas.

En la zona de estudio, las unidades litoestratigráficas hospedantes de la mineralización, corresponden a secuencias de areniscas calcáreas y coquinas en las cuales, debido a los procesos metalogénicos de tipo skarn involucrados, se produce una asociación mineralógica de mena principal de minerales de Zn, Pb, Cu, As, Au, Ag, Co, y Bi, entre otros, lo que según la clasificación descrita anteriormente, corresponde la formación de un skarn en un proceso de subducción en un margen convergente, es decir, corteza oceánica que subducta bajo una corteza continental de

mayor espesor en un régimen de ángulo de subducción intermedio, alrededor de 30-40°, asociado a cuerpos intrusivos de composición granodiorítica a granítica, tal como se muestra en la figura 4.1, señalada como tipo 3, (Meinert, 1983).

Los principios básicos que controlan la depositación de los minerales de mena se pueden dividir en aquellos que suceden en ambientes superficiales y profundos.

Según Seward y Barnes (1997, en Robb, 2005), en niveles corticales superficiales (< 3 km), la depositación de los minerales de mena tendrá lugar por relleno de espacios abiertos y fracturas en la roca hospedante, producto del comportamiento frágil de las rocas en profundidades someras, presencia de aguas meteóricas que se infiltran y el hidrofracturamiento producido en los cuerpos de roca, mientras que en zonas más profundas donde la porosidad de las rocas es menor, tiende a ocurrir el reemplazamiento de los minerales existentes. El decrecimiento de la temperatura es el factor que, intuitivamente, es considerado como la forma más importante de promover la precipitación de los metales desde los fluidos hidrotermales.

En niveles más profundos (sobre 3 km), los gradientes de temperatura a lo largo de las estructuras dentro de las cuales los fluidos se desplazan tienden a ser mínimas y las precipitaciones de metales no serán muy eficientes ni tampoco restringidas a una zona de trampa particular (Robb, 2005). En dichos casos, se postula que la precipitación de la mineralización metálica ocurre cuando cambian las propiedades composicionales del fluido hidrotermal.

Para el caso de las rocas hospedantes, ricas en bioclastos y restos carbonáticos, puede decirse que la precipitación metálica, si ocurre en complejos metal-cloruros, podría ocurrir de forma muy eficiente incrementando el pH del fluido hidrotermal. En este caso la reacción de un fluido ácido con carbonatos en la roca caja y en donde la precipitación de los metales es promovida por digestión y reemplazamiento de los minerales y clastos de la roca hospedante (Robb, 2005), tal es el caso del reemplazo selectivo de bioclastos por mineralización metálica y, en algunas zonas de mina Porvenir y Aserradero, el reemplazo abarca la totalidad de la textura de la roca caja, por sulfuros metálicos y minerales de alteración como piroxenos, anfíboles, granates y epidota, entre otros.

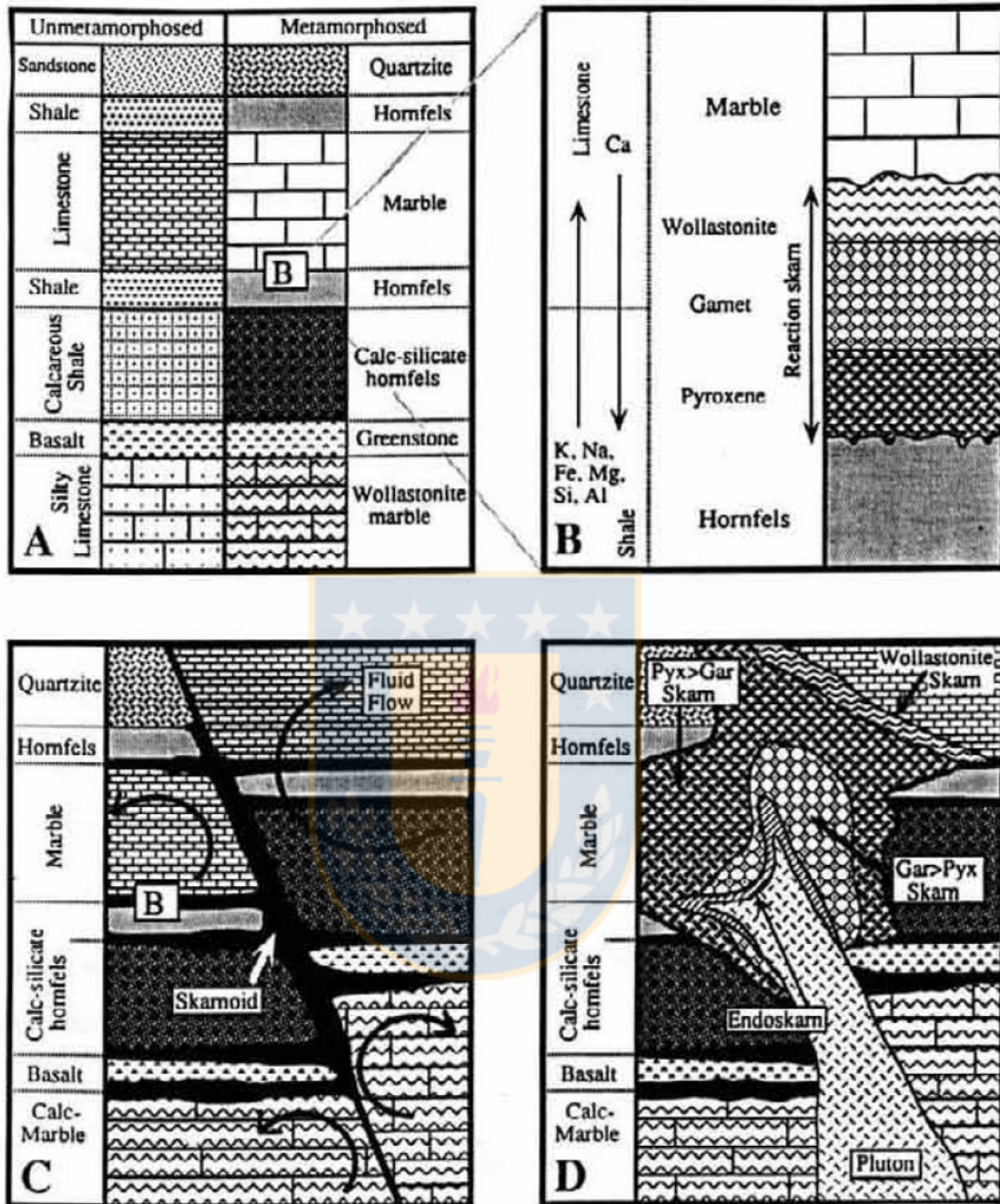
Como se señaló en el capítulo 2.2.2, las rocas hospedantes de la mineralización provienen de la depositación de carbonatos debido a la actividad biológica de tipo marina desarrollada en la llamada Cuenca Aysén-Río Mayo, durante el Cretácico Inferior, en coexistencia con un arco magmático limítrofe hacia el sector occidental que, a modo de hipótesis, fue la fuente de los cuerpos intrusivos mineralizadores que afectaron a las unidades litoestratigráficas de la zona de estudio (Ianizzotto y otros., 2004).

Dentro del distrito se ha identificado que los cuerpos mineralizados, de tipo estratiforme y que se disponen en las secuencias estratificadas, se forman por un reemplazo metasomático y, en algunos casos, pervasivo del carbonato de calcio de las areniscas calcáreas y coquinas, por fluidos hidrotermales ricos en metales base, principalmente Zn, Fe y otros elementos metálicos (Barnett, 1991).

La mineralogía de ganga está caracterizada por minerales calcosilicatados típicos de alteración de tipo Skarn (píroxeno rico en Fe, anfíboles, granates cálcicos, epidota, entre otros), los cuales se distribuyen a lo largo de todo el distrito en variaciones modales diferentes según el grado de alteración y las condiciones fisicoquímicas que pueden plantearse a partir de los datos mineralógicos recopilados de las muestras de roca.

Estas asociaciones mineralógicas se presentan en zonación respecto de los metales presentes, acorde con las características de los procesos de intrusión, debido a que la mayoría de los depósitos de tipo skarn que han sido descritos existe una transición desde procesos de metamorfismo temprano/proximal resultando en la existencia de hornfels, skarn de reacción y skarnoide hacia un metasomatismo tardío/proximal resultante en un skarn de grano grueso y rico en minerales de mena (Meinert, 1992).

En la figura 4.3, se muestra un esquema de los distintos tipos de procesos de formación de los depósitos tipo skarn.



**Figura 4.3:** Etapas de Formación de los Depósitos Tipo Skarn. A) Metamorfismo isoquímico, recristalización y cambios en estabilidad mineral sin transferencia de masa significativa. B) La reacción Skarn resulta del metamorfismo de secuencia de estratos, tales como lutitas y limolitas con transferencia de masa entre las capas (bimetasomatismo) C) Skarnoide resultante del metamorfismo de litologías impuras con una pequeña transferencia de masa por movimiento de fluidos a pequeña escala. D) Skarn metasomático controlado por fluidos hidrotermales, el cual típicamente es de grano grueso y que no refleja, de forma cercana, la composición y textura del protolito. Meinert (1992).

Diversos estudios realizados han identificado 3 etapas secuenciales tipo en su formación, las cuales corresponden, en primer lugar, a un metamorfismo de contacto de tipo isoquímico durante la etapa temprana del emplazamiento del intrusivo y su cristalización inicial, en interacción con las rocas calcáreas hospedantes; la segunda, correspondiente a un metasomatismo y alteración entre intrusivo y roca caja, en sistema abierto, durante la saturación de los fluidos magmáticos y una última etapa, que corresponde a un proceso terminal y mezcla con aguas meteóricas durante el enfriamiento final del intrusivo (Einaudi y otros, 1981, Meinert y otros, 1992, en Robb, 2005).

En todos estos procesos, anteriormente descritos, es posible inferir que la fuente magmática es rica en metales base y que, durante la cristalización del cuerpo intrusivo, debe existir un proceso de separación efectiva de una fase hidrotermal, desde el magma, que sea capaz de capturar los metales antes de que entren a formar parte de los minerales formadores de roca.

Por lo anterior, es posible inferir que los cuerpos magmáticos fuentes de mineralización en el distrito, estuvieron en un estado de no cristalización total dado que de ésta característica depende el grado de extracción de los metales desde el magma parental por fases hidrotermales (Townley, B., comunicación personal, 2011).

Dentro de los análisis metalogénicos realizados en años anteriores en el distrito, y relacionado con lo señalado por Meinert (1992), respecto de las etapas secuenciales de la formación de un depósito tipo skarn, Palacios y otros (1996), realizaron un estudio de paragénesis mineral en la zona de estudio, identificando 3 episodios de mineralización. El primero, de carácter temprano, con mineralización de pirita, pirrotina y scheelita ( $\text{CaWO}_4$ ); el segundo con calcopirita, blenda y galena y, finalmente, uno tardío con arsenopirita, maldonita ( $\text{Au}_2\text{Bi}$ ), Au nativo, electrum ( $\text{AuAg}$ ), y hessita ( $\text{Ag}_2\text{Te}$ ).

En este trabajo serán consideradas las minas principales del distrito en producción, denominadas Mina Porvenir y Mina Aserradero, en sus partes Norte y Sur, y las denominadas Minas Profundas, que conforman los sectores de Mina Profunda 3, Mina Profunda Oeste y Mina Profunda Norte, respectivamente.

A partir de los datos petrográficos y mineralógicos recopilados en estas zonas del distrito, los análisis geoquímicos de muestras de roca, identificación visual de la mineralización metálica y de alteración y análisis bibliográficos recopilados, se pretende entregar las asociaciones



mineralógicas de mena y ganga, estableciendo con ellas las diferentes hipótesis respecto de los procesos de mineralización que ocurrieron en el Distrito Toqui, enfocándose más importantes en producción, señalados en el párrafo anterior

Con el objeto de complementar los argumentos de terreno, geoquímicos y bibliográficos, se utilizará la correlación de Pearson (1896), con el objeto de relacionar la dispersión de los datos de Au y Zn respecto de los otros elementos importantes como Fe-Pb-Ag-As-Cu y Bi y, con ello, establecer la dependencia o independencia respecto de estos dos elementos y analizar y plantear hipótesis respecto de la relación entre estos elementos en términos metalogénicos y paragénesis mineral usando como base los análisis geoquímicos efectuados a las muestras de roca.

La Correlación de Pearson es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables.

De manera menos formal, podemos definir el coeficiente de correlación de Pearson como un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando, ambas sean cuantitativas. Establece un rango de valores decimales entre -1,0 y 1,0 para definir el grado de dispersión y correlación entre datos dependientes.

Para este fin, se utiliza la siguiente fórmula, para datos no agrupados, tomando como base las leyes geoquímicas de los elementos de cada muestra almacenadas y descritas en la formula siguiente.

$$r = \frac{\sum xy}{\sqrt{(\sum x^2)(\sum y^2)}}$$

Donde  $r$  = Coeficiente producto-momento de correlación lineal

$$x = X - \bar{X}; y = Y - \bar{Y}$$

En sentido estricto, correlación entre dos variables tan sólo significa que ambas variables comparten información, que comparten variabilidad. Determinar el origen de la información, la fuente de la variabilidad -la causa- es una cuestión que no puede resolverse mediante recursos exclusivamente matemáticos (Camacho Martínez Vara de Rey, 2001).

En la tabla 4.1, se expone la interpretación del Coeficiente de Pearson, en valores decimales, y que será utilizada para analizar los valores de relación entre las leyes de Au y Zn con las leyes de Fe-Pb-Bi-As-Cu-Ag.

**Tabla 4.1. Interpretación de la Correlación de Pearson.** Según los valores obtenidos entre las variables analizadas.

<b>Valor</b>	<b>Significado</b>
-1	Correlación negativa grande y perfecta
-0,9 a -0,99	Correlación negativa muy alta
-0,7 a -0,89	Correlación negativa alta
-0,4 a -0,69	Correlación negativa moderada
-0,2 a -0,39	Correlación negativa baja
-0,01 a -0,19	Correlación negativa muy baja
0	Correlación nula
0,01 a 0,19	Correlación positiva muy baja
0,2 a 0,39	Correlación positiva baja
0,4 a 0,69	Correlación positiva moderada
0,7 a 0,89	Correlación positiva alta
0,9 a 0,99	Correlación positiva muy alta
1	Correlación positiva grande y perfecta

A continuación, se describen las características más importantes de las minas principales del distrito, enfocándose en su descripción general y ubicación, detalle de las características mineralógicas de mena y ganga, factores estructurales, análisis de datos geoquímicos y con ello, plantear argumentos e hipótesis y posibles características de los factores metalogénicos involucrados en la formación y depositación de la mineralización.

## **4.2. Sector Mina Aserradero.**

### **4.2.1. Descripción General.**

El sector de Aserradero comprende 2 minas principales: Mina Aserradero Sur y Mina Aserradero Norte, y cuya característica es la coexistencia de leyes económicas de Zn y Au.

La mineralización metálica de esta mina está concentrada en la unidad denominada Manto Principal de la Formación Toqui.

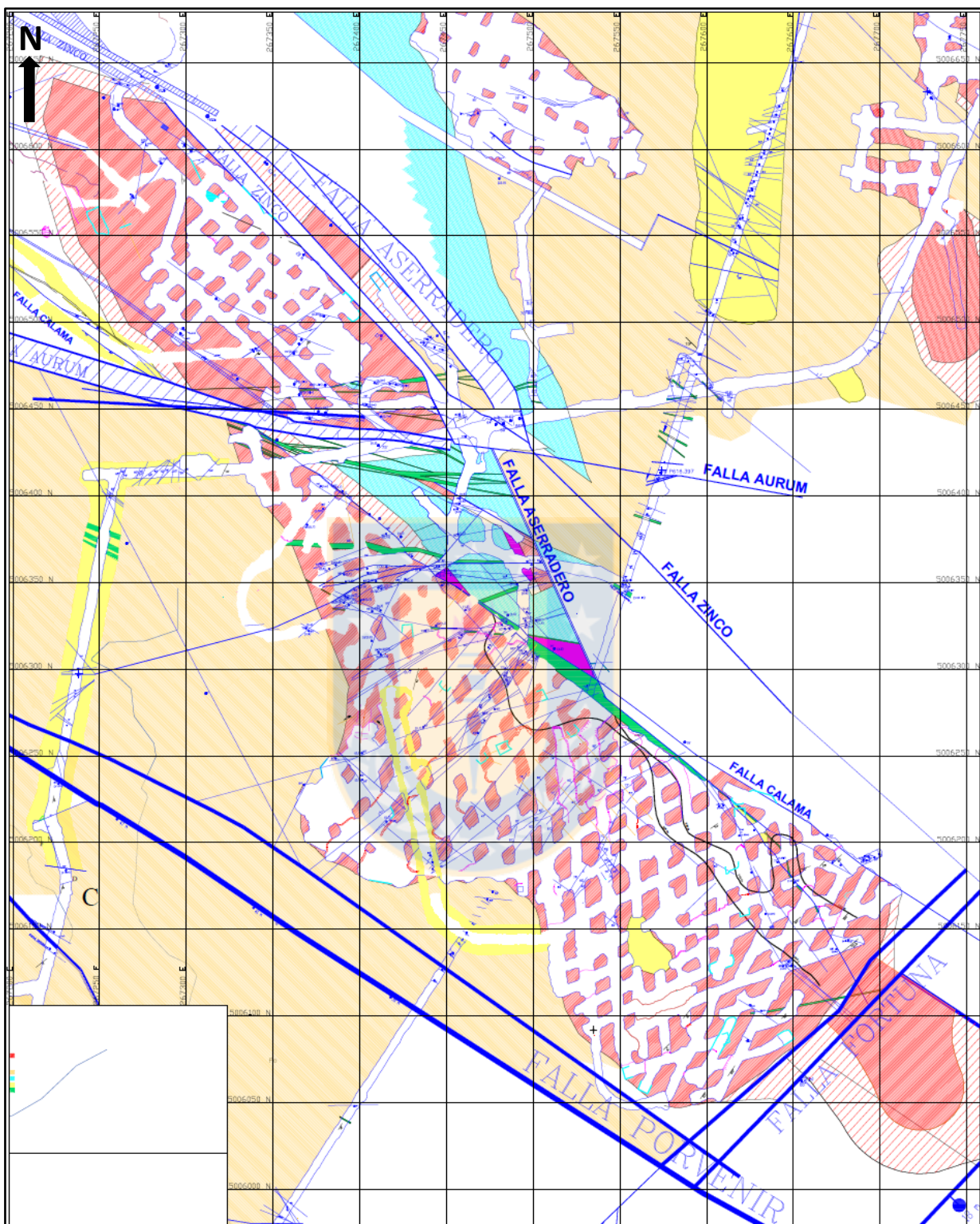
Según análisis de datos geoquímicos, principalmente de pilares en galerías, dado que, a la fecha de estudio, la explotación de este sector de la mina ya estaba avanzada, existiendo muy pocas zonas de Aserradero que no hayan sido explotadas sostenidamente, se concentran altas leyes de Au y Zn, sobre los 5 gr/t Au y 7% de Zn, respectivamente, siendo favorables para el beneficio económico asociado a esta actividad minera.

Ambos sectores, Norte y Sur, están separados por la falla Aurum, de rumbo NW-SE, que corresponde a una falla de tipo normal, que provoca un salto de alrededor de 17 m en la vertical, haciendo subir en bloque norte, es decir, el que corresponde a la Mina Aserradero Norte.

Cabe señalar que estas estructuras producen diferencias en las concentraciones de minerales de mena y, por ende, de las leyes que se evidencian en ambos sectores de Aserradero, siendo el sector sur quien concentra la mayor homogeneidad, en términos de leyes de Au y Zn, mientras que el sector norte se evidencian concentraciones más bajas y menos homogéneas, sobre todo en Au, sumado a otras evidencias mineralógicas que serán discutidas en capítulos siguientes más adelante.

Lo descrito en el párrafo anterior podría evidenciar condiciones de temperatura distintas entre ambos sectores y que pudieron haber provocado condiciones menos favorables para la mineralización metálica presente en ambos sectores, norte y sur, de la mina Aserradero.

En la figura 4.4, se muestra un mapa con las dos minas que componen el sector de Aserradero y en donde se muestran las principales estructuras antes descritas.



**Figura 4.4:** Mapa de Mina del Sector de Aserradero. Se observan en recuadros la zona norte y sur y la falla Porvenir, en el bloque SW. En relleno rojo se muestran los sectores mineralizados y en blanco los sectores explotados. Tomado de Mapa Geológico de Mina, 2012.

Estas dos minas están delimitadas por sus flancos NE y SW por 2 fallas de primer orden y que corresponden a la falla Porvenir y la falla Calama, que son dos estructuras de tipo normal, de alrededor de 60-70° de manteo, que forman un graben o fosa tectónica y que descienden hacia el SW, enfilando a través del sector de la Mina Porvenir.

En términos petrográficos, el sector de Aserradero se compone de areniscas calcáreas fosilíferas de grano medio con abundantes bioclastos, las cuales presentan reemplazo total o parcial por mineralización sulfurada, entre las que destacan pirrotina, marmatita, arsenopirita, pirita, cobaltita, Au nativo y bismutinita. Este reemplazo se da tanto en la matriz como en los bioclastos, de forma selectiva o pervasiva.

La mineralogía de alteración de estas areniscas comprende anfíboles tales como actinolita-hastingsita, piroxeno cálcico-ferrífero masivo, dominado por hedenbergita y granates ricos en Ca, que es un mineral de alteración típico de Skarn de Au que se han descrito en otros lugares como, por ejemplo, Fortitude (Myers y Meinert, 1991), además de, epidota, clorita, sericita y cuarzo.

#### **4.2.2. Análisis de los Procesos de Mineralización.**

Según los datos recopilados en muestras de mina y de terreno, el sulfuro más abundante en Aserradero es la pirrotina, ( $\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$ ), lo que muestra que la fuente magmática y los fluidos hidrotermales derivados de ella, tuvieron una fuerte naturaleza reductora (Kakariekka, 2006).

En segundo lugar, se encuentra marmatita ( $\text{Zn, Fe}$ ) S, que es la mena principal de Zn del distrito. En términos secundarios se encuentra arsenopirita, bismutinita, Au nativo y electrum, pirita, calcopirita, cobaltita y, en menor grado galena restringida a estructuras.

Según Meinert (2000), existen depósitos minerales de tipo skarn donde la mineralización de Au ocurre en asociación con minerales de Bi, Te y As, sumado a ello los protolitos ricos en clastos (o bioclastos como el caso del distrito), en donde existe interacción con diques, sills y otros cuerpos volcánicos que producen la alteración de skarn (Meinert, 1992). Esto también ocurre cuando la

intrusión corresponde a un granitoide de características reductoras y rico en Ilmenita, la cual refleja la naturaleza de la fuente magmática (Blevin y Chapell, 1992, en Robb, 2005).

Esto se puede relacionar a que la mineralización de Au dentro de Aserradero presenta una paragénesis, entre otros sulfuros antes descritos, a arsenopirita y bismutinita sumado a la presencia de pirrotina (en menor abundancia), lo que permite inferir el carácter reductor de la fuente mineralizadora, particularmente en el sector de Aserradero Norte donde se evidencia mayor abundancia de pirrotina.

La mineralización de Au está asociada a una fuerte alteración de piroxeno y anfíboles, en la principalmente se ha identificado hastingsita-actinolita y hedenbergita, piroxenos ricos en Ca, epidota, granates del tipo grosularia y clorita, la cual representa una característica distintiva de otros sectores del distrito en donde la mineralización de alteración es clorita-epidota, que corresponde a procesos de menor temperatura (Kakariekka, 2006).

Estos antecedentes mineralógicos llevan a inferir que la mineralización de esta zona se produjo en una etapa retrógrada, con fuerte hidrofracturamiento asociado con intrusiones de cuerpos magmáticos someros que incrementan de forma importante la permeabilidad de la roca hospedante y provocan una fuerte interacción de aguas meteóricas más cercanas a la superficie, que favorecen la precipitación metálica desde la fuente (Shelton, 1983, en Pirajno, 2009). Esto, dado que al interactuar los fluidos magmáticos con fluidos meteóricos se produce una serie de complejas reacciones de tipo retrógrado, así como también, la precipitación de las fases de mineralización de metales base (Einaudi y otros., 1981 en Robb, 2005).

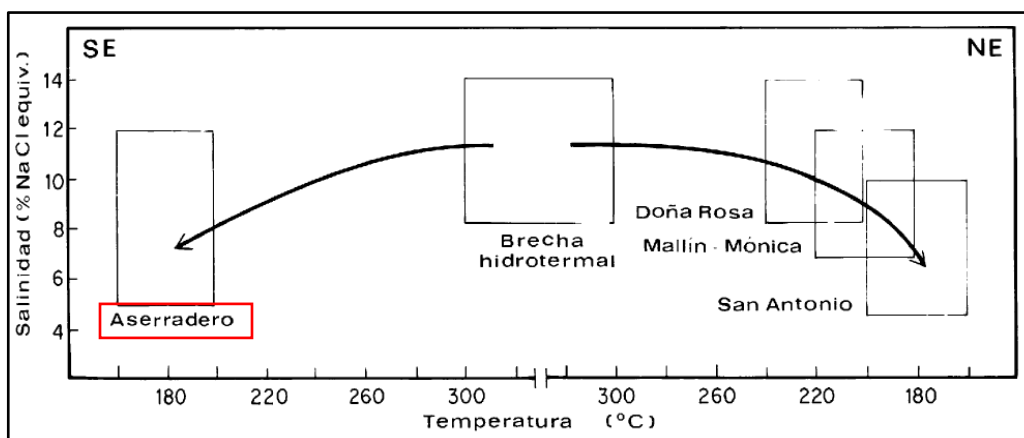
Dentro de la mineralización metálica, se reconocen asociaciones principales de pirita-calcopirita y pirrotina como mineralización metálica proximal, y presencia de marmatita, galena, Au nativo y Ag en zonas distales, respecto de la fuente mineralizadora y de las estructuras mayores, siendo las más importantes la falla Zinco-Aserradero y falla Aurum, que se infieren como canales de mineralización principales para estos fluidos hidrotermales.

Sin embargo, no se evidencia presencia de magnetita o bornita en Aserradero, lo que, según Meinert y otros (2003), implica que ocurre un periodo de lixiviación que afecta a la mineralización temprana de metales base, previo a un proceso de alteración hidrotermal.

Según los mismos autores, la mineralización de metales preciosos ocurre en una etapa singenética con el proceso hidrotermal retrógrado, dando como resultado la precipitación de Au nativo y electrum, Ag nativa y sulfosales, arsenopirita, bismutinita, galena y cobaltita evidenciada.

En términos de condiciones fisicoquímicas existentes para los procesos de mineralización descritos, Palacios y otros (1994), realizaron un estudio de inclusiones fluidas (IF ricas en fluido y con menos de 20% de vapor en volumen), para este sector del distrito los que arrojaron temperaturas de ebullición de entre 160 a 200°C con un 6-12% NaCl equivalente. Según el trabajo realizado por estos autores, el yacimiento se habría formado a partir de fluidos con temperaturas de entre 380-160°C y salinidades de entre 4-14 % NaCl equivalentes, por tanto, se habría formado ya en una etapa retrógrada en interacción con aguas meteóricas.

Estos resultados se exponen en la figura 4.5, donde se muestra el sector de Aserradero, además de otros sectores del distrito no incluidos en este trabajo, donde se aprecia las condiciones fisicoquímicas determinadas para los procesos de mineralización, a partir de los datos de inclusiones fluidas realizadas.



**Figura 4.5:** Diagrama Temperatura de Homogenización vs Salinidad. Se muestra la ubicación de las inclusiones fluidas dentro de Aserradero y otras minas del Distrito. Tomado de Palacios y otros (1994).

En la fotografía 4.1, es posible apreciar una muestra de roca donde los bioclastos son reemplazados parcialmente por sulfuros de Fe y Zn, incluso conservando su forma original, lo que evidencia la importancia de los carbonatos en los procesos de precipitación de metales que forman los minerales de mena de esta zona.



**Fotografía 4.1.** Muestra de Roca de Mina Aserradero. Se observan bioclastos con reemplazo parcial de mineralización de marmatita, pirrotina y pirita. Alteración principal de piroxeno y anfíbol en matriz.

Según datos de microscopía realizados en años anteriores por algunos autores (Kakarieka, 2006; Bussey y otros., 2010), la mineralización de Au nativo y Electrum se encuentra relleno de fracturas de metales base ya existentes, lo que lleva a postular a estos autores que la mineralización de Au, Bi y sulfosales de Pb fue relativa a un episodio tardío de mineralización en la secuencia paragenética.

Cabe destacar que en el sector de Aserradero Norte se evidencia que las leyes de Fe y Ag son más altas que en Aserradero Sur. La presencia de mayor mineralización de pirrotina en Aserradero Norte influye, según datos de terreno, en la presencia de mineralización de Au, lo que, a modo de hipótesis, el importante carácter reductor de los fluidos hidrotermales no favoreció la precipitación masiva de Au en esta zona del distrito.



Lo anterior se evidencia en la tabla 4.2, con los análisis geoquímicos promedios obtenidos desde los años 2011 a 2012, en ambos sectores.

**Tabla 4.2. Promedio de Leyes de los Sectores de Aserradero Norte y Aserradero Sur.** Tomado de planilla de almacenamiento de muestreos geoquímicos, 2012.

SECTOR	%Zn	%Pb	%Fe	%Cu	%As	%Bi	%Cd	%Mn	%Co	Au g/t	Ag g/t
ASERRADERO NORTE	3,21	0,09	9,04	0,38	0,64	0,03	0,02	0,62	0,13	2,91	23,86
ASERRADERO SUR	4,43	0,04	6,21	0,06	0,28	0,01	0,02	0,27	0,07	5,29	5,29

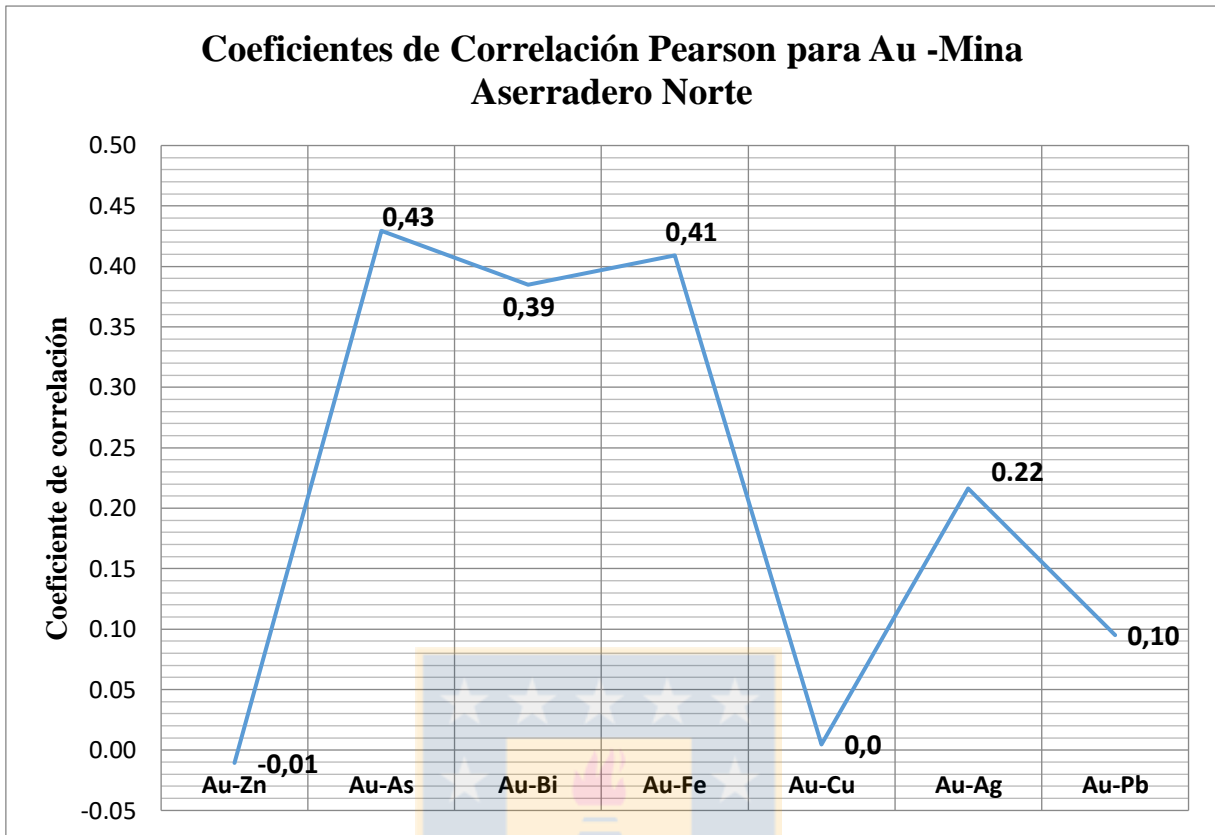
En contrapartida, en el sector sur, la presencia de mayor contenido de Zn, menores de Fe, evidencia la existencia de leyes altas de Au, de más de 5 gr/t Au y más, según datos geoquímicos obtenidos de las muestras extraídas, aunque en algunos muestreos se evidencian leyes por sobre los 20 gr/t Au en algunos niveles de areniscas.

Ayudando lo señalado anteriormente, se expone un análisis de los datos geoquímicos entre Au y los elementos más importantes obtenidos de ambos sectores usando la correlación de Pearson (1896), detallado en la tabla 4.3, correspondiente a los sectores de Aserradero Norte y Aserradero Sur, respectivamente.

**Tabla 4.3. Datos de la Correlación de Pearson.** Efectuada para mostrar la relación entre los elementos de importancia económica de Mina Aserradero Norte.

N° de Datos	MINA ASERRADERO NORTE - CORRELACIÓN PEARSON						
208	-0,01	0,43	0,39	0,41	0,00	0,22	0,10
	Au-Zn	Au-As	Au-Bi	Au-Fe	Au-Cu	Au-Ag	Au-Pb

Gráficamente, se expone en la figura 4.6.



**Figura 4.6:** Gráfico de los Coeficientes de Correlación de Pearson. Relación entre el Au y los elementos más importantes, tomando como base los análisis geoquímicos efectuados. Mina Aserradero Norte.

Como conclusiones de los datos de este gráfico, es posible afirmar que, efectivamente, la mineralización de Au se correlaciona de forma positiva y moderada (límite de baja), con As, Bi y Fe, concordante con la mineralización de pirrotina, arsenopirita y bismutinita. De forma contraria, se produce una relación nula con marmatita y galena y muy baja con Ag. Caso especial resulta el Cu, como calcopirita, el cual, según el gráfico, tiene una correlación nula con Au, lo cual podría implicar, a modo de hipótesis, que ambos elementos podrían ser producto de procesos de mineralización diferentes.

Respecto del sector de Aserradero Sur, los análisis de datos, usando la correlación de Pearson, y se observan en la tabla 4.4.

**Tabla 4.4. Datos de la Correlación de Pearson.** Efectuada para mostrar la relación entre los elementos de importancia económica de Mina Aserradero Sur.

N° de Datos	MINA ASERRADERO SUR - CORRELACIÓN PEARSON						
405	0,10	0,25	0,51	0,06	-0,08	-0,08	0,01
	Au-Zn	Au-As	Au-Bi	Au-Fe	Au-Cu	Au-Ag	Au-Pb

Gráficamente, se detallan los resultados en la figura 4.7.



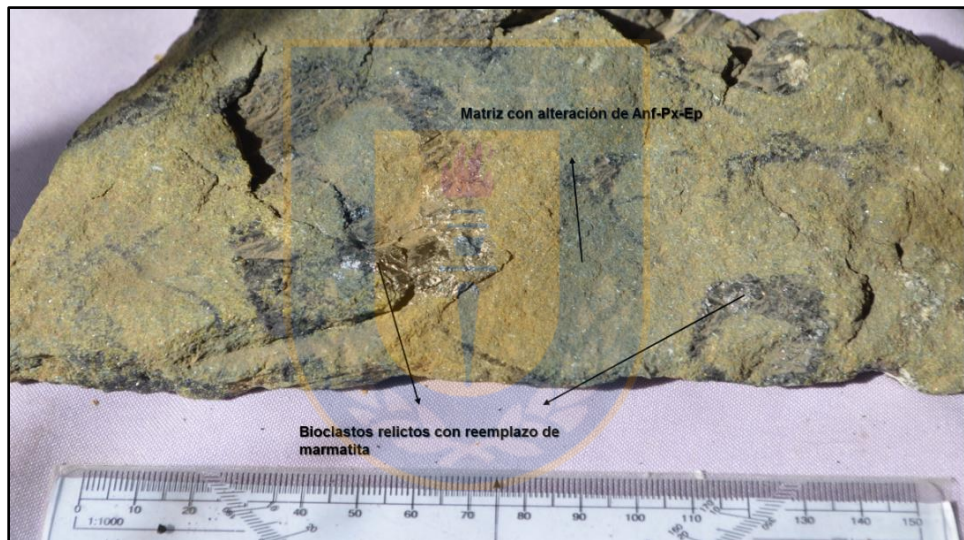
**Figura 4.7:** Gráfico de los Coeficientes de Correlación de Pearson. Relación entre Au y los elementos más importantes, tomando como base los análisis geoquímicos efectuados. Mina Aserradero Sur.

Como conclusiones de los datos del gráfico, es posible afirmar que, la mineralización de Au se correlaciona de forma positiva y moderada con Bi, como bismutinita, de forma muy baja, casi nula, con arsenopirita, marmatita y sulfuros de Fe y galena y de forma nula, con calcopirita y sulfosales de Ag. Esto también podría dar indicios de procesos de mineralización diferentes que

ocurrieron en el distrito. Esta asociación importante con Bi ya había sido reportada por Kakarieka (2006), por lo que este trabajo viene a corroborar lo señalado por este autor.

Es conveniente señalar que la presencia de arsenopirita, no indica, como se señaló en el capítulo introductorio, una relación directa con la mineralización de Au, ya que ésta obedece a un proceso de alteración, disminución de la temperatura y contacto con aguas meteóricas (Meinert, 2002), lo cual es concordante con el gráfico anterior.

En la fotografía 4.2 se aprecian los procesos de mineralización y alteración que ocurren en las secuencias de areniscas de este sector, evidenciando el reemplazo total de carbonato de los bioclastos, por mineralización sulfurada de Zn y Fe en la muestra de roca.



**Fotografía 4.2.** Mineralización de Mena y Alteración en Aserradero. Reemplazo selectivo de bioclastos por marmatita y pirrotina y en matriz, mineralización de anfíbol, piroxeno cálcico y epidota.

Por otra parte, las unidades de areniscas calcáreas que presentan mayor alteración y mineralización, infrayacen inmediatamente a la unidad de tobas bandeadas dado que estas unidades, a modo de hipótesis, forman un sello para el sistema hidrotermal y constituyen una barrera geoquímica para los fluidos mineralizadores que provienen del cuerpo magmático, la excepción está en algunas zonas de Porvenir, en las cuales presenta poco espesor, lo que permitió la mineralización de la secuencia de areniscas calcáreas sobreyacentes a través de fracturas.

Como se señaló anteriormente, siempre asociado a mineralización de Au, se evidencia la presencia de arsenopirita y bismutinita, sin embargo, esta asociación mineralógica se debe a la alteración presente, dado que en el sector de Mina Porvenir existe presencia de arsenopirita en diversos sectores, pero los análisis químicos no reportan cantidades mayores de Au o Co como si sucede en este sector de la mina.

Respecto de la influencia de las estructuras al proceso de mineralización, la falla Aurum (además de la falla Zinco-Aserradero pero que se dispone adyacente a ambos sectores), constituye una estructura de primer orden, que separa ambos sectores, norte y sur, y provoca una zonación de la mineralización y concentración aurífera, lo que se traduce en diferencias en las leyes, paragénesis de sulfuros y mineralogía de alteración predominante de anfíboles sobre piroxenos, lo que, a modo de hipótesis, ratifica la importancia de los factores estructurales dentro de este yacimiento.

Las estructuras más importantes se muestran en la figura 4.8, éstas controlan la disposición de la mineralización dentro de la zona Aserradero y son vías de circulación de fluidos hidrotermales, según evidencias de terreno obtenidas en la zona.



**Figura 4.8:** Mapa del Sector de Mina Aserradero Norte y Sur. Se expone, en línea azul, las principales fallas de primer orden de rumbo preferente NW-SE. Tomado de Mapa Geológico de Mina, 2012.

En resumen, en el sector de Aserradero se presentan dos zonas, Norte y Sur, que presentan características que difieren en mineralización metálica y alteración, separadas por factores estructurales de primer orden, como la falla Zinco-Aserradero y falla Aurum y falla Calama, principalmente, que controlaron la migración y dispersión de los fluidos mineralizadores que afectaron a las unidades de roca del Distrito.

Sumado a lo anterior, las diferencias petrográficas de las rocas hospedantes pudieron haber determinado la concentración de los minerales de mena presentes y las diferencias de leyes que existen en algunos elementos, tales como Au-Ag-Fe, dado que la presencia de carbonato incide en los procesos de precipitación de metales por neutralización ácida (Rabbia, O., comunicación verbal, 2017).

### **4.3. Sector Minas Profundas.**

#### **4.3.1. Descripción General.**

Se denominó Minas Profundas a zonas del distrito minero que, en términos litológicos y estratigráficos, corresponden a unidades de areniscas calcáreas de grano medio, en parte coquinoideas, que subyacen al Pórfido Riolítico y se disponen hasta el contacto de las areniscas calcáreas inferiores de la Formación Toqui con las unidades de tobas líticas y cristalolíticas de la Formación Ibáñez, que constituye el límite estratigráfico y de mineralización del Distrito.

La explotación de esta zona se inició en el año 2009, luego que, previamente a partir de lo que describe Kakarieka (2003) en el sector de Mina Estatuas (perteneciente al Distrito pero no analizada en este trabajo), se dispusieran campañas de sondaje en la zona, que pretendían establecer el límite inferior de la unidad de Pórfido Riolítico respecto de las unidades de areniscas de la Formación Toqui sobreyacentes, buscando establecer los límites superiores e inferiores de dicha unidad y la potencia relativa que posee.

Además, establecer de mejor manera el contacto con las rocas de la Formación Ibáñez que, por posición estratigráfica, sobreyacen a las unidades de Pórfido Riolítico y las areniscas calcáreas y que se han identificado en otras áreas de la zona en estudio.

Sin embargo, diversos sondajes interceptaron bajo la unidad de pórfido a una secuencia de areniscas calcáreas, similares a las unidades sobreyacentes al pórfido y que también se asociaron a la Formación Toqui, que presentan alteración de tipo skarn en una etapa retrógrada y pervasiva compuesta de principalmente de anfíbol, sumado a piroxeno, granate y epidota en la matriz, respectivamente, y cuyos análisis geoquímicos evidenciaron mineralización de Au nativo y electrum, además de presencia de arsenopirita-bismutinina, marmatita, calcopirita y en menor proporción, pirita.

El descubrimiento de estas secuencias de areniscas, que, en promedio, tienen hasta 16 m de potencia, permitió expandir la vida útil, los recursos metálicos y los volúmenes de explotación de la mina.

Al igual que en el sector de Mina Aserradero, se usarán los datos de correlación de Pearson para evaluar la dependencia de la mineralización de Au con el resto de los metales más representativos.

A continuación, se analizarán los sectores de Mina Profunda Norte, Mina Profunda 3 y Mina Profunda Oeste, respectivamente, que fueron agrupadas de esta forma para considerarlas como un conjunto de minas que se disponían bajo la unidad de Pórfido Riolítico.

#### **4.3.2. Mina Profunda Norte.**

Se ubica en la zona noroccidental del distrito y corresponde a una secuencia de areniscas calcáreas de grano medio, los bioclastos no se identifican fácilmente dado que se encuentran obliterados por la alteración retrógrada y el reemplazo por mineralización sulfurada y silicatada de alteración.

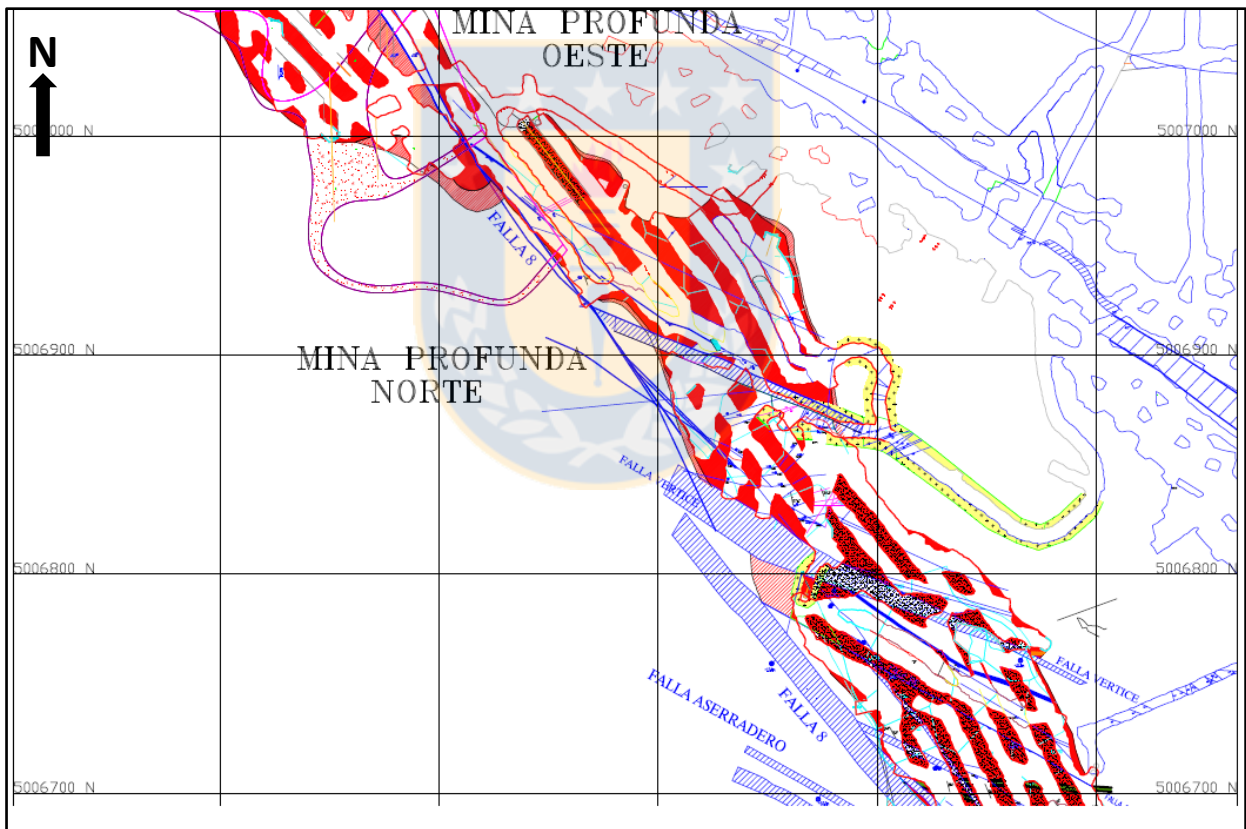
En términos estratigráficos, estas unidades subyacen a la unidad de Pórfido Riolítico y pertenecen a la unidad de Areniscas Inferiores, descritas en el Capítulo 2.

Presentan una mineralización metálica compuesta, en orden de abundancia, de marmatita, arsenopirita, arsenopirita, Au nativo, electrum, bismutinina, cobaltita y, en menor abundancia, calcopirita y pirita. Se observa, a partir de datos de terreno, una disminución considerable en la presencia de pirrotina.

La mineralización de alteración está compuesta de anfíbol, piroxenos y granates cálcicos y epidota menores que alteran principalmente a la matriz. La potencia de las areniscas, según datos de terreno, es de hasta 10 m desde el contacto gradacional, en el límite inferior, con las tobas líticas de la Formación Ibáñez, hasta el contacto neto con la unidad de Pórfido Riolítico que sobreyace en conformidad a esta unidad.

En términos estructurales, el sector está delimitado por fallas de tipo normales de rumbo entre  $N30^{\circ}$ - $50^{\circ}$ W subverticales, tales como la falla 8, falla Vértice y otras fallas menores.

En la figura 4.9 se muestra un plano con la ubicación del sector de Mina Profunda Norte.



**Figura 4.9:** Mapa de Mina del Sector Mina Profunda Norte. Tomado de Mapa Geológico de Mina, 2012.

#### 4.3.2.1. Análisis de los Procesos de Mineralización.



Uno de los aspectos relevantes de este sector del distrito es la potencia de la secuencia de areniscas calcáreas, alcanzando hasta los 10 m. Además, según datos de terreno, es posible apreciar que los procesos de alteración y mineralización afectan selectiva y pervasivamente a bioclastos y matriz, respectivamente.

La presencia mayoritaria de marmatita y arsenopirita, sulfuros dominantes en estos sectores, es acompañada con concentraciones de Au y Ag importantes evidenciándose, además, ausencia de pirrotina, que en otras zonas del yacimiento tiene incidencia en leyes más bajas de Au y Ag ( $< 3$  gr/t Au y  $< 15$  gr/t Ag, respectivamente), pero en el caso de Mina Profunda Norte alcanza valores sobre los 10 gr/t Au y 6 gr/t Ag.

Esta paragénesis, a modo de hipótesis, es resultado de dos factores principales: el primero, una fuente de metales rica en S, Fe, Zn, Au, Ag y As como elementos metálicos mayores respectivos, y en segundo lugar se puede deducir la existencia de halos de zonación geoquímica donde se produce la interacción de fluidos hidrotermales provenientes de centros volcánicos aledaños a la cuenca que rodean a los estratos de areniscas calcáreas (Wellmer y Reeve, 1983), esto se traduce en que las temperaturas involucradas en los procesos de alteración de tipo retrogrado pueden variar y las características de los fluidos hidrotermales de origen magmático son los factores principales de los procesos mineralizadores (Pirajno, 2009).

Meinert (2000), detalla un tipo de depósitos denominados Skarn de Au Reducidos, que consisten en depósitos de altas leyes de Au (de entre 5-15 gr/t Au y superiores), que contienen pobres concentraciones de otros metales y tienen una distintiva asociación geoquímica compuesta por menas de Au-Bi-Te-As, que concuerda con los datos geoquímicos recopilados y la mineralogía de mena reportada en los análisis.

En cuanto a la mineralización de alteración, se evidencia presencia mayoritaria de anfíbol y piroxenos cálcicos, y menores cantidades de granate, lo que evidencia que esta mina, dentro del skarn, está ubicada en zonas más distales a los centros a los cuerpos intrusivos responsables de los procesos de mineralización, lo que se suma a las altas concentraciones de Au en los análisis (Myers, 1994 en Franchini y otros, 2002)

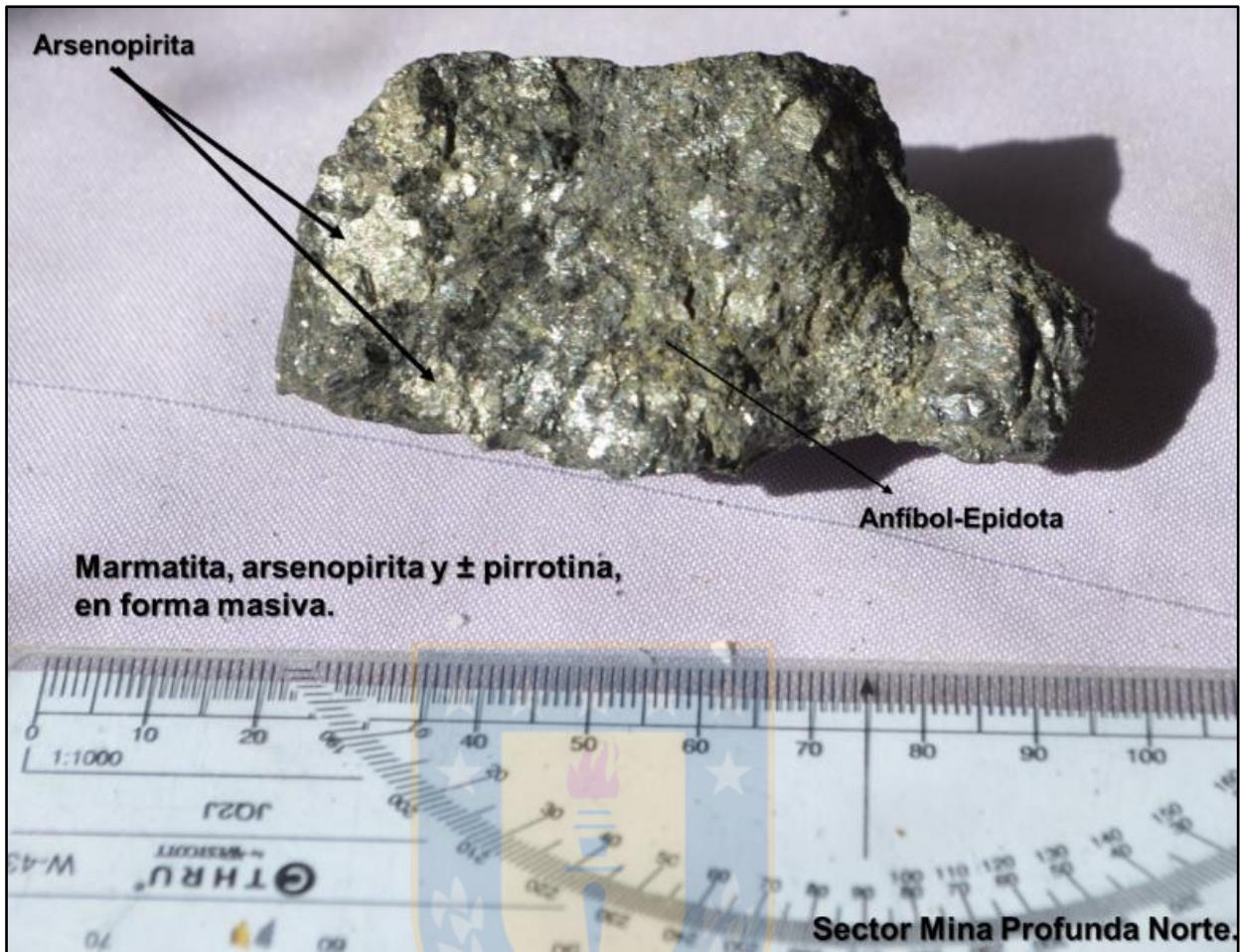
En la fotografía 4.3, se muestra la alteración retrógrada característica de anfíbol predominante y piroxeno, en menor cantidad granates, sumado a marmatita y pirrotina las cuales albergan la mineralización de Au nativo (en tamaño de unos pocos  $\mu$ ).



**Fotografía 4.3.** Muestra de Roca de Mina Profunda Norte. Donde se aprecia la alteración retrógrada formada principalmente por anfíbol y menores cantidades de piroxeno y epidota.

En la fotografía 4.4 es posible apreciar la mineralización casi exclusiva de marmatita y arsenopirita, que, además, permite inferir que existe mineralización de Au, según los datos geoquímicos y la asociación mineral de mena y alteración presentes.

Cabe destacar el reemplazo total de la matriz de la arenisca calcárea por mineralización sulfurada evidenciada en esta muestra, lo cual, según datos de terreno, se dispone como mantos de mineralización masiva que son muy favorables para la actividad minera desarrollada en el distrito y las leyes y recuperaciones de mineral.



**Fotografía 4.4. Muestra de Roca de Mina Profunda Norte.** Se evidencia la mineralización masiva de marmatita, arsenopirita. Según asociación paragenética de mena y alteración, es posible inferir contenido económico de Au-Ag-Bi.

Según Wood y Samson (1998, en Robb, 2005), las fuentes hidrotermales en las cuales pueden precipitar Zn y Fe tienen como ligandos principales al  $\text{Cl}^-$  y  $\text{HCO}_3^-$  y, en presencia de altas temperaturas (sobre  $400^\circ\text{C}$ ) y altas salinidades, indican que coexisten los complejos  $\text{FeCl}^-$  y  $\text{ZnCl}^+$ - $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{ZnCl}_3$  y  $\text{ZnCl}_4$ , para estos dos elementos formadores de minerales de mena como Marmatita ((Zn, Fe) S), sulfuro dominante en este sector del yacimiento.

En cuanto a la salinidad de los fluidos hidrotermales, a modo de hipótesis (por falta de datos de inclusiones fluidas en las areniscas inferiores), dadas las similitudes geoquímicas evidenciadas en otros yacimientos de skarn de Au de alta ley (Fortitude, Crown Jewel, entre otros), puede indicarse que los estudios de inclusiones fluidas presentes en piroxenos y granates presentan valores de entre 9-18% en porcentaje en peso en NaCl equivalente, con minerales dispersos en halita que incluso

pueden alcanzar un 38% en peso de NaCl equivalente, en consecuencia, estas altas salinidades pueden indicar que los fluidos hidrotermales de alta temperatura, responsables de los procesos metalogénicos, sean capaces de transportar cantidades importantes de Au en complejos clorurados a través de las estructuras presentes y en poros a través de la roca hospedante (Gammons y William-Jones, 1997), produciendo una mineralización de alta ley en este tipo de depósito mineral.

Para el caso de la Ag, comparte el mismo ligando que el Au, es decir, el bisulfito ( $\text{Ag}(\text{HS})_2^-$ ) (Wood y Samson, 1998, en Robb, 2005), ocurriendo el mismo proceso de mineralización-alteración descrito anteriormente.

Grant (1988), detalla un estudio de inclusiones fluidas en cuarzo realizadas en Junction Reef, Australia, que corresponde a un yacimiento tipo skarn de Au con características mineralógicas y petrográficas similares al Distrito El Toqui, donde señala que las inclusiones fluidas, en cuarzo y calcita, tienen temperaturas de homogeneización de 325-345°C y salinidades de sobre 26% en peso equivalente, concordantes con la paragénesis mineral observada en la zona de estudio.

A partir del trabajo de Palacios (1996), el cual identifica 3 episodios de mineralización metálica que afectan a las unidades de roca (descritos en el capítulo 5.2), puede decirse que el último evento, con mineralización sulfurada de arsenopirita, cobaltita, bismutinita y menas de Au y Ag, corresponde a una etapa donde el Au se presenta como ligando del ion bisulfito ( $\text{Au}(\text{HS}_2)$ ), dentro de condiciones de Ph débilmente ácido a básico. Este es un complejo mayoritario de los fluidos hidrotermales y es estable en un amplio rango de temperaturas.

Esto lleva a inferir que la fuente mineralizadora fue, inicialmente, de alta temperatura y salinidad, permitiendo la precipitación de marmatita, pirrotina y pirita, como sulfuros primarios, junto con la mineralización de alteración de la matriz compuesta de feldespatos, ferromagnesianos y bioclastos, progresivamente a granate, piroxenos, calcita y epidota. En un proceso siguiente de alteración-mineralización, y ya en condiciones de menor temperatura e interacción con aguas meteóricas que generan Ph más básicos y menor salinidad, se precipitan las menas de Au, Bi, Ag y As, con la consiguiente formación de anfíboles de tipo retrogrado que altera la matriz de la arenisca calcárea. Pirajno (2009), describe que en los depósitos tipo Skarn de Au reducidos se evidencian altas leyes de Au (sobre 5 gr/t Au), en asociación directa con intrusivos dioríticos-granodioríticos e importante paragénesis asociada de menas de Bi-As y Co, respecto de la alteración, presencia

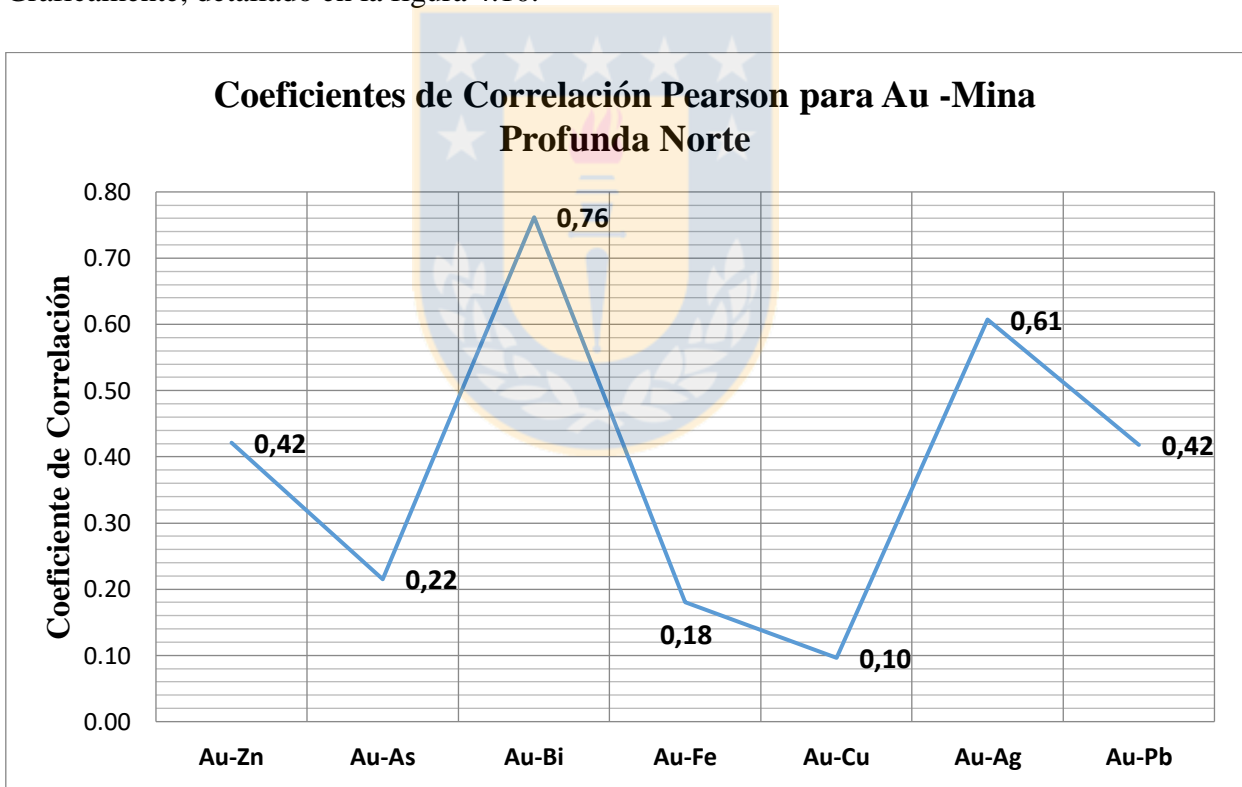
importante de anfíboles, granates y piroxenos ricos en Fe, lo que concuerda con lo que se observa en este sector del Distrito, en términos de leyes y mineralogía de mena y alteración.

Usando la Correlación de Pearson, se obtienen los siguientes resultados, descritos en la tabla 4.5.

**Tabla 4.5. Datos de la Correlación de Pearson.** Efectuada para mostrar la relación entre los elementos de importancia económica de Mina Profunda Norte.

N° de Datos	MINA PROFUNDA NORTE- CORRELACIÓN DE PEARSON						
1155	0,42	0,22	0,76	0,18	0,10	0,61	0,42
	Au-Zn	Au-As	Au-Bi	Au-Fe	Au-Cu	Au-Ag	Au-Pb

Gráficamente, detallado en la figura 4.10.



**Figura 4.10: Gráfico de los coeficientes de Correlación de Pearson.** Relación entre Au y los elementos más importantes. Tomando como base los análisis geoquímicos efectuados. Mina Profunda Norte.

Como conclusiones preliminares de los datos del gráfico, es posible afirmar que, la mineralización de Au se correlaciona de forma positiva y alta, con Bi y Ag, como bismutinita y Ag nativa o

sulfosales de Ag, de forma positiva pero moderada con marmatita y galena, de forma baja con arsenopirita. Por último, se correlaciona de forma muy baja, casi nula, con pirrotina y calcopirita.

Esto lleva a plantear hipótesis respecto de distintos procesos de mineralización ocurridos en el distrito y que apuntan a que, al igual que Aserradero, la relación paragenética de Au con Bi es muy importante. En segundo lugar, existe una relación más estrecha de la mineralización aurífera con sulfosales de Ag, marmatita y galena.

En tercer lugar, es baja la relación con pirrotina y arsenopirita, lo que evidencia condiciones fisicoquímicas diferentes en el proceso metalogénico, principalmente en la temperatura de formación entre Au nativo y pirrotina y, como se ha indicado en la parte introductoria, señalado por Kakarieka, (2006), que la mineralización de arsenopirita, si bien se relaciona positivamente con Au, ésta corresponde a un proceso de mineralización más bien relacionado con minerales de alteración como anfíboles, que a una estrecha relación entre Au y As.

Por último, es posible señalar que sigue siendo nula la relación aurífera con calcopirita, evidenciando posibles procesos diferentes de mineralización y bajo distintas condiciones fisicoquímicas, a modo de hipótesis.

En términos estructurales, la cercanía con estructuras de primer orden, como la falla 8 y falla Vértice, que son canalizadoras de mineralización para los fluidos hidrotermales que provienen de cuerpos magmáticos más profundos que permiten la precipitación de Au y Ag nativos, además de sulfuros de Zn, As y Fe, según las etapas de mineralización y condiciones fisicoquímicas de precipitación de estos minerales.

En términos de leyes geoquímicas, el sector de Mina Profunda Norte presenta niveles estratigráficos con concentraciones económicamente favorables de Au y Ag, en menor grado Zn y Fe. Esto se suma a la potencia de estas secuencias y la homogeneidad de las leyes de mineral que se evidencia en cada uno de los niveles, lo cual entrega, además de leyes favorables de metal, tonelajes importantes para la explotación de la mina. Como se describió anteriormente, este sector, por mineralogía de mena y alteración y leyes geoquímicas de Au y otros metales, corresponde a un depósito tipo skarn de Au reducido, similar a Fortitude y Hedley (Meinert, 1992).

### 4.3.3. Mina Profunda 3.

Este sector del yacimiento se ubica en el extremo sur y corresponde al área de mayor profundidad en ser explotado, ubicándose a más de 300 m bajo la superficie. Se dividió en los sectores norte y sur, respectivamente, para diferenciar el proceso de explotación de estas áreas de la mina.

Petrográficamente, este sector agrupa a areniscas calcáreas de grano medio con algunos bioclastos relictos centimétricos, presentes en forma diseminada. Conviene destacar que se observa que la cantidad de bioclastos relictos disminuye en la roca hospedante.

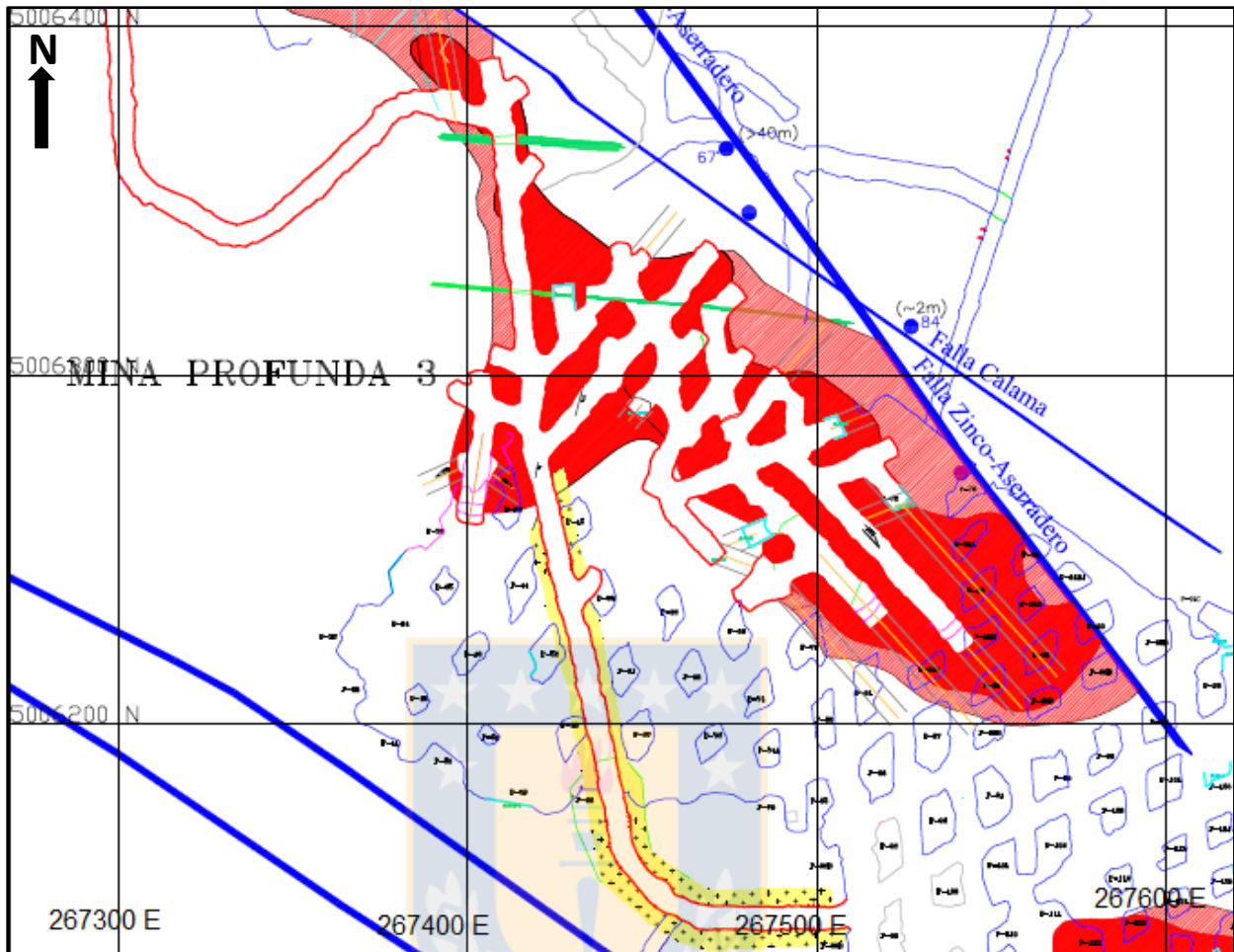
En términos estratigráficos, al igual que todos los sectores denominados Minas Profundas, estas secuencias de areniscas se encuentran infrayaciendo la unidad de Pórfido Riolítico y, en este sector en particular, a diferencia del sector de Mina Profunda Norte (descrito anteriormente), la potencia de la secuencia de areniscas calcáreas disminuye, evidenciándose espesores de hasta 5 m hasta el contacto gradacional con las unidades volcánicas de la Formación Ibáñez. Estas secuencias presentan un manto de alrededor de 30° al SSE, aproximadamente.

La mineralización de mena corresponde a pirrotina, marmatita, arsenopirita, electrum y Au nativo, sulfosales de Ag, bismutinita y cantidades menores de calcopirita y cobaltita. En contrapartida, la mineralización de ganga comprende piroxeno cálcico, anfíboles, menores cantidades de granate del tipo grosularia y piritita restringida a estructuras, respectivamente.

Dentro de estos sectores fueron identificados algunos diques subverticales, de rumbo aproximado E-W, que cortan las secuencias de areniscas calcáreas, la composición principalmente es basáltica-diorítica y presentan una textura microgranular, localmente porfídica.

En términos de mineralización son identificadas algunas concentraciones menores de piritita diseminada dispuestas en la masa fundamental.

En la figura 4.11 se visualiza un mapa de mina del sector de Mina Profunda 3 con las diferentes labores y estructuras identificadas en la zona.



**Figura 4.11:** Mapa Sector de Mina Profunda 3. Labores en Explotación. En relleno rojo sectores por explotar. En línea azul se aprecian las estructuras principales del sector, de rumbo NW-SE. En línea verde se identifican diques de composición basáltica-diorítica. Tomado de Mapa Geológico de Mina, 2012.

#### 4.3.3.1. Análisis de los Procesos de Mineralización.

Los datos aportados por los análisis geoquímicos efectuados en este sector de Mina Profunda 3, indican variabilidad de las concentraciones de Au y Ag en las diferentes labores y variaciones porcentuales importantes en las leyes de Zn y Fe en las distintas labores que componen la denominada Mina Profunda 3.

En relación a la mineralogía de alteración, este sector presenta una abundancia de piroxenos (representados por diópsido-hedenbergita) y granate-Ca, por sobre anfíbol en la matriz de las areniscas, es decir, un dominio de mineralización de alteración de tipo progrado por sobre la alteración retrograda que se manifiesta en anfíbol y epidota como silicatos mayoritarios.



Esto lleva a inferir que la superposición de esta la alteración de tipo retrógrada no es total en este sector de la mina. Cabe señalar que en la alteración progrado involucra la introducción de Si, Al y Fe dentro de los sedimentos calcáreos por medio de los fluidos magmáticos en una etapa previa a la precipitación de los metales derivados de estos fluidos al disminuir la temperatura y producirse la interacción con aguas meteóricas en un proceso retrógrado que involucra condiciones más superficiales (Robb, 2005).

Otro punto que considerar, tal como indica Barnes (1979b, en Robb, 2005), es que los factores que promueven la precipitación de los complejos sulfuro-metales pueden ser, en cierto modo, diferentes a aquellos formados por complejos clorurados-metálicos.

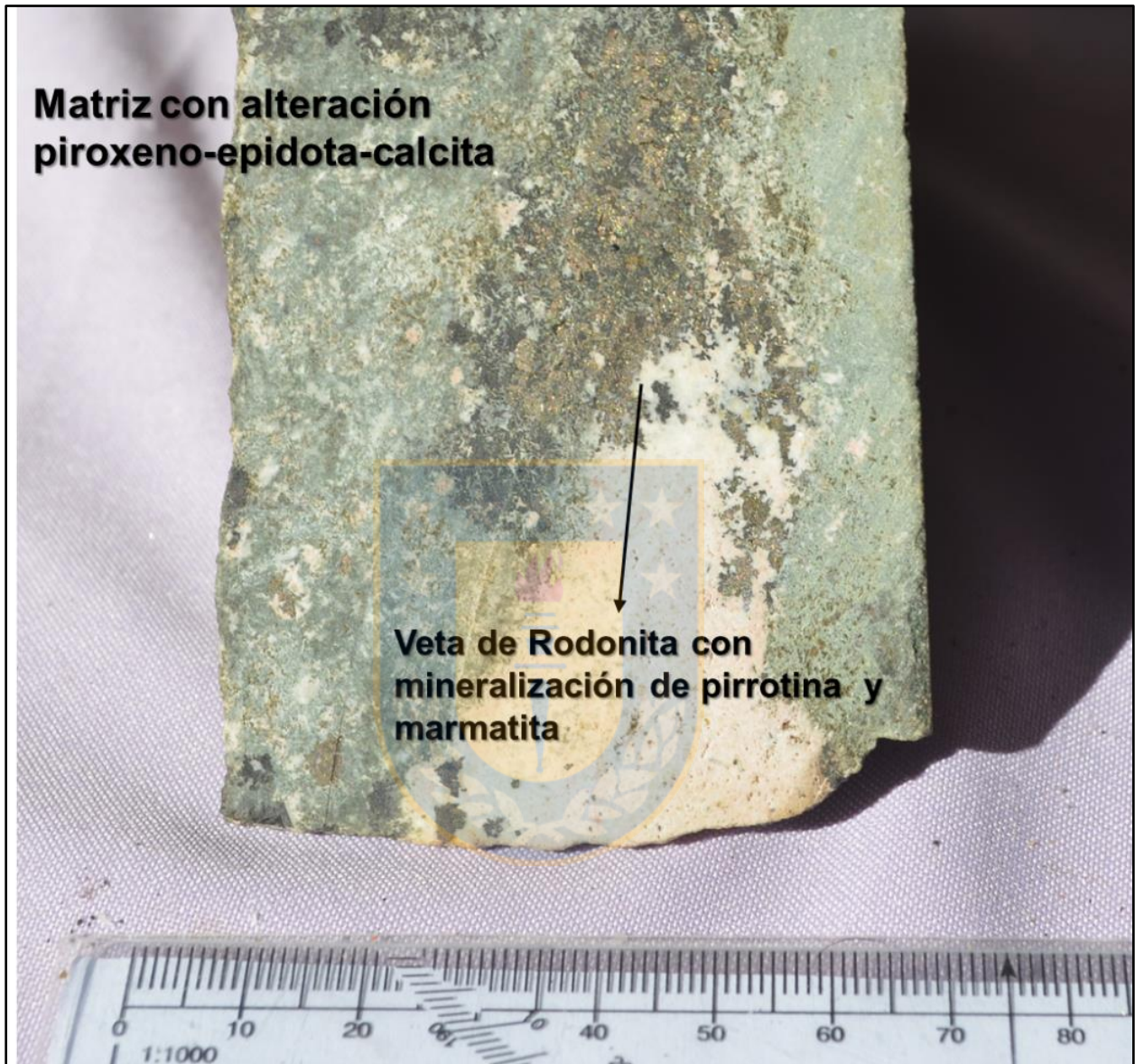
Como se ha indicado anteriormente, aunque la mezcla de fluidos (o dilución), y la disminución de la temperatura del sistema, favorecen la precipitación metálica desde las fuentes hidrotermales, es la oxidación del fluido de mena lo que resulta ser más efectivo en la disminución de las solubilidades de los complejos sulfuro-metales y, por ende, la abundancia modal de minerales de mena sulfurados como evidencia de terreno (Robb, 2005).

Según los datos geoquímicos obtenidos en el yacimiento, muchas zonas de esta mina presentan concentraciones de leyes variables entre cada uno de los avances realizados en su explotación, aunque, por otro lado, algunas presentaron concentraciones importantes de ley de Au, pero restringida a niveles de areniscas calcáreas específicas dentro del frente de explotación, limitadas por niveles de tobas de cenizas centimétricos.

En la fotografía 4.5 se aprecia una sección de una veta de rodonita ( $\text{MnSiO}_3$ ) con pirrotina y, en menor cantidad, marmatita.

Como mineralización de alteración se observa piroxeno cálcico, epidota y, en menor proporción, anfíbol, lo que evidencia procesos de skarn de tipo retrógrado temprano con predominancia de mineralogía de tipo progrado en este sector, permitiendo inferir que los procesos de mineralización metálica tuvieron relación con una incompleta secuencia de formación del proceso tipo skarn evidenciado por autores como Meinert (1993), que indican que los procesos de mineralización

para los depósitos de tipo skarn se producen en la etapa retrógrada, que concuerda con lo señalado por Robb (2005).

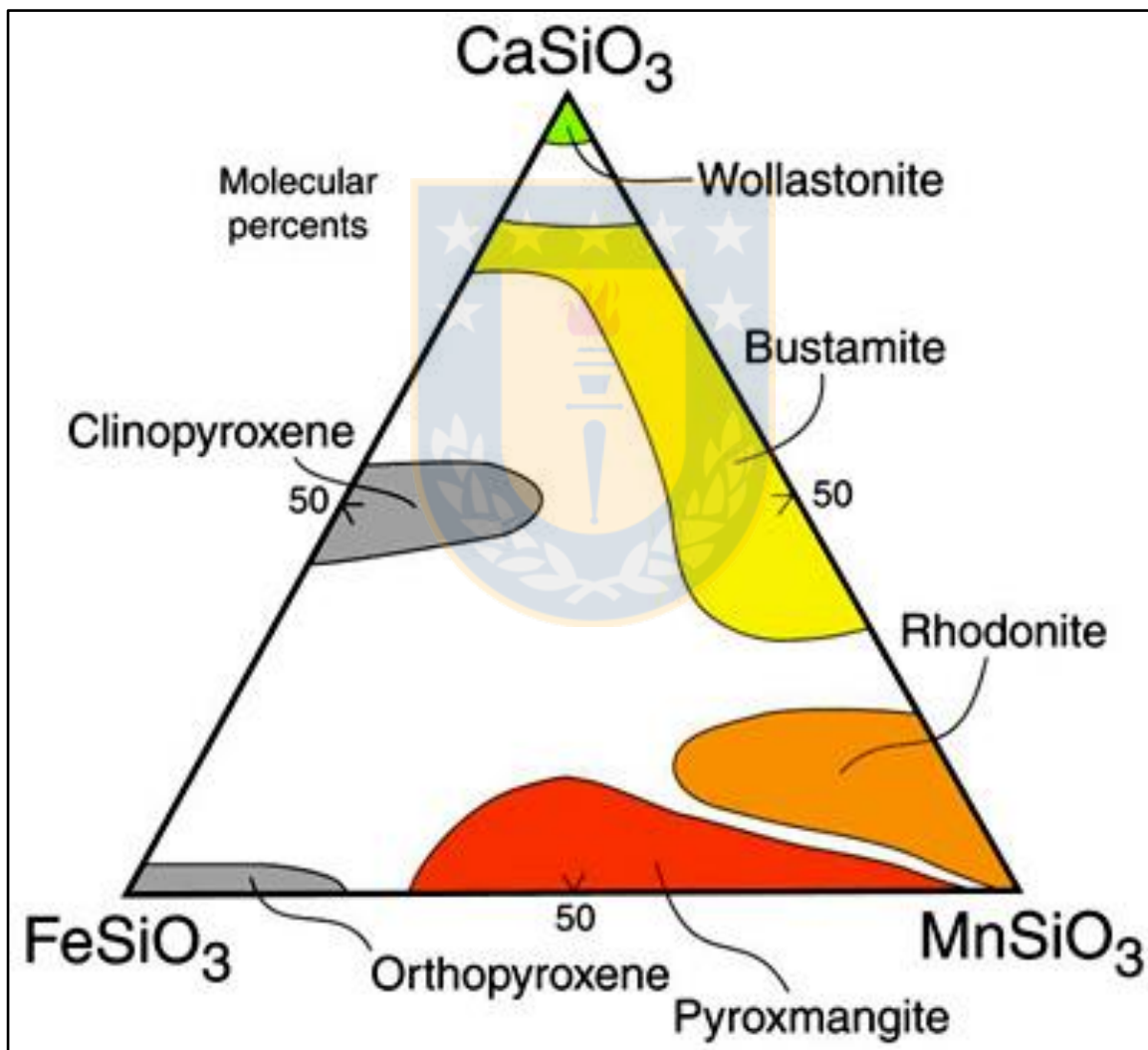


**Fotografía 4.5. Muestra de Roca de Mina Profunda 3.** Donde se evidencia la veta de rodonita con mineralización de pirrotina y marmatita, asociada a una alteración progrado de skarn con predominancia de piroxeno y epidota.

De lo anterior, y como se señaló en el capítulo 4.3.2.1, Wood y Samson (en Robb, 2005), identifican que la precipitación de Zn y Fe, para este tipo de depósitos, ocurre en temperaturas de alrededor de 400°C. Sin embargo, es posible inferir que, dada la presencia mayoritaria de alteración de piroxeno y granate, sumado a la presencia de rodonita y pirrotina como sulfuros

mayoritarios, indicar temperaturas más altas de formación en esta zona del yacimiento. Tal como indica Klein y Hurlbut (1993), que identifican diagramas de formación de piroxenoides y piroxenos, entre ellos rodonita, en el sistema ternario  $\text{CaSiO}_3\text{-FeSiO}_3\text{-MnSiO}_3$ , se evidencia que las condiciones de presión y temperatura de formación de esta paragénesis son de aproximadamente  $600^\circ\text{C}$  y 6 kilobares de presión, respectivamente.

En la figura 4.12 se dispone el diagrama ternario del sistema  $\text{CaSiO}_3\text{-FeSiO}_3\text{-MnSiO}_3$ , donde se expone la situación anteriormente descrita.



**Figura 4.12: Diagrama Ternario de Composición de Piroxenos-Piroxenoides.** Las temperaturas estimadas de formación en este sistema ternario están alrededor de  $600^\circ\text{C}$  y 6 Kb de presión. Tomado de Klein y Hurlbut (1993).

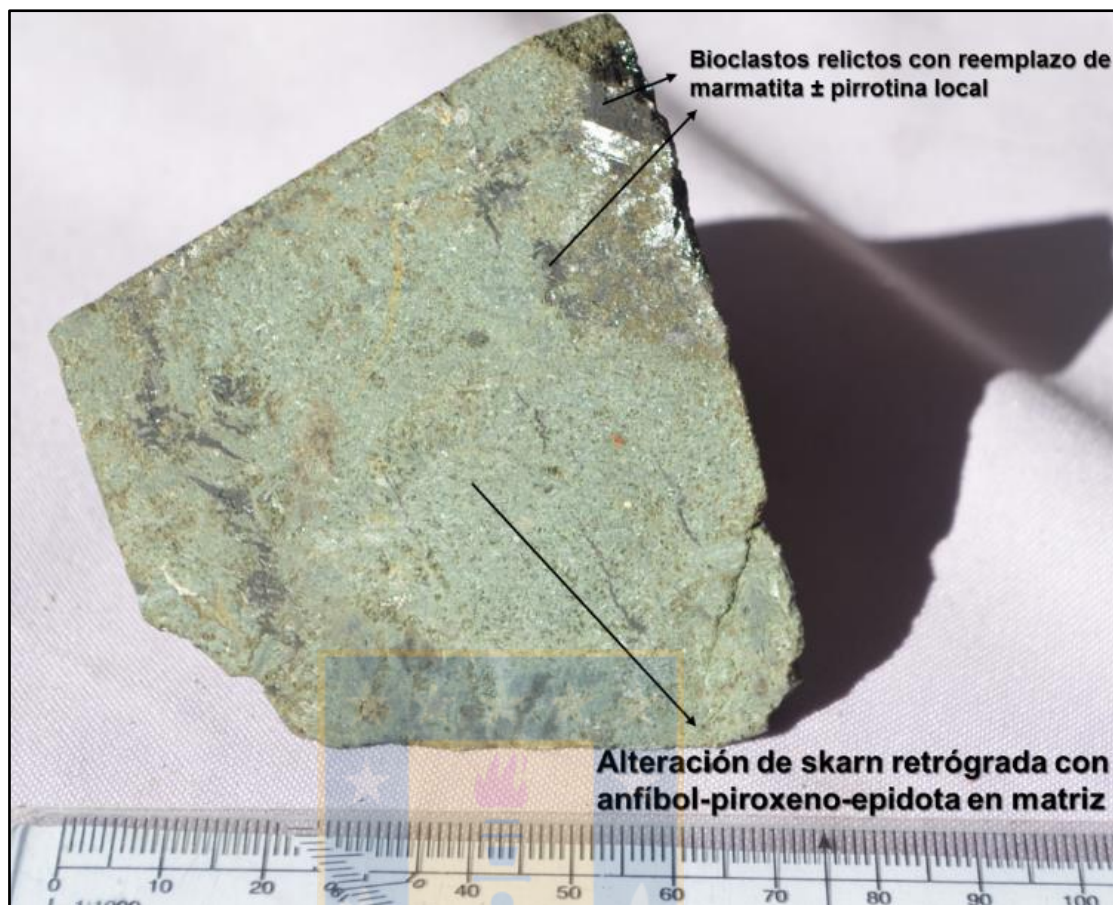
A modo de hipótesis, respecto de los procesos de mineralización de mena, es posible agregar que la fuente de metales no es homogénea y depende de elementos químicos de transporte desde los fluidos magmáticos.

También es posible indicar que la mineralogía de alteración presente en esta zona, en relación a la zonación de un skarn, va en directa relación a las temperaturas de enfriamiento y a la evolución de los fluidos hidrotermales involucrados que provienen del cuerpo magmático (Pirajno, 2009).

Lo anterior se verifica, además, con la mayor presencia de piroxeno, como mineral de alteración dominante de la matriz, que indica procesos de mayor temperatura y menor interacción con aguas meteóricas que puedan indicar una etapa retrógrada dentro del skarn (Meinert, 1992), usando argumentos mineralógicos.

Esto puede tener relación en que esta zona, al momento de producirse los procesos de mineralización de mena y alteración, estuvo sometida a temperaturas más altas y no en condiciones de profundidad superficiales a una interacción efectiva con aguas meteóricas (menos de 3 km), por cuanto, como se ha señalado anteriormente en el capítulo 4.1, la interacción con aguas superficiales favorece disminución de la temperatura y la precipitación y, por sobre todo, la difusión de los metales en las rocas hospedante, tal como señala Meinert (2000).

Para evidenciar que el sector en estudio presenta variabilidades en los procesos de mineralización y alteración de skarn, en la fotografía 4.6 se presenta una muestra de roca del sector de Mina Profunda 3, donde se identifica la existencia de marmatita y pirrotina, asociada a una alteración de anfíbol, piroxeno y, en menor medida, granates, lo que, a modo de hipótesis, evidencia que la mineralogía de mena y alteración que se presenta en esta zona no es homogénea a lo largo de los sectores norte y sur y evidencia que las condiciones fisicoquímicas fueron variables durante los procesos de mineralización.



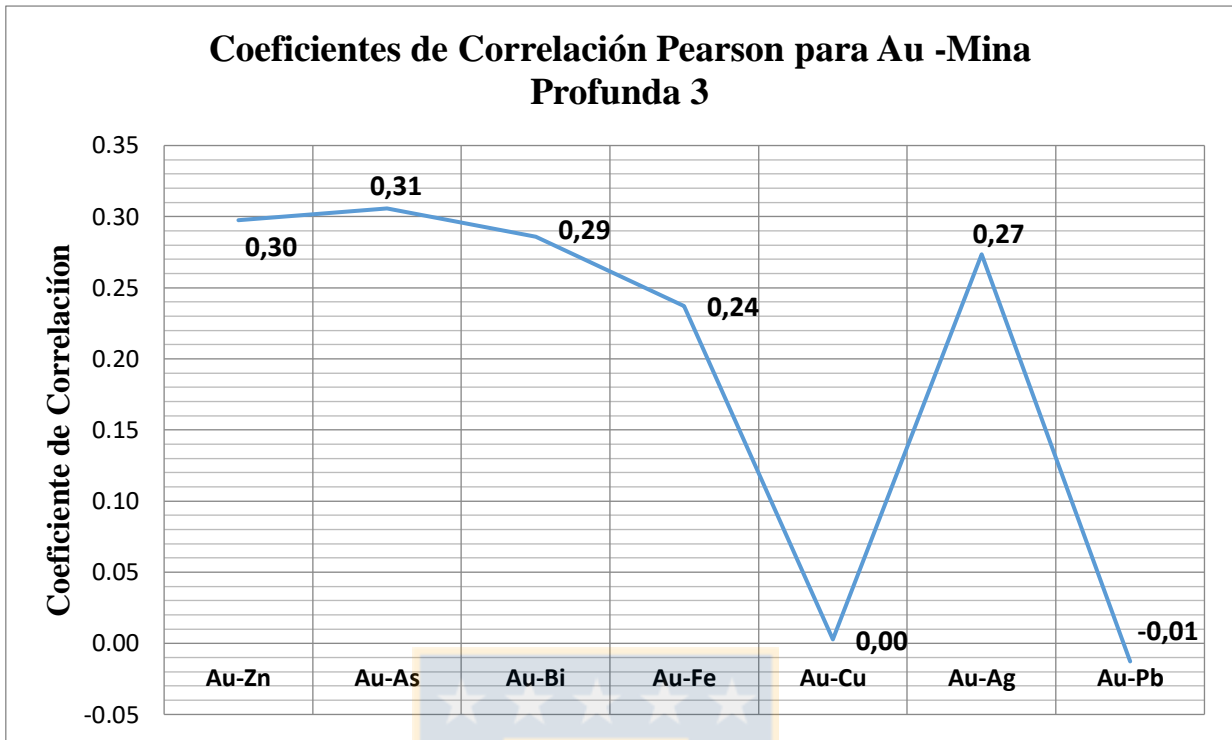
**Fotografía 4.6.** Muestra de Roca del Sector Mina Profunda 3 Sur. Se evidencia mineralogía de mena y alteración de skarn presentes en esta zona.

Para corroborar los argumentos anteriormente descritos, se utilizará la correlación de Pearson para los análisis geoquímicos efectuados a las muestras extraídas de Mina Profunda 3, y en donde los resultados se muestran en la tabla 4.6.

**Tabla 4.6** Datos de la Correlación de Pearson. Efectuada para mostrar la relación entre los elementos de importancia económica de Mina Profunda 3.

N° de Datos	MINA PROFUNDA 3- CORRELACIÓN DE PEARSON						
	1317	0,30	0,31	0,29	0,24	0,00	0,27
	Au-Zn	Au-As	Au-Bi	Au-Fe	Au-Cu	Au-Ag	Au-Pb

Gráficamente, en la figura 4.13.



**Figura 4.13: Gráfico de los Coeficientes de Correlación de Pearson.** Relación entre Au y los elementos más importantes. Tomando como base los análisis geoquímicos efectuados. Mina Profunda 3.

Como conclusiones preliminares que pueden realizarse a partir de los datos del gráfico, se observa que la mineralización de Au se correlaciona de forma positiva pero baja, con marmatita, arsenopirita, pirrotina y sulfosales de Ag, de forma negativa pero muy baja con galena y de forma neutra con calcopirita. Lo anterior viene a corroborar la poca homogeneidad de la mineralización aurífera y su relación con los demás elementos y que, a modo de hipótesis, podría corroborar que este sector del distrito estuvo sometido a condiciones de altas temperaturas y profundidad importante, que fueron factores determinantes en definir condiciones poco favorables para la precipitación metálica desde las fuentes hidrotermales. Según Hedenquist y Aoki (1991), la precipitación de Au y Ag en depósitos de más alta temperatura (Epitermales), provenientes directamente de fumarolas volcánicas, sin ningún proceso de dilución o mezcla, debajo de la superficie son menos conductivas para la formación de depósitos económicos de metales, lo que podría ser consecuencia de la poca homogeneidad de las leyes y las bajas correlaciones entre Au con el resto de los metales, tomando en cuenta que la zona en estudio se formó a partir de la actividad de arcos volcánicos adyacentes a cuencas sedimentarias marinas y que la posición

estratigráfica de estos sectores de la mina corresponden a la transición de un ambiente volcánico importante (Formación Ibáñez), hacia un paleoambiente marino (Formación Toqui).

Otra conclusión que puede obtenerse es que, dada la nula correlación de Au con galena (Pb), y siendo éste último un mineral de más alta temperatura de formación, determinado entre 400-550°C por Karup-Moller y Pauly (1979), darían más argumentos respecto de que el sector de Mina Profunda 3 estuvo sometido a altas temperaturas y en ambiente más profundo que los sectores de Aserradero y Mina Profunda Norte, lo que no permitió una mineralización aurífera de más altas leyes y homogénea en su distribución areal en las areniscas calcáreas.

Por último, al igual que en todos los sectores antes descritos, la calcopirita tiene una correlación nula con Au, que podría indicar un proceso de mineralización diferente.

En relación con los factores estructurales presentes, esta zona presenta estructuras principales de orientación NW-SE principales, representadas por la falla Zinco-Aserradero, ver figura 4.11, las leyes favorables de Au, Zn y Ag se concentran en las zonas proximales de estas estructuras según datos geoquímicos, estructurales y estratigráficos realizados en la explotación de estos sectores.

Cabe señalar que, al no identificarse otras estructuras de primer orden, sino estructuras más bien secundarias y de rumbo preferente NW-SE, aparte de la falla Zinco-Aserradero, la mineralización de mena es variable en términos de abundancia modal, lo que lleva a inferir que los procesos mineralizadores, aparte de lo descrito sobre la correlación entre Au y los demás metales, que las condiciones fisicoquímicas de los complejos clorurados que transportaron los metales desde la fuente no tuvieron los canales de distribución adecuados y solo se restringieron favorablemente a las zonas aledañas de la falla Zinco-Aserradero y otras estructuras subsidiarias menores y según las propiedades de permeabilidad de la roca hospedante, según lo señalado por Robb (2005).

Otro factor importante que considerar es la potencia de la secuencia de areniscas, que alcanza su menor valor respecto de las otras unidades litológicas presentes en la zona de las Minas Profundas. Además, en relacionar las menores cantidades de carbonato (o relictos de bioclastos) evidenciados, los que son capaces de reaccionar con los fluidos mineralizadores y favorecer la precipitación de los metales por neutralización ácida (Rabbia, O., comunicación verbal, 2017).

Como se ha detallado respecto de los depósitos de tipo skarn y, en general de los procesos de mineralización de tipo hidrotermal-magmático, las temperaturas y características fisicoquímicas de los fluidos hidrotermales juegan un papel fundamental en los procesos de mineralización en un depósito mineral como de este distrito pero, como argumento adicional, las características litológicas y estratigráficas de la roca hospedante también son determinantes para la influencia y alcance de los procesos mineralizadores de alteración y para la precipitación de los metales desde la fuente. Ambos factores tienen incidencia en la concentración, abundancia y leyes de mena presentes en este tipo de depósitos.

Para el caso de Mina Profunda 3, los factores litoestratigráficos, estructurales y las características geoquímicas de los fluidos hidrotermales, sumado a evidencias de temperaturas más altas que otros sectores analizados, se traducen en una dispersión importante de las leyes y la concentración de mineralización de mena dentro de las labores explotadas.

#### **4.3.4. Sector Mina Profunda Oeste.**

Se ubica en el extremo NW de la zona de las denominadas Minas Profundas y corresponde a una secuencia de areniscas calcáreas, en parte coquinoideas, cuyas potencias estimadas en terreno alcanzan los 16 m, siendo la secuencia de mayor potencia evidenciada dentro de las zonas de minas profundas.

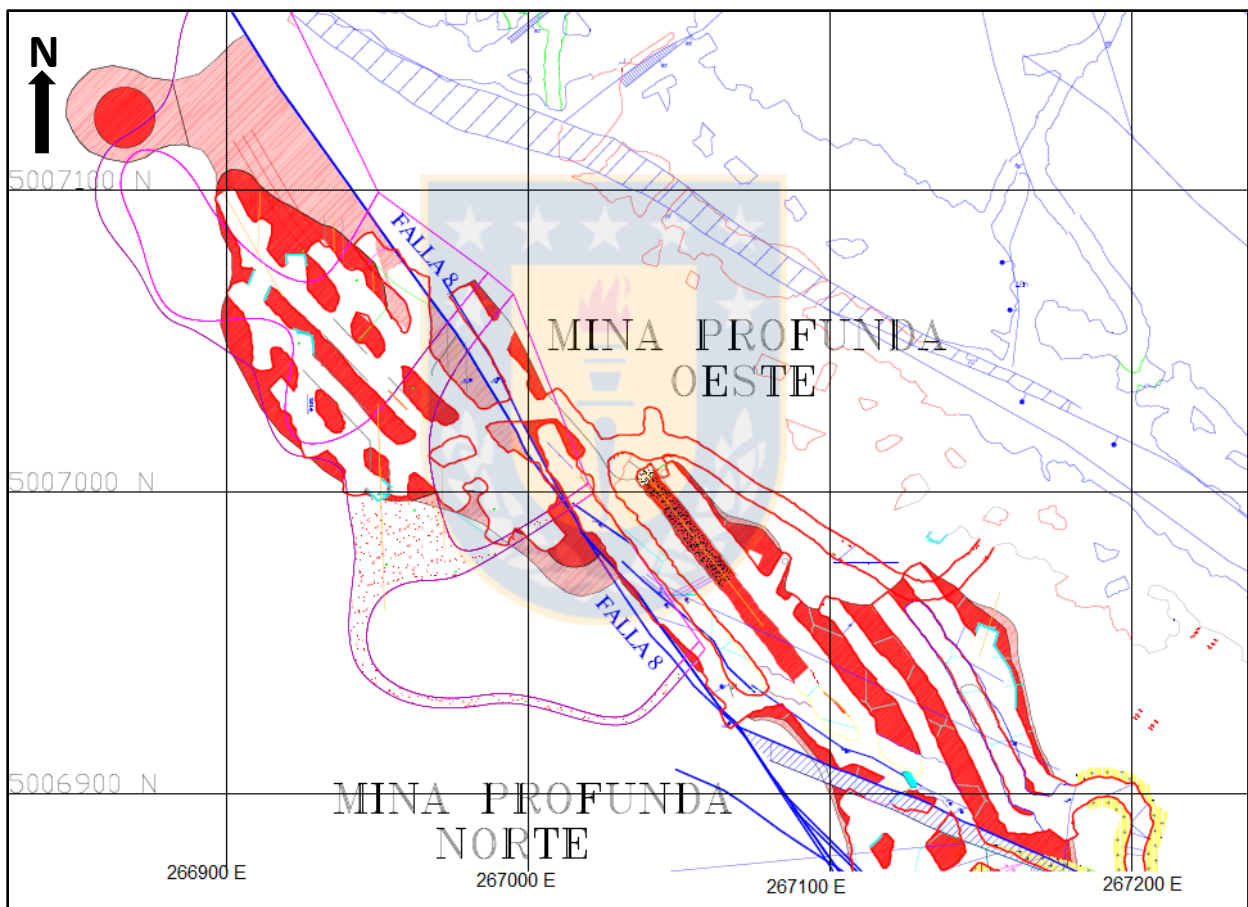
Dentro de la secuencia se identifican hasta 6 niveles centimétricos de tobas de ceniza que separan los mantos, la separación vertical entre estos niveles tobáceos van desde los 0,50-1,20 m, según datos de terreno. El manto de estas unidades varía de entre 25-30° hacia el NE.

El límite superior de esta unidad corresponde al contacto neto de las areniscas con el pórfido riolítico y la base a un contacto de tipo gradacional, evidenciado por un conglomerado basal, con las tobas líticas de la Formación Ibáñez.



En la figura 4.14, se expone un mapa de mina donde se detalla la ubicación de la Mina Profunda Oeste, evidenciando en polígonos de color rojo los sectores disponibles a explotación y las labores que se encontraban en explotación.

Cabe señalar que en línea continua de color azul se evidencia la falla 8, de rumbo NW-SE, que es una estructura de primer orden y que ha sido identificada como canal de mineralización y de fluidos hidrotermales, debido a la existencia de mineralización sulfurada dentro del relleno de dicha estructura y los halos de mineralización adyacentes.



**Figura 4.14:** Mapa Sector de Mina Profunda Oeste. Labores en explotación. En relleno rojo sectores por explotar. En línea azul se aprecian la falla 8, estructura principal del sector, de rumbo NW-SE. Tomado de Mapa Geológico de Mina, 2012.

La mineralización metálica macroscópica de este sector se compone, en orden de abundancia, de marmatita, arsenopirita, pirrotina, bismutinita, galena, y, en menor cantidad, calcopirita. Como mineralización microscópica, identificada tanto por análisis químicos y microscopia, están Au nativo y electrum, Ag nativa y cobaltita. Estos últimos 3 minerales se encuentran como inclusiones

dentro de arsenopirita o en espacios intersticiales dentro de la mineralogía de alteración presentes en las areniscas calcáreas skarnificadas, según los datos de microscopia realizados (Kakariekia, 2006).

Como mineralogía de alteración se presentan, en orden de abundancia, anfíboles, piroxenos cálcicos, epidota y granates-Ca (grosularia dominante), que reemplazan a los minerales originales de la matriz de las areniscas.

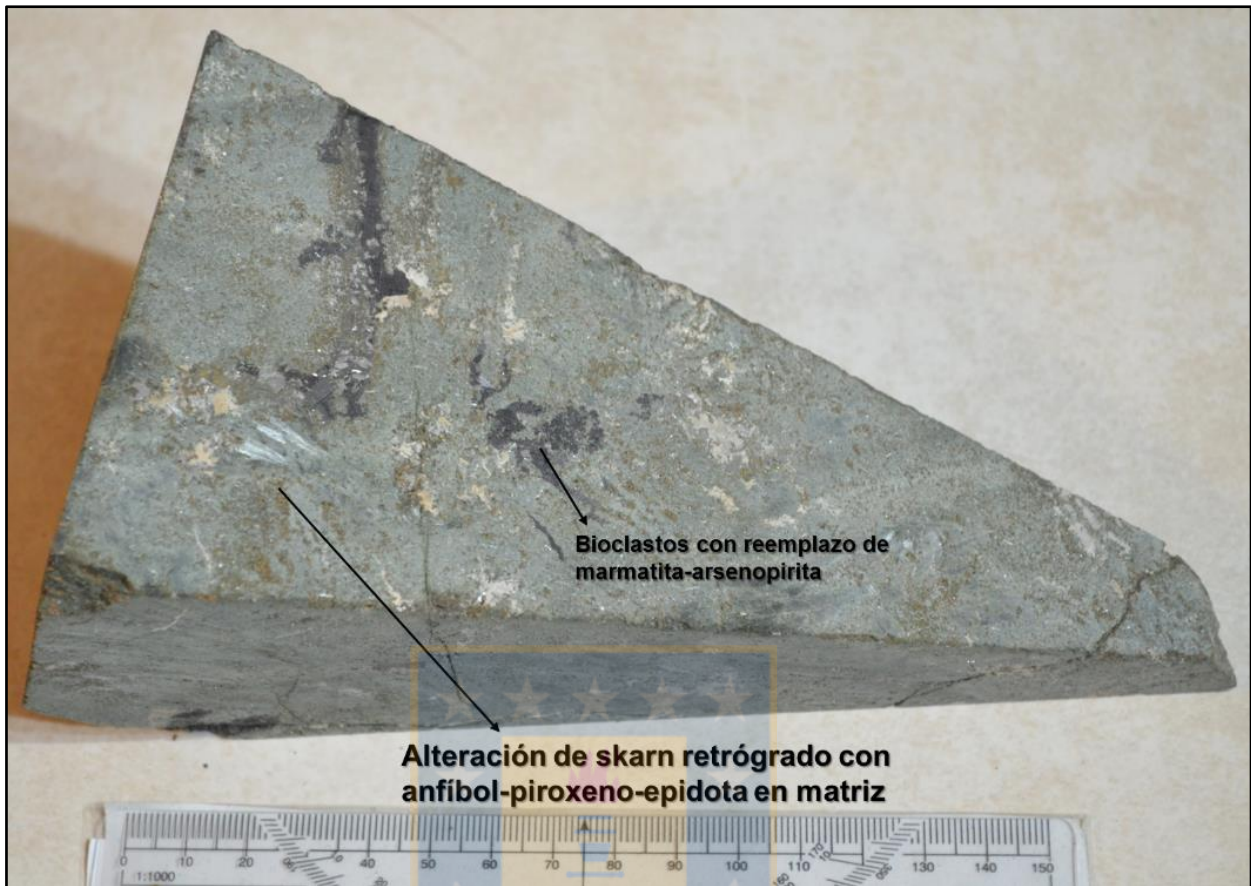
#### **4.3.4.1. Análisis de los Procesos de Mineralización.**

Resulta muy distintivo de este sector, respecto de las otras zonas estudiadas, la potencia de las secuencias de areniscas calcáreas, en parte coquinoideas, y que pueden alcanzar hasta 16 m. Además se observa una abundancia de bioclastos y que es homogénea a lo largo de la secuencia sedimentaria.

En términos de mineralización, se observa que la roca hospedante, por una parte es muy receptiva a los fluidos mineralizadores y, por otro lado, la mineralización se distribuyó de manera más homogénea, en comparación con otros sectores de la mina.

Como fundamentos de lo anteriormente descrito, se tienen observaciones de terreno y los resultados de los análisis geoquímicos de las muestras extraídas del sector, los que evidenciaron, por un lado, altas leyes de Au, Ag y Bi, y por otro, a medida del desarrollo que se tuvo en la producción, las leyes geoquímicas fueron homogéneas en gran parte de los avances que se tuvo en el sector en estudio.

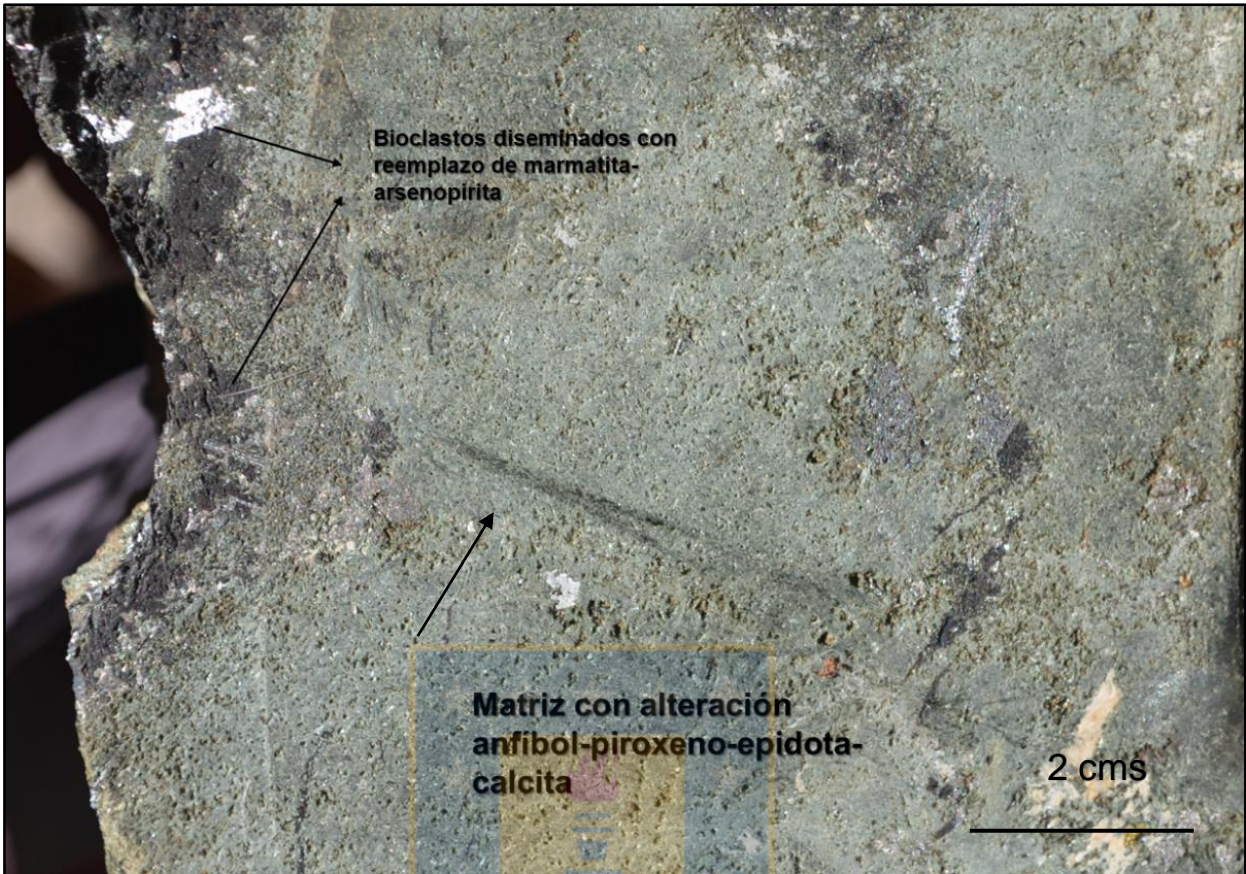
En la fotografía 4.7, se aprecia una muestra de roca del sector de Mina Profunda Oeste, donde se aprecia la mineralogía de mena y alteración evidenciada en el capítulo 4.3.4 anterior.



**Fotografía 4.7. Muestra de Roca Sector Mina Profunda Oeste.** Se evidencia la mineralogía de mena y alteración típica de skarn retrógrado presentes en esta zona.

En esta fotografía es posible apreciar la obliteración de la textura de la roca caja original debido a la alteración hidrotermal que afecta a las unidades, con ello, se evidencia la distribución de la mineralización de mena y ganga en la roca, que se encuentra en gran parte de este sector de la Mina Profunda Oeste.

En la fotografía 4.8 se expone con mayor detalle la mineralización de mena y ganga presente en el sector. En ella, es posible apreciar que los procesos en etapa retrógrada generen una mineralogía de alteración predominante de anfíbol, piroxeno y epidota, además de la mineralización metálica de marmatita y arsenopirita-bismutinita, que es indicativa de mineralización aurífera (en ppm), presente en la roca caja.



**Fotografía 4.8.** Muestra de roca del sector Mina Profunda Oeste. Es posible apreciar la mineralogía de mena y alteración de skarn presentes en esta zona.

Cabe señalar que en la zona de Mina Profunda Oeste se evidencia abundante mineralización metálica compuesta de menas de marmatita, arsenopirita, bismutinita, Au nativo y, en menor cantidad, pirrotina y calcopirita, lo que evidencia que esta zona fue muy favorable a la acción de los fluidos hidrotermales ricos en elementos metálicos, con leyes que se encuentran entre el 3-7% Zn y 5-20 gr/t Au (incluso mayores), respectivamente.

Estos datos mineralógicos apoyan, de forma fehaciente, la hipótesis de que los procesos tipo skarn retrógrado tuvieron un grado de homogeneidad importante en esta parte del distrito, asociados a las condiciones fisicoquímicas favorables de los procesos metalogénicos y de mineralización asociados.

En efecto, los datos de terreno recopilados, los muestreos geoquímicos obtenidos y las leyes de mineral observadas en la Mina Profunda Oeste, tienen un grado de homogeneidad importante en

gran parte de su explotación y desarrollo, lo que lleva a inferir que esta zona fue muy receptiva a los procesos de mineralización producidos, y, en términos geoquímicos y metalogénicos, que las rocas hospedantes, en simultáneo con los eventos mineralizadores, estuvieron en niveles topográficos superficiales que favorecieron la interacción entre los fluidos hidrotermales y aguas meteóricas, que no sólo disminuyen la temperatura para la depositación de algunos metales como Au, Ag y Bi, As, entre otros, sino que también provocan la precipitación del resto de los metales desde las fuentes magmáticas-hidrotermales y la difusión de los procesos de mineralización, tal como lo señalan los estudios de Einaudi y Burt (1982), y Meinert (1992), para los procesos metalogénicos de los depósitos de tipo skarn.

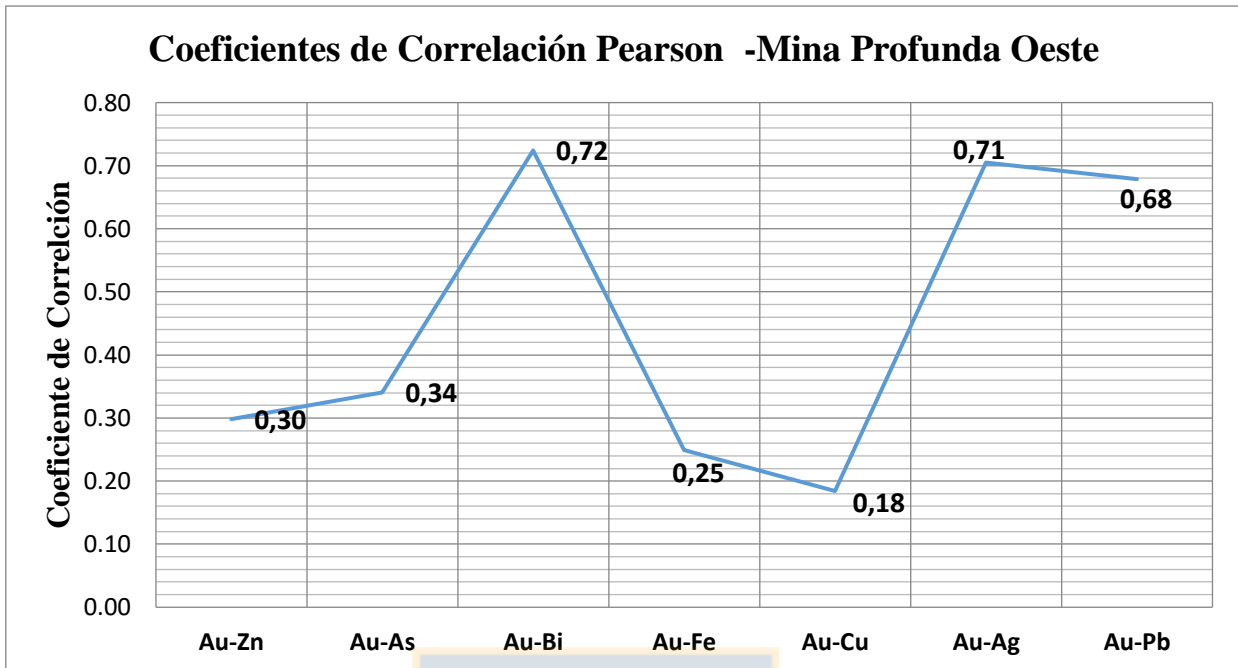
Al igual que en el caso de Mina Profunda Norte, es posible postular que este sector también reúne las características mineralógicas de los depósitos denominados Skarn de Au Reducidos, por la existencia de altas leyes de Au (de entre 5-15 gr/t Au y superiores), concentraciones bajas de otros metales y una distintiva asociación geoquímica compuesta por menas de Au-Bi-Te-As, tal como fue señalado y definido por Meinert (1992), para esta clasificación de los skarn de Au.

Apoyando lo anterior se presentan los resultados del uso de la correlación de Pearson para las muestras extraídas y los resultados geoquímicos realizados en Mina Profunda Oeste, y que son expuestos en la tabla 4.7.

**Tabla 4.7. Datos de la Correlación de Pearson.** Realizada para mostrar la relación entre los elementos de importancia económica del sector de Mina Profunda Oeste.

N° de Datos	MINA PROFUNDA OESTE- CORRELACIÓN DE PEARSON						
99	0,30	0,34	0,72	0,25	0,18	0,71	0,68
	Au-Zn	Au-As	Au-Bi	Au-Fe	Au-Cu	Au-Ag	Au-Pb

Gráficamente, la información se detalla en la figura 4.15.



**Figura 4.15: Gráfico Coeficientes de Correlación de Pearson.** Relación entre Au y los elementos más importantes. A partir de los análisis geoquímicos efectuados. Sector Mina Profunda Oeste.

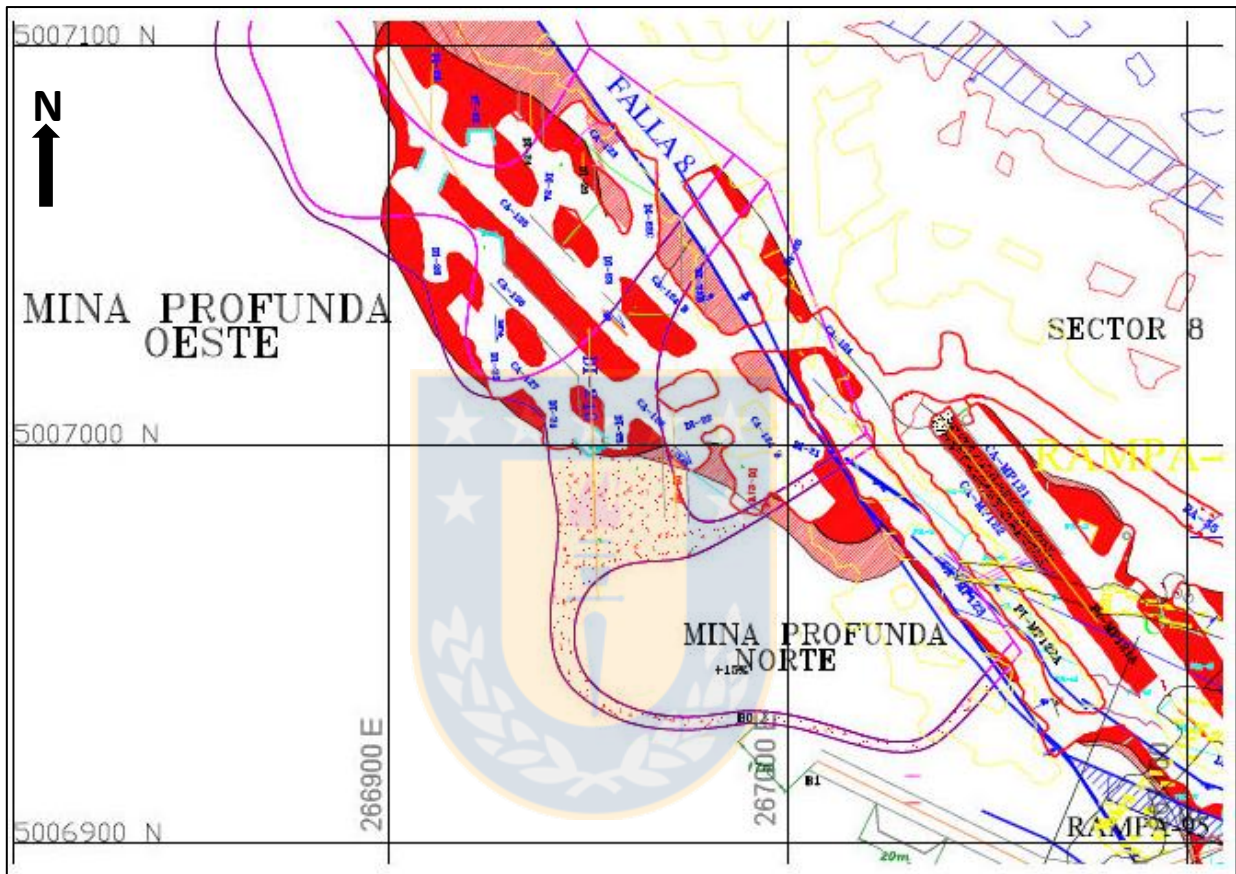
Analizando los resultados antes expuestos, es posible afirmar que todos los elementos descritos mantienen una correlación positiva con Au. En términos de detalle, la mineralización de bismutinita-maldonita, Ag nativa y galena tiene una alta correlación con Au, en contrapartida, la presencia de marmatita, arsenopirita y pirrotina (pirita), tiene una baja correlación.

Por último, al igual que en los casos anteriores, la calcopirita tiene un valor nulo, que vuelve a evidenciar que, en este sector del distrito, la mineralización de Cu parece provenir de un proceso metalogénico diferente a la mineralización aurífera y de Zn-Fe.

En cuanto a los factores estructurales presentes en la zona y su influencia en los procesos de mineralización, cabe destacar que en la zona oriental del sector de Mina Profunda Oeste se encuentra la falla 8, la cual tiene una actitud preferencial de N40°W/70°SW, y se dispone, según datos de terreno, desde el sector de Aserradero Norte por la zona sur del distrito, hacia zonas occidentales del distrito, aún por explorar, atravesando el sector de Mina Profunda Oeste. Esta estructura ha sido identificada como canal de difusión de la mineralización, por la presencia de marmatita y pirrotina presentes en los rellenos de calcita del plano de la estructura y que produjeron la distribución de la mineralización en las areniscas calcáreas de esta zona durante los procesos retrógrados en el desarrollo del skarn.

El salto provocado por la estructura, identificado en algunos sectores de la mina a lo largo de la traza de la falla, varía entre 13-15 m, siendo el bloque oriental el que desciende.

En la figura 4.16, se presentan las estructuras principales del sector de Mina Profunda Oeste.



**Figura 4.16:** Mapa del sector Mina Profunda Oeste. Se muestra la falla 8, de rumbo aproximado N40W y que es canal de mineralización de esta zona. Tomado de Mapa Geológico de Mina, 2012. Escala 1:2000.

Una de las evidencias de que las estructuras de este sector son canales de mineralización se presenta en la fotografía 4.9, donde se observa que la muestra de falla, con relleno de calcita y arcilla, contiene un cristal de pirrotina diseminado, Esta roca fue extraída en un sector a lo largo del plano de la falla 8.



**Brecha de falla con relleno de calcita y cristal de pirrotina, pirita menor**

**Fotografía 4.9.** Muestra de Plano de Falla del Sector Mina Profunda Oeste. Se evidencia el relleno de calcita, arcillas y cristales aislados de pirrotina y pirita menor.

#### **4.4. Sector Mina Porvenir.**

##### **4.4.1. Descripción General.**

Se encuentra ubicada en el extremo sur-suroriental del distrito y corresponde a una secuencia de areniscas calcáreas, en parte coquinoídeas, de grano medio, con abundantes bioclastos de *Ostrea sp.* y otros bivalvos indeterminados.,

En términos estratigráficos, se dispone sobreyaciendo en contacto neto a la unidad de Pórfido Riolítico e infrayaciendo, también en contacto de tipo neto, a la unidad de Tobas Bandeadas descritas en el capítulo 3.

La potencia de esta unidad de areniscas es de alrededor de 5 m y presentan un basculamiento de alrededor de 20-30° hacia el S.



Se observan hasta 5 niveles centimétricos de toba de lapilli en la secuencia estratigráfica, evidenciando la ocurrencia de episodios eruptivos contiguos a la cuenca marina que forma la secuencia de areniscas calcáreas y coquinoídeas. Es importante destacar que estos niveles son barreras geoquímicas para los fluidos hidrotermales, prueba de ello son las variaciones en la abundancia de mineralización metálica y leyes de mineral entre los estratos separados por estos niveles de tobas.

La mineralogía de mena de este sector se compone principalmente de marmatita, pirrotina, arsenopirita, pirita y calcopirita, respectivamente y en orden de abundancia. Respecto de la mineralogía de alteración esta agrupa a piroxeno, anfíbol, epidota, granates del tipo vesubianita y grosularia.

Con respecto del estilo de mineralización, se presenta de forma masiva, como forma de reemplazo total de la matriz de areniscas por sulfuros y reemplazo selectivo de bioclastos.

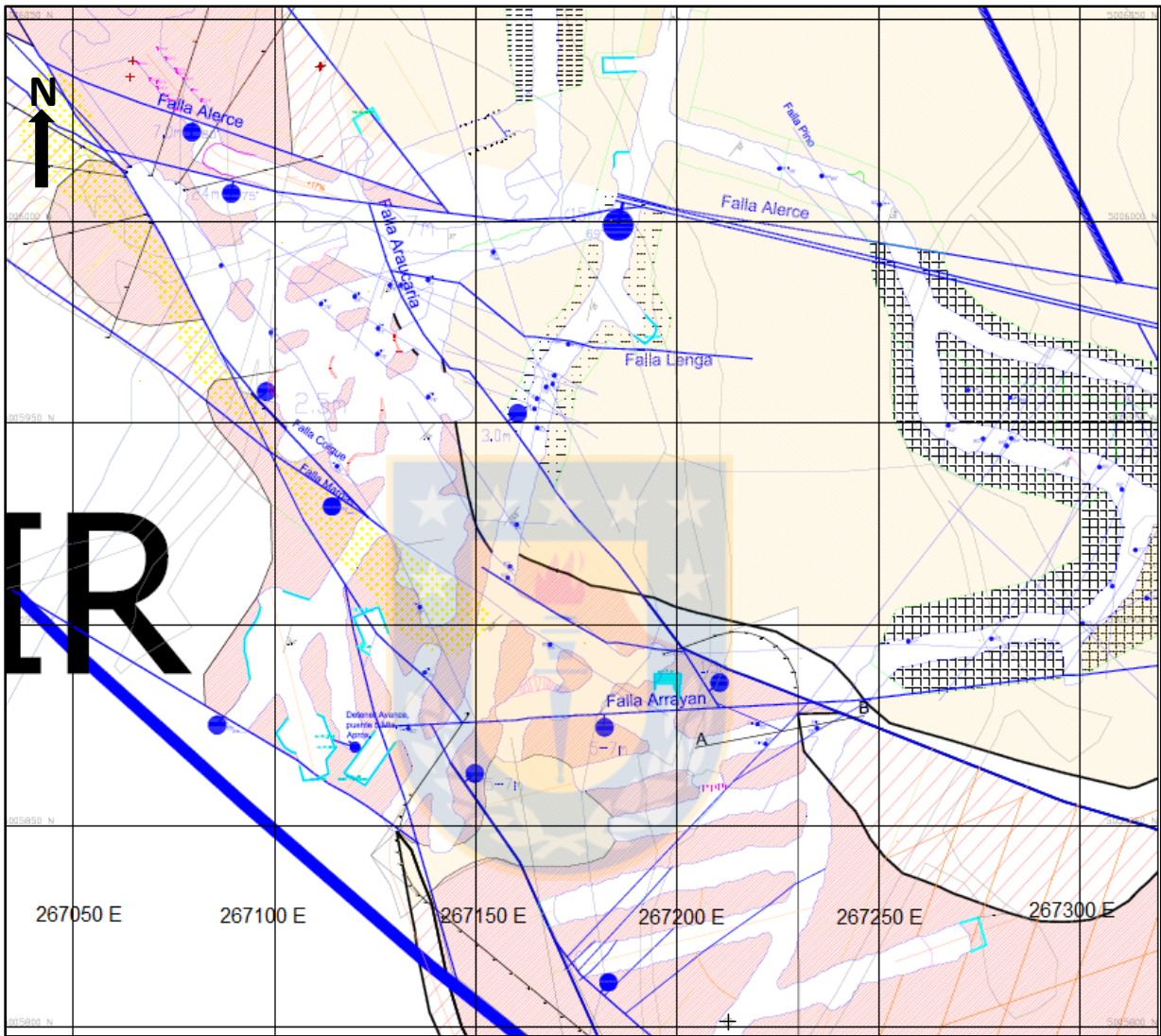
En términos de producción, este sector agrupa las fuentes de Zn y Fe más importantes del distrito minero. En comparación, se evidencian leyes sub-económicas de Au, Ag y Pb, según los datos geoquímicos obtenidos de las muestras tomadas en este sector y restringidas sólo a niveles locales dentro del sector Porvenir.

Según los datos estructurales tomados en terreno, este sector se encuentra ubicado entre las falla Porvenir, por el noreste y la falla Don Amado por el extremo suroccidental, que corresponden a 2 estructuras de tipo normal de primer orden y con vergencia hacia el SE y NE respectivamente ambas.

Además, se evidencian otras fallas subsidiarias de tipo normal, muchas de ellas con evidencia de relleno de falla, además de calcita, de sulfuros de Fe y Zn, lo que permite plantear hipótesis de que estas fallas son canalizadoras de fluidos mineralizadores que provienen de los cuerpos magmáticos.

Lo anterior se describe en la figura 4.17, con las estructuras de primer orden, de rumbo NW-SE, que delimitan este sector y antes descritas, además de las estructuras de segundo orden subsidiarias y algunas como la falla Fortuna, detallada en el extremo derecho, que evidencian las estructuras

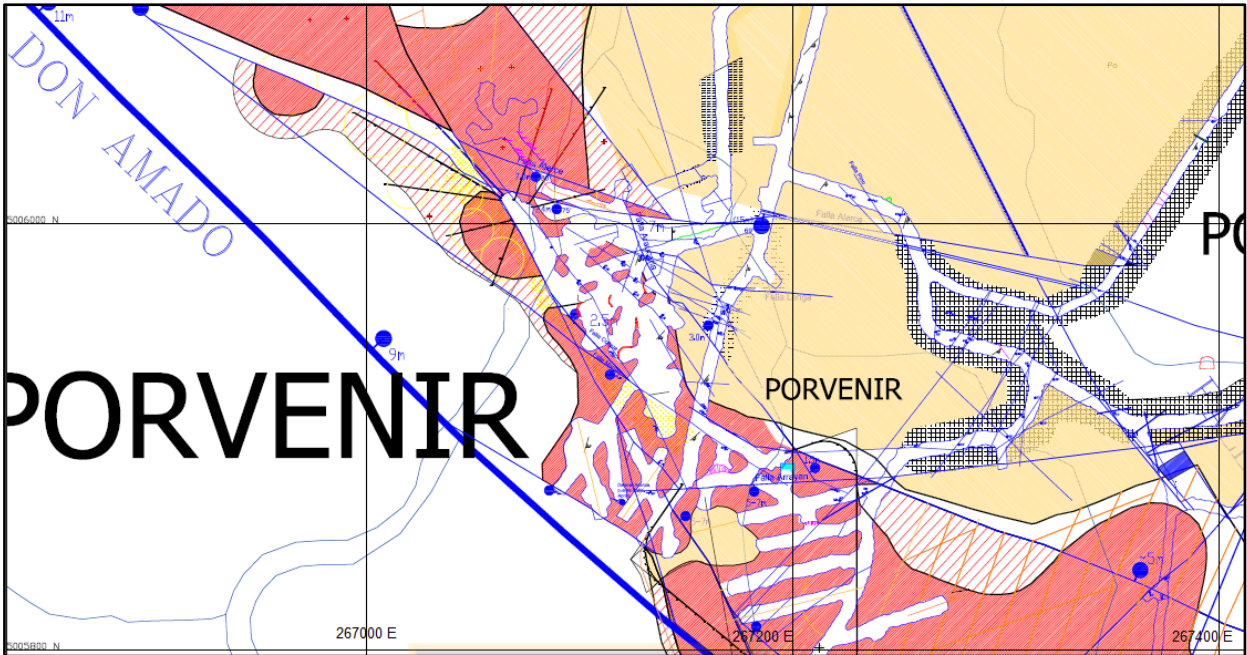
secundarias de rumbo NE-SW, que componen la morfología estructural de la zona de mina Porvenir en forma de graben y pilar tectónico, respectivamente.



**Figura 4.17: Mapa de Mina Porvenir.** Se exponen las fallas normales de rumbo NNW-SSE de primer orden, y NE-SW secundarias. Tomado de Mapa Geológico de Mina, 2012 Escala 1:500.

Cabe destacar que algunos autores como Bussey y otros (2010), reportaron zonación mineralógica de mena y alteración a lo largo de estructuras de tendencia NW-SE en las zonas de Porvenir y Aserradero, dando cuenta de la importancia de los factores estructurales para la distribución de la mineralización en el distrito y, específicamente, en estos sectores de la mina.

La figura 4.18 muestra la ubicación del sector de Porvenir, detallando los sectores en producción y las estructuras principales que afectan a las unidades litoestratigráficas.

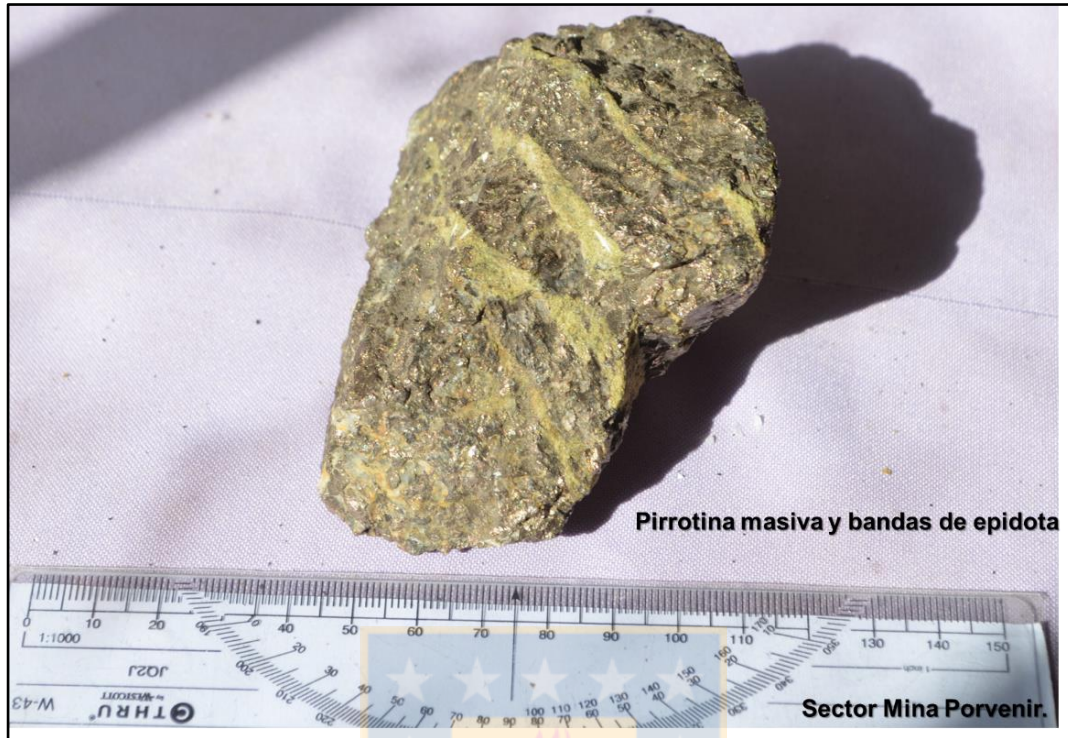


**Figura 4.18:** Sector de Mina Porvenir. Detalle de las diferentes labores en explotación (relleno blanco en zona principal). En línea azul se aprecian las estructuras principales del sector. Tomado de Mapa Geológico de Mina, 2012. Escala 1:2000.

#### 4.4.2. Análisis de los Procesos de Mineralización.

Cabe destacar que este sector la mineralización metálica y de alteración se dispone en forma pervasiva y, en menor grado, selectiva como reemplazo de bioclastos, lo que evidencia un sector bastante favorable, en términos litológicos y estructurales, para los procesos de mineralización y alteración que ocurrieron en el distrito.

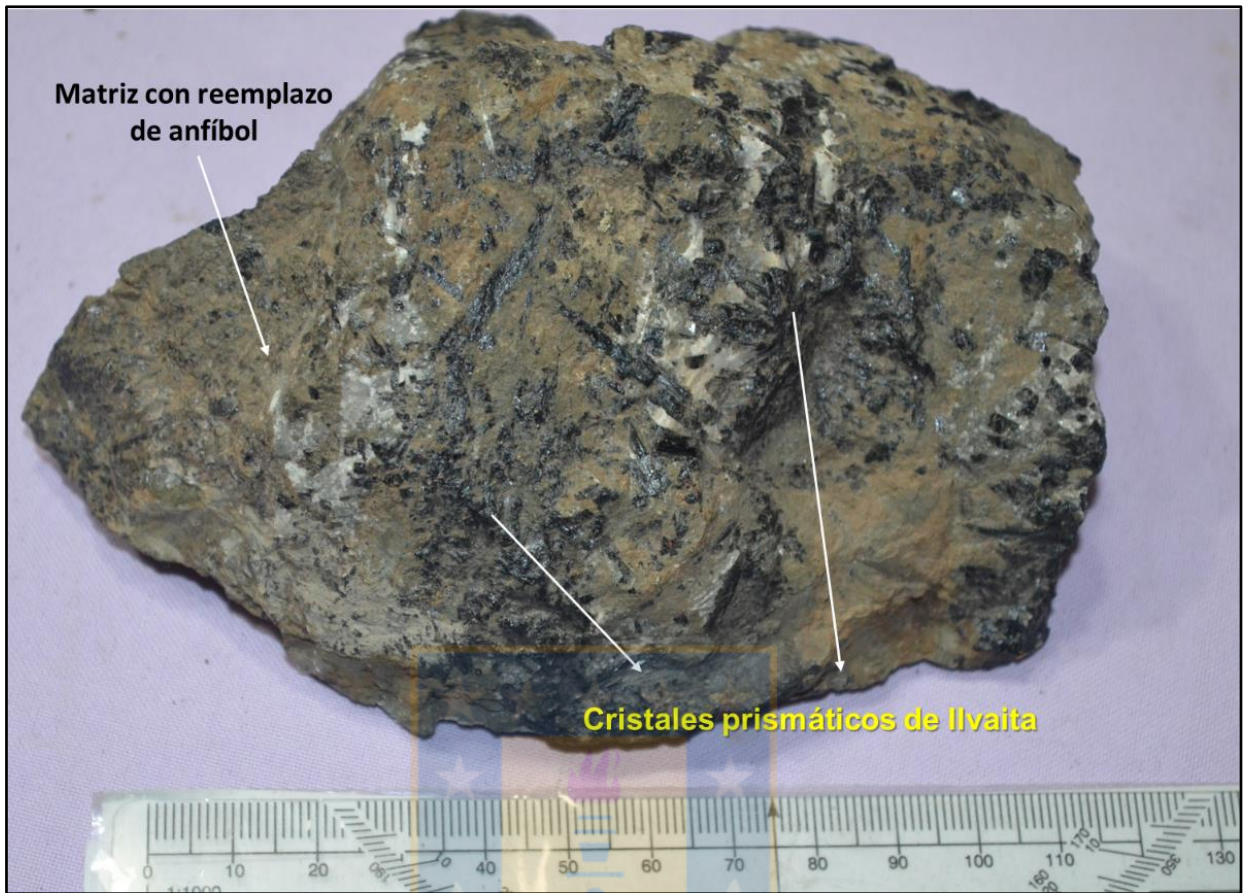
Según se observa en la fotografía 4.10, la mineralización metálica se distribuye en forma pervasiva, obliterando completamente la textura de la roca caja y distribuyendo la mineralización en toda la matriz de la roca. Esta es una característica común en Porvenir, incluso se observan niveles estratigráficos con mineralización sulfurada que oblitera completamente la textura de la roca, según datos obtenidos en terreno.



**Fotografía 4.10. Muestra de Roca de Mina Porvenir.** Se aprecia mineralización masiva de pirrotina y bandas de epidota-clorita, que obliteran la textura original de la roca caja.

La existencia de niveles de areniscas con reemplazo total por mineralización de pirrotina indica condiciones muy reductoras y presencia de Fe mayoritaria en la fuente, la que al interactuar con minerales carbonáticos (incluido bioclastos), éstos últimos producen un proceso de desestabilización de los complejos que transportan metales (Cl, HS, HCO<sub>3</sub>, CO<sub>3</sub>), causando la precipitación de metales y la obliteración total de la matriz de areniscas (Rabbia, O., comunicación verbal, 2017).

Otro mineral identificado en algunos sectores explotados es Ilvaíta ( $\text{CaFe}^{3+}(\text{Fe}^{2+})_2\text{O}(\text{Si}_2\text{O}_8)(\text{OH})$ ), el cual aporta información importante respecto de las condiciones fisicoquímicas en su formación y en la relación que tiene dentro de la mineralogía de skarn evidenciada en la zona de Mina Porvenir. En la fotografía 4.11 se observa una muestra de Ilvaíta extraída de Mina Porvenir.



**Fotografía 4.11. Muestra de Roca de Mina Porvenir.** Se observa mineralización de ilvaita, como cristales prismáticos y elongados, cuarzo y alteración predominante de anfíbol en la matriz.

Los cristales se muestran como intercrecimientos tanto con piroxeno como anfíboles y abarca tanto la alteración progrado como retrógrado de un skarn (Franchini y Meinert, 2002), destacándose su color negro y brillo lustroso de otros minerales de alteración y distinguible de otros sulfuros como marmatita y galena.

En los análisis químicos efectuados en algunas zonas antiguas de Porvenir, se identifican contenidos porcentuales de Mn altos (mayores de 0,4% hasta 1,2%), sumado a concentraciones de Fe altos, que indican una característica diagnóstica de los skarn de Zn-Pb, e indican una posición distal del sistema, tal como Meinert (1987), lo identifica en el yacimiento Groundhog (USA).

Otros autores como Yun y Eunaudi (1982, en Franchini y Meinert, 2002), sugieren que la alta relación Mn/Fe en piroxenos cálcicos de zonas distales del sistema skarn, donde se presenta Ilvaita, podría reflejar la disminución de Fe del fluido mineralizador (que es parte del sistema skarn), como

resultado de la formación de silicatos de Fe (como piroxenos y anfíboles), en zonas cercanas a los canales de fluidos (Franchini y Meinert, 2002).

Estos últimos dos autores indican que la presencia de Ilvaíta en los depósitos de skarn de Zn-Pb, como el caso de mina Porvenir, indican un ambiente de formación en condiciones de alta  $f(O_2)$ , a diferencia de los skarn de Au.

En términos estructurales, es importante destacar la existencia de numerosas fallas de tipo normal, de rumbo NW-SE que son identificadas en terreno, cuyos planos de falla evidencian mineralización relictas de sulfuros de Fe y Zn, principalmente pirrotina y marmatita, conllevan a plantear hipótesis de que éstas estructuras constituyeron canales de distribución para los fluidos mineralizadores que provinieron de los magmas fuente de los metales en zonas más profundas y que entraron en el sistema de skarn gracias a estas estructuras pre-existentes de tendencia NW (Bussey y otros, 2010).

No obstante, en otros sectores de Porvenir, la mineralización se dispone en forma de reemplazo selectivo de los fragmentos de bioclastos, quedando el resto de la matriz alterada por minerales como piroxeno, anfíbol y granates ricos en Ca.

En efecto, en algunas zonas más restringidas de esta mina, se observaron secuencias de areniscas con alto contenido de granates, como grosularia y vesuvianita, además de epidota, estableciéndose que dichas áreas corresponden a zonas donde la alteración hidrotermal se ubica en la zona de mayor temperatura, coincidentes con un proceso de skarn tipo progrado, con zonación, en una etapa final hacia la etapa de skarn retrogrado (de más baja temperatura e interacción con aguas meteóricas), donde estos minerales anhidros se forman por reemplazo isoquímico de carbonato por sílice y, posteriormente, comienzan a reemplazarse por minerales hidratados como anfíboles (Pirajno, 2009).

Es importante destacar que la mayor relación granate/piroxeno evidencia un antecedente mineralógico muy importante para definir zonas donde se produce la mayor cercanía con el cuerpo

intrusivo que afecta a las secuencias y, dados los antecedentes, puede constituir la fuente de metales en el distrito.

Esto se evidencia en la fotografía 4.12, donde se expone una muestra de roca con abundancia de granates-Ca y piroxeno rico en Ca, dentro de la matriz, además de algunos sulfuros de Fe y Zn diseminados.



**Fotografía 4.12.** Muestra de Roca de Mina Porvenir. Se evidencia mineralogía de mena y alteración presentes.

Según Eunaudi (1982, en Pirajno, 2009), en los depósitos tipo skarn se producen distintas zonaciones en donde la asociación calcopirita-pirita, junto con presencia masiva de granates ricos en Ca, evidencian que la mineralización se produce zonas cercanas a los contactos con cuerpos intrusivos y las rocas carbonáticas. Acá la mayor relación granate/piroxeno, como argumento mineralógico, indica una mineralización de alteración producida a altas temperaturas, que evidencia la cercanía de la roca hospedante con la intrusión (Meinert, 1992).

La presencia de estos minerales en sectores específicos de Porvenir apoya la hipótesis planteada por Meinert (2003), que propone un modelo de fluidos de dos etapas para el desarrollo de depósitos tipo skarn magmático-hidrotermales, en donde en una primera etapa se produce un flujo alto de fluidos desde un emplazamiento superficial, desde un magma enriquecido en volátiles, el cual resulta en un skarn anhidro temprano rico en granate y piroxeno.

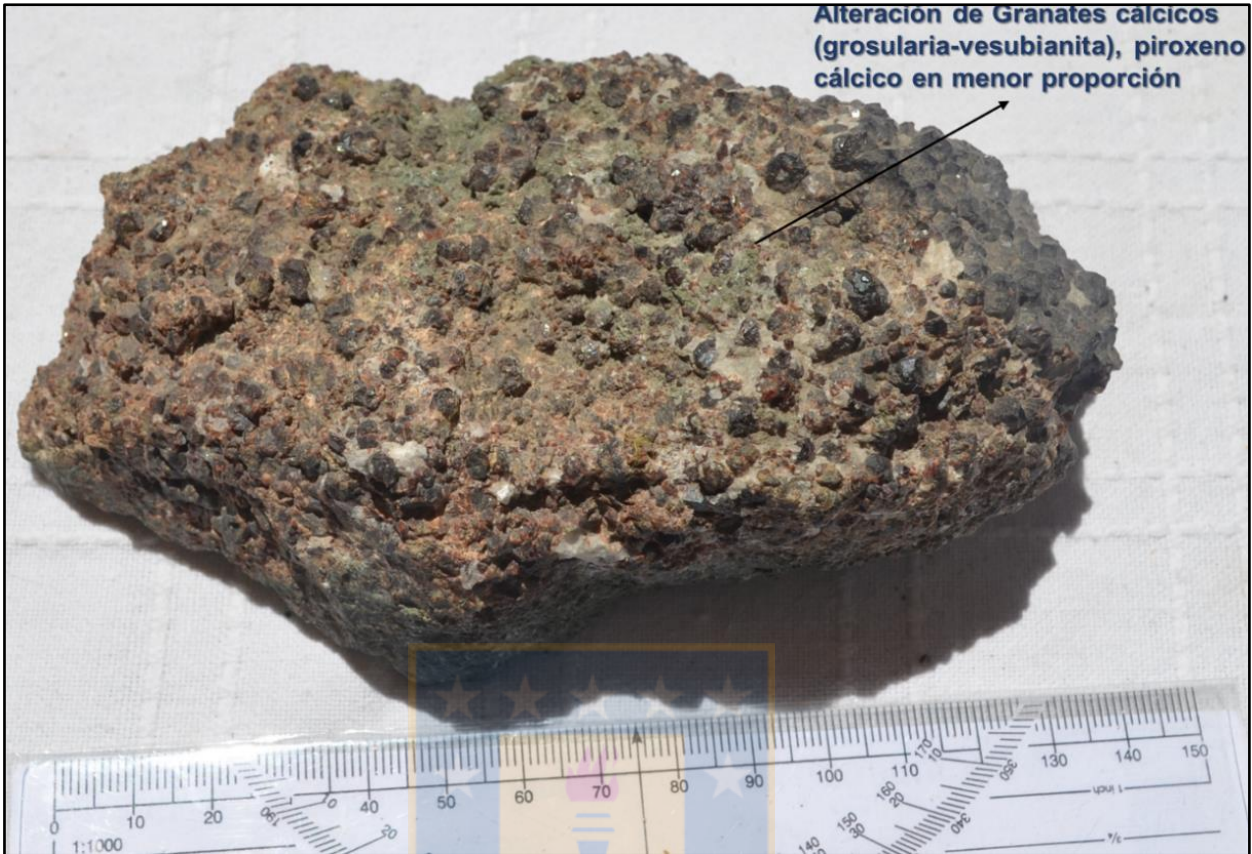
Posteriormente, la cristalización del fundido es acompañado por una disminución del flujo de fluidos lo cual también provoca una disminución de la temperatura ( $< 450^{\circ}\text{C}$ ), proceso que lidera un fracturamiento de tipo frágil bajo presión hidrostática.

Estos argumentos, descritos en el párrafo anterior, son puestos en evidencia en algunos sectores de Porvenir, donde se identifican muestras de roca con una mayor presencia de granates cálcicos de tipo grosularia y vesubianita, con relación a la abundancia de piroxenos, incluso en desmedro de la mineralización metálica.

Esta mayor abundancia de granates, como argumento mineralógico, indica que este sector tuvo una cercanía importante con la intrusión durante los procesos de mineralización y alteración (Pirajno, 2009).

En la fotografía 4.13 se exhibe una muestra de un sector de Mina Porvenir donde se evidencia mineralización masiva de granates tipo grosularia, vesubianita, epidota y piroxeno cálcico, lo que constituye una evidencia mineralógica para sostener que algunas zonas tuvieron más cercanía con los cuerpos intrusivos, y por ende, sometidos a mayor temperatura, durante los procesos de mineralización que afectaron a la zona de estudio.





**Fotografía 4.13. Muestra de Roca de Mina Porvenir.** Mineralización masiva de granates cálcicos y piroxeno, indicando presencia de altas temperaturas de formación y cercanía con cuerpo intrusivo.

Collao (1994), realizó un estudio de inclusiones fluidas en cuarzo en el sector de Doña Rosa, donde se evidencia una mineralización de Zn-Pb similar a la del sector de Porvenir, además que la mineralización metálica se dispone en la unidad correspondiente al Manto Principal.

En este estudio se dan valores de temperaturas de homogeneización de 296-444 °C y con un % NaCl en peso de 9,0-44 lo que, en términos generales, se pueden correlacionar a depósitos de tipo skarn como reemplazo de rocas ricas en carbonatos por reemplazo de menas de Zn, Cu, Pb, aunque los datos de salinidad y características geológicas del Distrito Toqui refuerzan el argumento de considerar a este yacimiento como un Skarn de Zn-Pb.

Por otro lado, puede señalarse que la mayor abundancia de bioclastos en la matriz de las areniscas contribuye a una mejor distribución de la mineralización metálica que afecta a esta zona, principalmente Zn y Fe, como elementos principales de los minerales de mena presentes.

Lo anteriormente señalado se muestra en la fotografía 4.14, donde es posible apreciar una mineralización masiva de marmatita, pirrotina y arsenopirita, la cual oblitera en forma casi completa la matriz de las areniscas calcáreas que forman la roca hospedante de la mineralización en este distrito.



**Fotografía 4.14. Muestra de Roca de Mina Porvenir.** Mineralización masiva que oblitera la textura de la roca caja, en ella se aprecia marmatita y, en menor grado, pirrotina y arsenopirita.

Esta característica, si bien no es exclusiva de la Mina Porvenir (también se evidencia en Aserradero, descrita anteriormente), permite establecer que el contenido de mineralización sulfurada, y por ende las leyes de importancia económica en este distrito, tienen relación con dos aspectos fundamentales: la abundancia de metales de la fuente hidrotermal y con el contenido de bioclastos en las secuencias de areniscas calcáreas que componen la roca caja de este yacimiento, que producen una desestabilización por la neutralización ácida del fluido y que favorecen la

precipitación del contenido metálico, en forma de sulfuros (Rabbia, O., comunicación verbal, 2017).

Cabe destacar que en diversas zonas de Porvenir se evidencia que la roca caja es, principalmente, coquinas, dado que aumenta significativamente la cantidad modal de bioclastos, lo que se traduce, según lo expuesto anteriormente, entre la relación que existe entre la mineralización metálica y la presencia de bioclastos, en un aumento significativo de la presencia de sulfuros, formando un reemplazo total de la roca caja, producto de la desestabilización de los complejos metálicos por la presencia de carbonato, descritos en el párrafo anterior.

Según Pirajno (2009), la naturaleza de la mineralización de mena dentro de los skarn depende en gran medida del contenido de carbonato dentro de la roca hospedante, su permeabilidad y las características estructurales presentes al momento de ocurrir los procesos de mineralización.

Lo anterior puede verificarse en la fotografía 4.15, donde se observa una muestra con alta presencia de bioclastos, donde se observa un reemplazo total y pervasivo de los fragmentos fosilíferos por marmatita y la sustitución de la matriz por anfíbol y piroxenos, producto del proceso de metasomatismo retrógrado donde precipitan los metales y los minerales de alteración asociados a la alteración de tipo skarn.

Esto demuestra que la abundancia de  $\text{CaCO}_3$  en la roca caja juega un papel fundamental en la abundancia y variedad de la mineralización metálica y constituye un carácter distintivo de muchos sectores de Mina Porvenir.



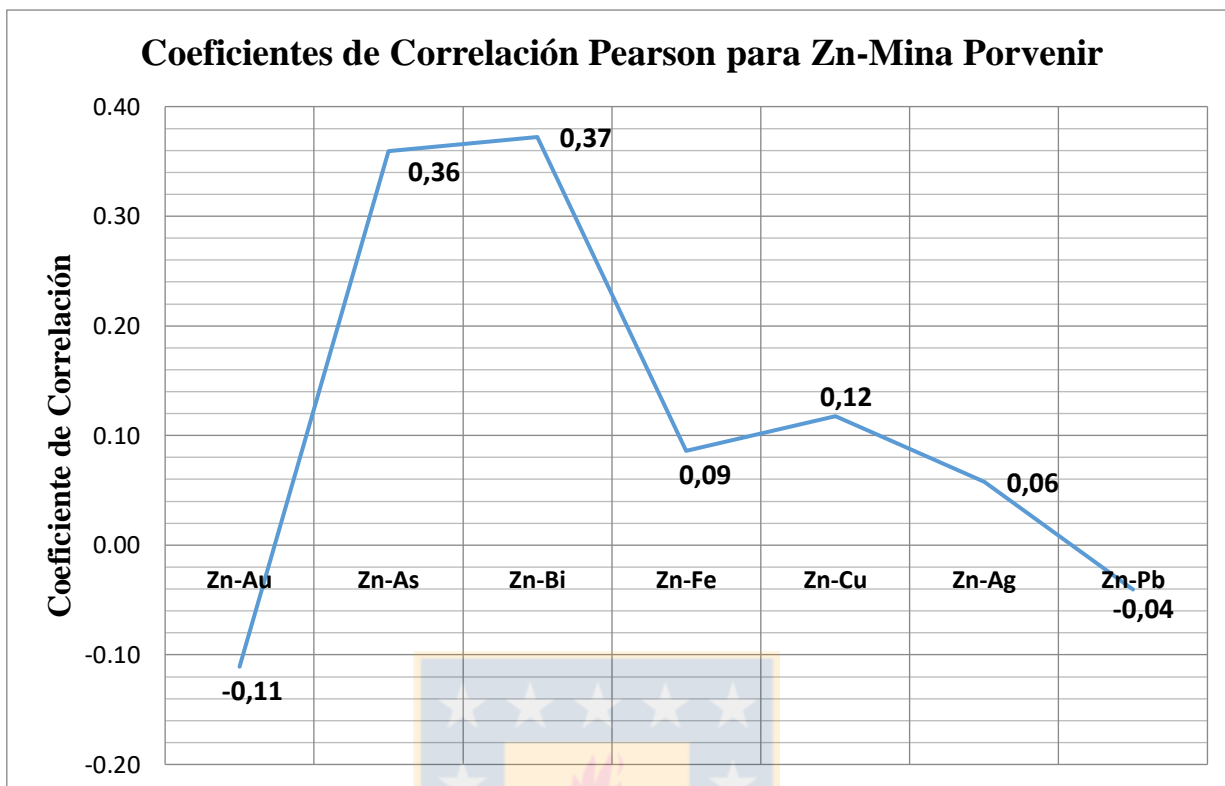
**Fotografía 4.15. Muestra de Roca de Mina Porvenir.** Mineralización de marmatita que reemplaza bioclastos y matriz con mineralización pervasiva rica en anfíbol y piroxeno.

Respecto de la correlación de Pearson entre Zn, que es el elemento de importancia económica más representativo de esta mina, y los demás elementos, a partir de los análisis geoquímicos de muestras extraídas en mina Porvenir, se exponen los resultados en la tabla 4.8.

**Tabla 4.8. Datos de la Correlación de Pearson.** Se muestra la relación entre los elementos de importancia económica de Mina Porvenir.

N° de Datos	MINA PORVENIR- CORRELACIÓN DE PEARSON						
1620	-0,11	0,36	0,37	0,09	0,12	0,06	-0,04
	Zn-Au	Zn-As	Zn-Bi	Zn-Fe	Zn-Cu	Zn-Ag	Zn-Pb

Gráficamente, esta información se detalla en la figura 4.19.



**Figura 4.19:** Gráfico de Correlación de Pearson. Relación entre Zn y los elementos más importantes. Datos geoquímicos efectuados en Mina Porvenir.

De los datos anteriormente expuestos, se concluye que existen correlaciones positivas entre Zn y la mayor parte de los elementos, a excepción del Au. En términos de detalle, se observan bajas correlaciones de marmatita-blenda con arsenopirita y bismutinita y nulas con Fe, Pb y Ag nativa. En el caso de calcopirita, al igual que los análisis de otros sectores, se mantiene la nula correlación, entregando argumentos de que esta mena proviene de un proceso de mineralización diferente.

A modo de conclusiones preliminares, puede decirse que esto puede entregar antecedentes acerca de que las condiciones de formación de la mineralización del sector de Porvenir se relacionan a una fuente de metales rica en S, Zn y Fe lo que favoreció la formación predominante de marmatita, como mena de Zn, y con pirrotina, bismutinita y arsenopirita subordinados, además de cantidades menores de galena, calcopirita y sulfosales de Ag. En este caso, la mineralización de Au está muy restringida a algunos sectores y referida a procesos de mineralización diferentes que se manifiestan localmente.

Pérez (2010), detalla que el Au nativo se encuentra ocluido en marmatita, en asociación con pirrotina y arsenopirita.

Esto lleva a inferir que la fuente de metales es rica en Zn y Fe lo que entrega características reductoras y de temperaturas bajas a intermedias, dada la baja correlación con Ag y Pb.

Resulta importante también la abundancia de carbonato dentro de la roca caja, en este caso, la mayor abundancia de bioclastos que favorecen la precipitación metálica, incluso obliterando completamente la matriz de la roca y generando una mineralización masiva y pervasiva que se observa en las muestras extraídas de este sector de la zona de estudio.

Como último factor importante a señalar en los procesos de mineralización son las fallas y estructuras presentes en la zona porque contribuyeron, en gran medida, a la distribución de los fluidos hidrotermales desde las fuentes magmáticas, con el contenido de metales y permitiendo la interacción con factores fisicoquímicos adicionales, tales como interacción con aguas meteóricas e hidrofracturamiento en condiciones superficiales, para que se produzcan los procesos mineralizadores y de alteración evidenciados en el distrito.

En el caso de Mina Porvenir, la abundancia de fallas de tipo normal de primer orden y gran cantidad de fallas secundarias (de rumbo NW-SE y E-W), que delimitan este sector de la mina, permitió una abundante distribución de los fluidos que provinieron de los cuerpos magmáticos y con ello variables procesos de interacción fluido-roca caja, que se evidencia en los contenidos de sulfuros, incluso en forma masiva, y minerales de alteración observados como asociación paragenética, en las secuencias de areniscas calcáreas que forman la roca hospedante de la mineralización.

## 5. RESULTADOS.

En el presente capítulo se exponen los principales resultados obtenidos a partir de los análisis petrográficos, mineralógicos-metalogénicos y estadísticos realizados en los sectores presentados en el siguiente trabajo.

Utilizando datos de sondajes, mapeos geológicos e información litológica recopilada en terreno, se presenta, en la figura 5.1, la columna estratigráfica del Distrito El Toqui.

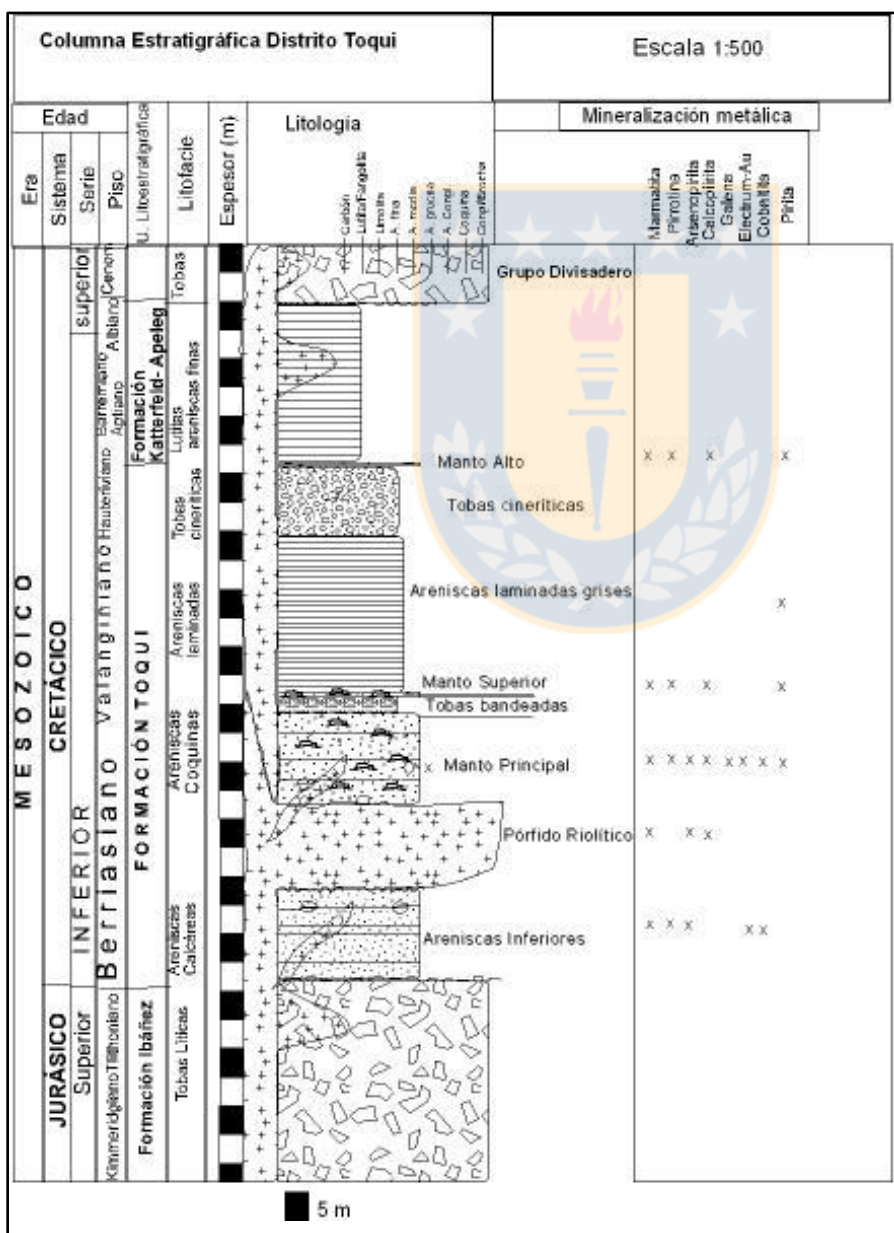


Figura 5.1: Columna Estratigráfica Distrito El Toqui Escala 1:500.

En términos petrográficos, se observan similitudes entre los sectores de Aserradero Sur y Porvenir, en términos de abundancia modal de bioclastos y predominancia de coquinas por sobre areniscas calcáreas, en términos generales. Lo anterior deriva que, en términos metalogénicos, la presencia masiva de carbonatos en las rocas hospedantes produce una precipitación importante del contenido metálico desde la fuente hidrotermal, la cual favorece los procesos de mineralización. Esto se verifica en la abundancia de leyes favorables de Au-Bi-Ag-Zn y Zn-Fe-Pb, respectivamente, presentes como menas metálicas principales en ambos sectores.

En contrapartida, en los sectores de Aserradero Norte y Mina Profunda 3 se observa que la cantidad de bioclastos disminuye y predominan las areniscas calcáreas, lo que se traduce en una variabilidad importante de concentraciones de elementos de importancia económica, con predominancia de bajas leyes. Sumado a ello, las potencias promedio de las areniscas son menores que el resto de los sectores analizados, particularmente el sector de Mina Profunda 3.

Para el caso de Mina Profunda Norte y Mina Profunda Oeste hay una abundancia modal importante de bioclastos en las areniscas, pero el factor más importante lo constituye la potencia de las secuencias calcáreas, alcanzando espesores promedio de 8 m y llegando hasta los 16 m como valor máximo. Estos factores permiten una abundante distribución de la mineralización metálica y una importante concentración de leyes económicas de Au, Ag, Bi, Zn y Pb, entre otros elementos, que se disponen tanto como reemplazo total o parcial de los bioclastos, así como diseminados en la matriz de la roca caja.

En términos geoquímicos, se observan asociaciones muy importantes de menas de Zn-Fe, Fe y, en menor cantidad de Pb, Bi y As en el sector de Porvenir, junto con mineralización de alteración donde predomina piroxenos cálcicos, granates del tipo grosularia-vesubianita y, en menor proporción, anfíboles. La presencia masiva de pirrotina y marmatita indica una fuente reductora y donde se evidencian temperaturas más altas que otros sectores, sobre todo por la presencia de zonas ricas en granates que indican cercanía con las fuentes magmáticas.

En el caso del sector de Aserradero, existe una importante mineralización de sulfuros de Zn-Fe, como marmatita y pirrotina, con menores cantidades de pirita y calcopirita.



Con respecto a la mineralización económica de Au, Bi y Ag, que coexiste con la de Zn-Pb en este sector, se asocia a un proceso de mineralización tardío por la presencia de estas menas en las fracturas de minerales metálicos preexistentes y en la cual los procesos mineralizadores ocurrieron en condiciones someras debido a la dispersión areal de la mineralización, por el hidrofracturamiento causado por la interacción de los fluidos hidrotermales con aguas meteóricas que se distribuyeron por las estructuras NW-SE que controlan el distrito.

Respecto de la mineralización de alteración, se compone de piroxeno, granate, anfíboles y epidota que reemplazan pervasivamente a la matriz de la roca hospedante y que concuerda con etapas retrógradas de los procesos de mineralización de tipo skarn.

Para los sectores de Mina Profunda Norte y Mina Profunda Oeste, se observa mineralización de marmatita, arsenopirita-bismutinita y las concentraciones más importantes de Au (electrum, Au nativo y maldonita), y Ag (como sulfosales de Ag). Esto contrasta con la baja presencia de pirrotina, calcopirita y pirita, lo que pone en evidencia características más oxidantes de los fluidos mineralizadores. Sumado a lo anterior, se verifican en estos sectores las mayores potencias de las secuencias de areniscas calcáreas y, por consiguiente, mayores volúmenes de recursos metálicos producto de una mineralización de mena que se distribuye en forma homogénea en estas zonas.

Respecto de la mineralización de alteración, predomina la presencia de piroxeno cálcico y anfíbol, además de menores cantidades de granates, epidota y clorita, las cuales reemplazan a la matriz de las areniscas calcáreas.

En el sector de Mina Profunda 3, se manifiesta que los procesos de mineralización no fueron homogéneos debido a la variabilidad en las concentraciones de los sulfuros metálicos dentro del sector. Respecto de la mineralización de mena, se observa predominio de pirrotina por sobre marmatita y presencia variable de Au nativo-Electrum, arsenopirita y sulfosales de Ag. La mineralogía de alteración comprende minerales de alteración como piroxenos cálcicos, rodonita y calcita, con menores cantidades de anfíbol.

La presencia de rodonita en algunos sectores de Mina Profunda 3 permite inferir temperaturas cercanas a 600°C, según la información mineralógica recopilada, por lo que este silicato entrega datos importantes respecto de las condiciones de temperatura que se desarrollaron durante los procesos de alteración y mineralización en este sector y que inciden en la variabilidad de la concentración de sulfuros metálicos.

Los resultados más importantes a partir del uso de la correlación de Pearson, y tomando como patrón de elementos a Au y Zn, son los siguientes:

- Correlación baja a moderada entre Au y Zn en Mina Profunda Oeste-Mina Profunda 3 y Mina Profunda Norte, respectivamente.
- Valores nulos entre Au y Zn en las áreas de Porvenir y Aserradero.
- Valores de correlación altos entre Au y Bi en los sectores de Aserradero Sur, Mina Profunda Norte y Mina Profunda Oeste.
- Baja correlación entre Au y Bi en los sectores de Aserradero Norte y Mina Profunda 3.
- Valores de correlación baja de Au y As en los sectores de Aserradero Sur, Mina Profunda 3, Mina Profunda Norte y Mina Profunda Oeste, así como una correlación moderada en el sector de Aserradero Norte.
- Correlación moderada a alta entre Au y Ag en Mina Profunda Norte y Mina Profunda Oeste, respectivamente.
- El Fe mantiene una baja correlación en las áreas de Aserradero Norte, Mina Profunda Oeste y Mina Profunda 3.
- Valores de baja correlación entre Zn y As-Bi, respectivamente, se evidencian en el sector de Porvenir.
- El Cu se mantiene con una correlación nula en todos los sectores, tanto para Au y Zn.

## 6. DISCUSIÓN.

Los depósitos tipo skarn tienen una estrecha e íntima relación espacial con intrusiones magmáticas, por cuanto su mineralogía es capaz de expresar un registro evidente y claro de los fluidos hidrotermales que estuvieron presentes en el ambiente intrusivo que ocurrió durante la formación de la mineralogía de mena y alteración,

En el caso del Distrito Minero El Toqui, se identifican elementos mineralógicos, petrográficos y geoquímicos que apuntan a un yacimiento de tipo Skarn, dada la interacción de fluidos hidrotermales y cuerpos intrusivos con unidades sedimentarias calcáreas provenientes de la depositación de una cuenca marina desarrollada a inicios del Cretácico Inferior, en la zona denominada Cuenca Aysén-Rio Mayo.

Sin embargo, autores como Wellmer y otros (1983), proponen un origen exhalativo y singenético a la depositación de las unidades calcáreas de la Formación Toqui. Los argumentos utilizados para esta afirmación son la estrecha relación de las rocas hospedantes y la mineralización de mena y alteración presentes, con las rocas volcánicas de tipo calcoalcalino que se intercalan dentro de la secuencia sedimentaria.

Collao (1994), entrega estudios de inclusiones fluidas que arrojan temperaturas de homogeneización y salinidad que están en los rangos de 296-444°C y entre 9.0-44% NaCl equivalente, respectivamente que, junto a las características geológicas y mineralógicas de la zona de estudio, apoyan el modelo de tipo Skarn para este depósito.

Alfaro (2012), postula que, debido al amplio halo geoquímico de mineralización, típico de depósitos volcanogénicos, la actividad exhalativa fue sincrónica a la depositación de las unidades litoestratigráficas del Grupo Coyhaique, usando los argumentos de la intercalación de rocas volcánicas y volcanoclásticas presentes en las areniscas calcáreas que, incluso, determinan la concentración de mineralización de mena y alteración en los segmentos separados por estos niveles de tobas de cenizas dentro de los estratos sedimentarios y volcanosedimentarios a lo largo de las unidades litoestratigráficas mineralizadas.

El presente estudio, tomando en consideración los trabajos anteriores y sus conclusiones, expone argumentos mineralógicos y metalogénicos que apuntan a la existencia de dos tipos de yacimientos de tipo skarn dentro del Distrito Toqui, el primero, identificado en la zona de Doña Rosa, Aserradero y Porvenir, se describe como un yacimiento de tipo Skarn de Zn-Pb y mineralización local de Au en Aserradero, y el segundo tipo, que se desarrolla en el sector de las Minas Profundas, por argumentos mineralógicos y metalogénicos de mena y alteración, asociación paragenética mineral, concentraciones de elementos de importancia económica y correlaciones estadísticas, apuntan a la existencia de un depósito de tipo Skarn de Au reducido, según la clasificación hecha por Meinert (1992), para asociación aurífera de altas leyes..

Este tipo de yacimientos de skarn aurífero concentran anomalías de Au-Bi-Te-As y asociación con intrusivos de composición diorítica-granodiorítica asociadas a cuerpos de sill y diques, además de presencia de piroxenos ricos en Fe (Hedenbergita), y, en zonas proximales a la intrusión, presencia de granates, anfíboles, vesuvianita y apatito. Estos datos son concordantes con la información mineralógica y geoquímica obtenida en las zonas de Minas Profundas que se describen en el presente trabajo.

El control estructural de este distrito es muy importante, dado que existen numerosas fallas de tipo normal y de tendencia principal NW-SE y algunas NE-SW que se disponen en toda la zona de estudio. Se observa que, tanto en los planos de falla como en las zonas aledañas, la mineralización se presenta de forma masiva y distribuida a lo largo de un amplio halo. Esto lleva a plantear la importancia de las estructuras dentro de los procesos de mineralización y que, dados los antecedentes bibliográficos, la zona en estudio estuvo en condiciones superficiales al momento de producirse los procesos metalogénicos dado la importante distribución areal de la mineralización y que fue favorecida por la interacción con aguas meteóricas y el hidrofracturamiento involucrado, lo que fue determinante para la dispersión de la mineralización metálica dentro de las rocas hospedantes dentro del Distrito.

Según Hammarstrom (2007), los depósitos polimetálicos con reemplazamiento de carbonatos ocurren como un skarn, rodeando las zonas de contacto entre los sedimentos y la intrusión, por lo que tanto en el depósito de carbonatos con reemplazamiento polimetálico como en los depósitos

de tipo skarn ricos en metales base la mineralización de mena se encuentra con zonación. La mineralización de Cu y Au se encuentra enriquecida en las cercanías de la intrusión y la mineralización de Zn-Pb-Ag se encuentra en zonas distales del sistema mineralizado. Esto concuerda con los datos recopilados en los sectores analizados y refuerzan los argumentos que postulan a este yacimiento como un depósito tipo Skarn.



## 7. CONCLUSIONES.

A partir de toda la información geológica entregada por este trabajo es posible establecer las siguientes conclusiones del presente trabajo, algunas de las cuales son entregadas a modo de hipótesis, a falta de análisis mineralógicos y geoquímicos más profundos a realizar dentro del Distrito en el futuro. Estas conclusiones pueden ser divididas en los siguientes puntos.

### 7.1. Aspectos Litológicos y Mineralización de Mena y Alteración.

- La zona de estudio presenta una importante distribución de rocas calcáreas y volcanosedimentarias con interacción de actividad volcánica-hipoabisal representada por cuerpos intrusivos y rocas volcánicas de tipo intermedio-ácido.
- Los datos mineralógicos de mena y alteración, sumado a los datos petrográficos de las unidades litoestratigráficas e intrusivas presentes en el área de estudio, soportan la idea de un yacimiento de tipo Skarn.
- La estratigrafía del yacimiento juega un papel muy importante en la distribución de la mineralogía de mena y alteración, particularmente en la disposición de Au, Zn, Pb, Bi, As y Fe, entre otros. Esto por cuanto en la unidad de Manto Principal y Manto Superior se disponen principalmente menas de Zn-Pb y bajas leyes de Au-Ag-As y Bi. Posteriormente, la disposición de la unidad de Pórfido Riolítico, que subyace a las dos unidades anteriores y se intercala entre la unidad de Manto Principal y la unidad de Areniscas Inferiores, constituye una especie de “frontera” o sello a la mineralización, dado que es una unidad litológica “estéril” y que no alberga mineralización económica, sin embargo, subyaciendo a esta unidad litológica, se encuentra la unidad de Areniscas Inferiores que alberga las mayores concentraciones de menas de Au-Ag-Bi y As, entre otros.
- La presencia de carbonato y bioclastos compuestos de  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , en las rocas hospedantes de la mineralización del Distrito resulta un factor muy importante

para la abundancia de las menas de Zn-Pb-Fe y Cu en las unidades pertenecientes al Manto Principal y Manto Superior, respectivamente. Esta abundancia va desde reemplazo selectivo de bioclastos hasta un reemplazo total y pervasivo de la roca por mineralización sulfurada.

- Las unidades de Areniscas Inferiores, que concentran la mayor parte de la mineralización aurífera y de menas de Ag-As-Bi-Co, si bien contienen menos cantidades de bioclastos, se observa que los procesos de mineralización, en etapa de skarn retrógrada, tienen mejores condiciones de formación de menas de los elementos antes descritos.
- Esto puede relacionarse a que en la unidad de Areniscas Inferiores se desarrolló un tipo de depósito Skarn de Au reducido, según la clasificación hecha por Meinert (1992).
- Esta clasificación de Skarn de Au reducido, propuesta en este trabajo para la mineralización de mena y alteración que existe en la unidad de Areniscas Inferiores y, en parte, en el sector de Aserradero, involucra la existencia de altas leyes de Au (de 5-15 gr/ton y más), en estrecha relación con mineralización de Bi-Te-As± Co relacionados a la presencia de plutones de composición diorítica-granodiorítica reducidos en ilmenita lo que concuerda con los datos obtenidos desde las rocas intrusivas que bordean distintos sectores del Distrito El Toqui.
- En consecuencia, usando argumentos mineralógicos y metalogénicos se postula que en los sectores de Aserradero y Porvenir se identifica un yacimiento de tipo Skarn de Zn-Pb, más mineralización de Au en Aserradero.  
Por otra parte, se postula que en el sector de las Minas Profundas se reporta la existencia de un depósito de tipo Skarn de Au reducido.

## 7.2 Aspectos Estructurales.

- La zona de estudio tiene un importante control estructural, definido por la existencia de numerosas fallas de tipo normal y de orientación NW-SE. Algunas estructuras menores se disponen con orientación NE-SW y E-W.
- Las fallas constituyen elementos muy importantes en la distribución y zonación de los procesos de mineralización de tipo skarn que afectaron a la zona de estudio, canalizando los fluidos hidrotermales y generando halos de mineralización y alteración.
- La predominancia de tipo normal de las estructuras principales es concordante con el régimen tectónico extensivo del área en estudio según los datos bibliográficos revisados, correspondiente a un ambiente de cuenca de rift producida, a modo de hipótesis, por un debilitamiento térmico de la corteza producido durante el Cretácico Inferior.
- La amplia distribución de la mineralización en las rocas hospedantes sugiere que, al momento de producirse los procesos metalogénicos, la zona de estudio se encontraba en profundidades someras, menores a 4 km, que provocaron un comportamiento frágil de las rocas, y por ende un fracturamiento importante de las unidades litológicas hospedantes, lo que permitió la interacción con aguas meteóricas que, junto a la distribución de fluidos hidrotermales desde los cuerpos magmáticos, fueron capaces de provocar la precipitación de los metales y los cambios mineralógicos evidenciados en las unidades litoestratigráficas en el Distrito El Toqui.

## 7.3 Propuestas de Trabajo.

A partir del trabajo realizado es posible definir algunos puntos a revisar en el futuro, con el objetivo de ampliar los conocimientos de la zona de estudio y generar nuevas zonas de exploración y planes de expansión de la minería dentro del Distrito El Toqui.



Dentro de estas propuestas se postulan los siguientes puntos a considerar:

- Realizar estudios geoquímicos en mayor profundidad a los cuerpos intrusivos presentes en la zona a fin de identificar la o la fuente(s) de metales que generaron la mineralización en el Distrito El Toqui.
- Efectuar campañas de exploración que determinen los límites de las unidades de rocas calcáreas del Grupo Coyhaique, con el objetivo de analizar el potencial económico que presentan, dadas las favorables condiciones que presentan para procesos metalogénicos de importancia económica.
- Expandir los estudios geológicos a las áreas donde se disponen las unidades de Areniscas Inferiores, dado que constituyen un potencial de Au-Bi-Ag, As, Te y Co.
- Este yacimiento constituye una fuente variada de metales de importancia económica, aparte de Zn-Pb-Au-Ag, también se identifican Co-Bi-Te, los cuales presentan un valor importante dentro del mercado internacional de metales, por lo que es importante de recuperar dentro del concentrado mineral elaborado en la Planta.

## REFERENCIAS.

- AGUIRRE URRETA, M.B. & RAMOS, V. A. 1981.** Estratigrafía y paleontología de la alta cuenca de río Roble. Cordillera Patagónica. VIII Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 101-138. San Luis.
- AGUIRRE URRETA, M.; SUÁREZ, M.; BRUCE, Z.; DE LA CRUZ, R. & RAMOS, V. 2000.** Bioestratigrafía y ammonoideos de la Formación Katterfeld, (Cretácico inferior) en Puerto Ibáñez, IX Región, Chile. IX Congreso Geológico Chileno, Actas 2, (Simposio Nacional 2): 183-187. Puerto Varas.
- ALFARO, V. 2012.** Geología del nuevo cuerpo mineralizado Mallín Sur, en Mina El Toqui, Región de Aysén, Chile. Seminario Programa Especial de Titulación. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito):105 pp. Concepción.
- ARAVENA, N. 2014.** Geología y Geopatrimonio del área de Cerro Castillo, XI Región de Aysén, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología (Inédito): 99 pp., Santiago.
- BARNETT, W. 1991.** Petrographic Metallurgical Electron Microprobe Investigation of Selected Samples (36) from the Doña Rosa Deposit, Chile. Informe Interno LAC Minerals.
- BELL, C. M. & SUÁREZ, M. 1997.** The Lower Cretaceous Apeleg Formation of the Aysen Basin, Southern Chile. Tidal Sandbar Deposits of an Epicontinental Sea. Revista Geológica de Chile, Vol. 24, N°2, p. 203-225. Santiago.
- BELL, C. M.; TOWNSEND, M.; SUÁREZ, M. & DE LA CRUZ, R. 1994.** The depositional environments of the Lower Cretaceous Coyhaique Group, Aysen Basin, Southern Chile (45° - 46°S). Congreso Geológico Chileno N° 7. Acta 1: 402-402. Concepción.
- BUSSEY, S.; MEINERT, L. & KAKARIEKA, A. 2010.** Skarn Porphyry, vein, and replacement mineralization in the Toqui District, Southern Chile. Society of Economic Geology. Special Publication Number 15 The Challenge of Finding New Mineral Resources: Global Metallogeny, Innovative Exploration and New Discoveries. 399-420. Denver.
- CAMACHO MARTÍNEZ VARA DE REY; C., LÓPEZ, ANA; GARCÍA, A & ROMERO, J. 2001.** El gráfico de recurrencia en el Análisis de Series Temporales: El Programa VRA. Revista Electrónica de Metodología Aplicada, Vol. 6 n° 1, pp. 1-12. Sevilla.
- CHARRIER, R.; PINTO, L. & RODRÍGUEZ, M.P. 2007.** Tectono-stratigraphic evolution of the Andean orogen in Chile, in: Geology of Chile, Chapter 3 (Gibbons, W. and Moreno, T., editors), The Geological Society. Special Publication, pp. 21-116. London.
- COLLAO, S. 1979.** Anomalías Geoquímicas asociadas a depósitos de Pb-Zn en Río Toqui, XI Región, Chile. Congreso Geológico Chileno N° 2. Acta 2: 89-108. Arica.

- COLLAO, S. 1994.** Inclusiones fluidas en la formación de los yacimientos de Zn-Pb-Cu-Ag de El Toqui XI Región, Chile. Congreso Geológico N° 7. Acta 2: 766-770. Concepción.
- COVACEVICH, V.; DE LA CRUZ, R. & SUÁREZ, M. 1994.** Primer hallazgo de fauna del Berriasiano Inferior (Neocomiano), en la Formación Ibáñez, Región XI, Aysén, Chile. Congreso Geológico Chileno N° 7. Acta 1: 425-429. Concepción.
- DE LA CRUZ R.; SUÁREZ M.; BELMAR M.; QUIROZ D. & BELL M., 2003:** Geología del Área Coihaique-Balmaceda, Región Aisén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Escala 1:100.000, serie Geología Básica N°80. Santiago.
- EINAUDI, M. & BURT, D. 1982.** A special issue devoted to skarn deposits. Introduction Terminology, Classification and Composition of Skarn Deposits. Society of Economic Geology. Vol. 77: 745-754.
- EINAUDI, M. T.; MEINERT, L. D. & NEWBERRY, R. J. 1981.** Skarn Deposits. Society of Economic Geology. Vol. 75: 317-391.
- ESCALANTE, A.; DIPPLE, G.M.; BARKER, S.L. & TOSDAL, R. 2010.** Defining trace-element alteration halos to skarn deposits hosted in heterogeneous carbonate rocks: Case study from the Cu-Zn Antamina skarn deposit, Peru. Journal of Geochemical Exploration, Vol. 105: 117-136.
- ESPINOZA, W. & FUENZALIDA, R. 1971.** Geología de la Provincia de Aysén entre los Paralelos 45° y 46° de Latitud Sur. Informe inédito, convenio CORFO Aysén-Instituto de Investigaciones Geológicas. 50 pp. Santiago.
- FISHER, R. V. 1960.** Classification of volcanic breccias. *Geological Society of America*. Vol. 71: 973-982.
- FOLGUERA, A.; RAMOS, V. & VIEIRO, J. 2003.** Tectónica neógena en el extremo sur de la Cordillera Patagónica Septentrional. Cuenca de los lagos la Plata y Fontana (45°S). Revista de la Asociación Geológica Argentina. Vol. 58: 201-208. Buenos Aires.
- FRANCHINI, M.; MEINERT, L. & VALLÉS, J. 2002.** First occurrence of Ilvaite in a Gold Skarn Deposit. *Economic Geology*. Vol. 97: 1119-1126.
- GAMMONS, CH. & WILLIAMS-JONES A.E. 1997.** Chemical mobility of gold in the porphyry-epithermal environment. *Society of Economic Geology*. Vol. 92: 45-49.
- GONZÁLEZ BONORINO, G. & SUÁREZ, G. 1995.** Paleoambientes sedimentarios de la Formación Apeleg, Cretácico Inferior de la Cuenca de Aysén, XI Región, Chile. *Revista Geológica de Chile*. Vol 22: 115-126. Santiago.
- GRANT, M. 1988.** The geology of Junction Reefs and the Sheahan-Grants gold deposit, Mandurama, New Zealand. BSc. Thesis, Australian National University (unpublished): 123 pp. Camberra.

- HALLER, M. & LAPIDO, O. 1980.** El Mesozoico de la Cordillera Patagónica Central. Revista de la Asociación Geológica Argentina. Vol. 35: 25-51. Buenos Aires.
- HAMMARSTROM, J. 2002.** Environmental Geochemistry of Skarn and Polymetallic carbonate-replacement deposit models. U.S Geological Survey Open-File Report. Vol. 2 (195): 115-142.
- HEDENQUIST, J. W. & AOKI, M. (1991).** Meteoric interaction with magmatic discharges in Japan and the significance for mineralization. *Geology*, Vol. 19: 1041–1044.
- IANNIZZOTTO, N.; FOLGUERA, A.; LEAL, P. & IAFFA, D. 2004.** Control tectónico de las secuencias volcanoclásticas neocomianas y paleogeografía en la zona del Lago La Plata (45°S). Sector interno de la faja plegada y corrida de los lagos La Plata y Fontana. Revista de la Asociación Geológica Argentina. Vol. 59: 655-670. Buenos Aires.
- KAKARIEKA, A. 2003.** Exploración y descubrimiento del depósito de Zinc de Estatuas, Distrito Toqui, Aysén. Congreso Geológico Chileno N° 10. Actas 2: 1-10. Concepción.
- KAKARIEKA, A. 2006.** El Skarn de Au Aserradero. Distrito Toqui, Aysén. Congreso Geológico Chileno N° 11. Vol. 2: 287-290. Antofagasta.
- KARUP-MØLLER, S. & PAULY, H. 1979.** Galena and associated ore minerals from the cryolite at Ivigtut, South Greenland. *Greenland Geosciences*. Vol 2: 1-25. Nuuk.
- KLEIN, C. & C. S. HURLBUT J.R., 1993.** Manual of Mineralogy. John Wiley Publishing Co.: 681 pp. New York.
- MEINERT, L.D. 1983.** Variability of skarn deposits, guides to exploration. (Boardman, S.J. editor). *Revolution in the Earth Sciences*. Kendall-Hunt Publishing Co: 301–316. Iowa.
- MEINERT, L.D. 1987.** Skarn zonation and fluid evolution in the Groundhog mine, Central Mining district, New Mexico: *Economic Geology*. Vol.82: 523–545.
- MEINERT, L. 1992.** Skarns and Skarn Deposits. *Geoscience Canada*. Vol. 19: 145-162.
- MEINERT, L.D. 2000,** Gold in skarns related to epizonal intrusions. *Economic Geology*. Vol. 13: 347-375.
- MEINERT, L.D.; DIPPLE, G. M. & NICOLESCU, S. 2005,** World Skarn Deposits. *Economic Geology*. Vol. 100: 299-336.
- MEINERT, L.; HEDENQUIST, J.; SATOH, H. & MATSUHISA, Y. 2003.** Formation of Anhydrous and Hydrous Skarn in Cu-Au Ore Deposits by Magmatic Fluids. *Economic Geology Society*. Vol. 98: 147-156.
- MEINERT, L.D.; HEFTON, K.K.; MAYES, D. & TASIRAN, I. 1997.** Geology, zonation, and fluid evolution of the Big Gossan Cu-Au skarn deposit, Ertsberg district, Irian Jaya. *Economic Geology*. Vol. 92: 509-526.

- MINISTERIO DE AGRICULTURA. 2005.** Atlas Región de Aysén. SERPLAC Aysén. 41 pp. Aysén.
- MYERS, G. & MEINERT, L. 1991.** Alteration, mineralization, and gold distribution in the Fortitude gold skarn, in *Geology and Ore Deposits of the Great Basin*. Geological Society of Nevada. Vol. 1: 407-418. Reno
- NIEMEYER, H. 1975.** Geología de región comprendida entre el Lago General Carrera y el río Chacabuco, Provincia de Aysén, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología (Inédito): 309 pp. Santiago.
- NIEMEYER H.; SKARMETA J.; FUENZALIDA R. & ESPINOSA W. 1984.** Hojas Península de Taitao y Puerto Aysén, Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Escala 1:500.000, N° 60-61, 80 pp.
- OLIVERO, E. & AGUIRRE-URRETA, M. 2002.** Sucesión de amonoides de la Formación Katterfeld (Valanginiano-Hauteriviano) en su área tipo, Lago Fontana, Chubut, Argentina. Congreso Geológico Argentino N° 15. Actas 1: 485-490. El Calafate.
- PANKHURST R. & HERVÉ F., 1994.** Granitoid age distribution and emplacement control in the North Patagonian batholith in Aysen (44°-47°S). Congreso Geológico Chileno N° 7. Actas 2: 1.409-1.413. Concepción.
- PARADA M.; LAHSEN A. & PALACIOS C. 2001.** Ages and geochemistry of Mesozoic-Eocene back-arc volcanic rocks in the Aysen region of the Patagonian Andes, Chile. *Revista Geológica de Chile*. Vol. 28, N°1: 25- 46. Santiago.
- PALACIOS, C.M.; BERTENS, A. & RUZ, L. 1996.** Polymetallic skarn mineralization at El Toqui, Aysén province, southern Chile. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*. Actas 7: 723-737. Stuttgart.
- PALACIOS, C.; BERTENS, A.; PARADA, M.; LAHSEN, A. & RUZ, L. 1994.** Termometría y salinidad de los fluidos de la etapa tardía de alteración del yacimiento El Toqui, Aysén, Chile. Implicancias metalogénicas. Congreso Geológico Chileno N° 7. Actas 2: 868-872. Concepción.
- PEARSON, K. 1896.** Mathematical Contributions to the Theory of Evolution. Regression, heredity and panmixia. *Real Society of London*. Vol. 60: 489-498.
- PÉREZ, C. 2010.** Análisis Microscópico Mineralógico sobre Muestras de Mina El Toqui. Laboratorio Microscopía de Minerales. Guarachi Ingenieros Ltda. 67 pp. Santiago.
- PIRAJNO, F. 2009.** Hydrothermal Processes and Mineral Systems. Geological Survey of Western Australia: 1273 pp. Perth.
- PLOSZKIEWICZ, J.V. & RAMOS, V.A., 1977,** Estratigrafía y tectónica de la Sierra de Payaniyeu, provincial del Chubut. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. Vol. 32: 209-226. Buenos Aires.

- QUIROZ, D. 2000.** Geología y geoquímica de la Formación Ibáñez y Batolito Patagónico al norte del Lago General Carrera (46°00' – 46°30'S y 72°00' – 72°20'W), XI Región, Aysén. Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción. Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 175 pp., Concepción.
- QUIROZ, D.; BRUCE, Z. 2010:** Geología del área Puerto Ingeniero Ibáñez-Villa Cerro Castillo, Región Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, escala 1:100.000, N° 124, 48 pp.
- RAMOS, V.A. 1976.** Estratigrafía de los Lagos La Plata y Fontana, Provincia del Chubut, República Argentina. Congreso Geológico Chileno N° 1. Acta A: 43-64. Santiago.
- ROBB, L. 2005.** Introduction to Ore-Forming Processes. Blackwell Science Publishing Co.: 373 pp. Oxford.
- SAAVEDRA, C. 2009.** Evaluación hidrogeológica e hidrogeoquímica de la cuenca del río Mañihuales, Región de Aysén, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito):125 pp. Concepción.
- SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (SERNAGEOMIN), 2003.** Mapa Geológico de Chile: Versión Digital, escala 1:1.000.000. Publicación Geológica Digital, N° 4, versión 1.0. 25 pp.
- SUÁREZ, M. & DE LA CRUZ, R. 1994.** Estratigrafía y paleogeografía mesozoica de Aysén nororiental (45°-46°S), Chile. Congreso Geológico Chileno N° 7. Actas 2: 538-542. Concepción.
- SUÁREZ M. & DE LA CRUZ R., 1997.** Cronología magmática de Aysén Sur, Chile (45°-48°30' L. S). Congreso Geológico Chileno N° 8. Actas 2: 1.543-1.547. Antofagasta.
- SUÁREZ, M. & DE LA CRUZ, R. 2000.** Geología de la zona del lago General Carrera, Región de Aysén, Chile. Congreso Geológico Chileno N° 9. Actas 2: 264-268. Puerto Varas.
- SUÁREZ, M. & DE LA CRUZ, R. 2001.** Jurassic to Miocene K-Ar dates from eastern central Patagonian Cordillera plutons, Chile (45°-48°S). *Geological Magazine*. Vol. 138 (1): 53-66.
- SUÁREZ M.; DE LA CRUZ R. & BELL M. 2007.** Geología del Área Ñireguao-Baño Nuevo, Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Escala 1:100.000, serie Geología Básica N° 108, 57 pp.
- SUÁREZ M.; PRIETO X.; BELMAR M. & QUIROZ D. 1994.** Estratigrafía terciaria del sector nororiental de Aysén (44°-46° LS), Chile. Congreso Geológico Chileno N° 7. Actas 2: 533-537. Concepción.
- TAPIA, I. 1984.** Informe Paleontológico de material faunístico proveniente de la Mina El Toqui. Informe inédito.

- THOMPSON, S. 2002.** Late Cenozoic geomorphic and tectonic evolution of the Patagonian Andes between latitudes 42°S and 46°S: An appraisal based on fission-track results from the transpressional intra-arc Liquiñe-Ofqui fault zone. *Geological Society of America. Bulletin.* Vol 1: 1.159-1.173.
- TOWNLEY, B. & GODWIN, C. 2001.** Isotope characterization of lead in galena from ore deposits of the Aysen Region, Southern Chile. *Mineralium Deposita* (2001). Vol. 36: 45-57.
- TOWNLEY, B. & PALACIOS, C. 1999.** Ore Deposits and Metallogenesis of Mainland Patagonia, Aysen, Chile. *Exploration and Mining Geology.* Vol 8, (1, 2): 91-108.
- TOWNLEY, B.; MAKSAEV, V.; PALACIOS, C.; LAHSEN, A. & PARADA, M. 2000.** Base and Precious Metals Geochemistry of Rock Units of the Mainland Aysen Region, Chilean Patagonia. *Journal of Geochemical Exploration.* Vol 68: 21-46.
- VERA, J., 1994.** Estratigrafía. Principios y Métodos. Editorial Rueda. 806 pp. Madrid.
- WELLMER, F.; REEVE, E.; WENTZLAU, E. & WESTEMBERG, H. 1983.** Geology and Ore Deposits of the Toqui District, Aysen, Chile. *Economic Geology.* Vol 78: 1.119-1.143.

