



**UNIVERSIDAD  
DE ATACAMA**

FACULTAD DE INGENIERÍA  
**Departamento de Geología**

**CARACTERIZACIÓN GEOLOGICA Y DETERMINACIÓN  
DEL POTENCIAL ECONOMICO DEL DISTRITO  
MINERO VIRGEN DE ANDACOLLO**

**Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el  
título de Geólogo**

**FELIPE FUENZALIDA ROJO**

**Copiapó, marzo 2022**

Profesor Guía: Dr. Karl Riveros Jensen

## Dedicatoria

A **Maximiliano Fuenzalida Ch**, mi pilar fundamental y mi más grande orgullo

A mis padres, **Luis Fuenzalida F** y **Yasna Rojo O**, gracias por estar incondicionalmente

A mis hermanos y primos, por darme esa alegría infinita que se necesita para llegar

A mi hermosa familia, que me ha enseñado lo bello de la vida

## Agradecimientos

Mi más grande gratitud a todos los profesores que tuve la oportunidad de escuchar, aprender y conocer durante mi pasar por la Universidad, a mi profesor guía Karl Riveros por guiarme en este camino, también mencionar a Miguel Cáceres, Wolfgang Griem y Ximena Robles quienes me brindaron interesantes conversaciones y buenos consejos, destacar también con mucho cariño a Paola Villalobos quien me apoyo desde el primer día y siempre estuvo a mi lado.

También quiero dar especial gratitud a todas esas grandes amistades que me ha dejado este pasar por mi querido Departamento de Geología, he aprendido muchísimo de cada uno de ustedes y espero poder seguir haciéndolo, Badith, Shama, Bruno, Suma, Veliz, Prisci, Momo, Magaña, Toti, Felipe Reynoso, Francisco Alfaro y a todos los que me acompañaron en este proceso.

También quiero agradecer a mi familia por siempre darme la fuerza necesaria para poder desarrollarme en todos los ámbitos de la vida, a mis abuelos Luis Fuenzalida Robles y Rosa Fernández Núñez por todo el inmenso amor que me entregan día a día, a mis tías Rosita y Alejandra por sus consejos y constante apoyo y a mi hermosa compañera Pía Zuleta por todo su amor.

Pero por sobre todas estas sinceras y humildes palabras, quiero agradecer a mi hijo Maximiliano, gracias por ser tan noble y paciente, no es fácil ser padre joven, pero a tu lado, la vida siempre se torna color azul.

## Resumen

Este estudio fue encargado por el Sr. Ovidio Veliz Zoroastro y corresponde a un análisis técnico-económico para evaluar la potencialidad de un negocio minero a pequeña escala, lo cual permita asegurar la sustentabilidad del proyecto, cumpliendo los plazos y lineamientos estratégicos establecidos como ruta crítica para su desarrollo.

El proyecto se ubica en la Región de Atacama, Chile, en el sector del prospecto Macarena-Andacollo, corresponde a un proyecto del tipo Brown Field que se emplaza en una zona histórica de producción de cobre con mucho potencial de exploración, cuyos contenidos son considerados de alta ley.

El yacimiento minero Virgen de Andacollo consta de un sistema vetiforme de origen mesotermal, que cuenta con corridas de vetas de 100 m aproximadamente que se conjugan en estructuras de potencias promedio de 0.5- 1.5 m, con mineralización económica en clavos mineralizados que se componen principalmente de vetas de cuarzo con crisocola, malaquita y atacamita en la zona oxidada. También se encontraron sectores mixtos con cantidades considerables de calcosina, bornita y calcopirita, existiendo continuidad de las estructuras mineralizadas, los muestreos y análisis realizados en terreno evidencian una alta variabilidad de la ley de Cu, pero siempre con una continuidad en sus vetas.

Las principales alteraciones hidrotermales que se observaron en terreno son: alteración clorítica intensa, epidotización intermedia, alteración a calcita y silicificación débil. Todas ellas están asociadas a mineralización de cobre y siguen un patrón estructural común muy similar al tipo Riedel, donde la mineralización está controlada por estructuras mayores que conforman un anticlinal de carácter regional que forma parte del Sistema de Fallas de Domeyko. (SFD)

## Abstract

This study was commissioned by Mr. Ovidio Veliz Zoroastro and corresponds to a technical-economic analysis to see the potential of a small-scale mining business, which allows ensuring the sustainability of the project, meeting the deadlines and strategic guidelines established as a critical path. For their development.

The project is located in the Atacama Region, Chile, in the Macarena-Andacollo prospect sector, it corresponds to a Brown Field-type project that is located in a historical copper production area with a lot of exploration potential, whose contents are considered of high law.

The Virgen de Andacollo mining deposit consists of a vein system of mesothermal origin, which has vein runs of approximately 100 m that combine in structures with average strengths of 0.5-1.5 m, with economic mineralization in mineralized nails that are mainly composed of quartz veins with chrysocolla, malachite and atacamite in the oxidized zone. Mixed sectors were also found with considerable amounts of chalcocite, bornite and chalcopyrite, with continuity of the mineralized structures, the samplings and analyzes carried out in the field show a high variability of the Cu grade, but always with continuity in their veins.

The main hydrothermal alterations observed in the field are: intense chlorite alteration, intermediate epidotization, alteration to calcite and weak silicification. All of them are associated with copper mineralization and follow a common structural pattern very similar to the Riedel type, where mineralization is controlled by larger structures that make up a regional anticline that is part of the Domeyko Fault System. (SFD)

## Contenido

1.	Introducción .....	10
1.1	Problema de investigación.....	10
1.2	Objetivos.....	11
1.2.1	Objetivo General.....	11
1.2.2	Objetivos Específicos .....	11
1.3	Ubicación y accesos.....	12
2.	Metodología .....	13
2.1	Etapa pre terreno.....	13
2.2	Etapa de Campo.....	14
2.3	Etapa de gabinete.....	15
3.	Marco teorico .....	18
3.1	Marco Geologico Regional.....	18
3.1.1	Geología estructural.....	23
3.1.2	Geología económica .....	23
3.2	Marco Teorico.....	25
3.2.1	Contexto tectonico.....	25
3.2.2	Alteración hidrotermal .....	28
3.2.3	Transporte y concentración de metales .....	34
4	Resultados .....	36
4.1	Unidades litológicas .....	36
4.2	Alteración .....	40
4.3	Mineralizacion .....	42
4.3.1	Geoquimica de zonas mineralizadas.....	43
4.3.2	Geoquímica de zonas no mineralizadas.....	51
4.4	Geología estructural y lineamientos .....	58
4.4.1	Secciones transversales .....	58
4.4.2	Lineamientos Virgen de Andacollo XVII y XVIII (Sector Sur).....	61

4.4.3	Lineamientos Virgen de Andacollo XXII, X y IX (Sector Norte).....	63
4.4.4	Apófisis y diques .....	67
5.	Discusión .....	69
6.	Conclusiones y recomendaciones.....	73
7.	Referencias bibliográficas .....	75

### Índice de figuras

Figura 1.1.3.1	Ubicación y acceso Virgen de Andacollo .....	12
Figura 2.2.3.1	densidades promedio de la corteza modificado de Winkler, E.M. (1973) y Komar,E (1987).....	17
Figura 3.1.1:	Modificado de la Carta Geológica Inca de Oro 1:100.000 (SERNAGEOMIN). Los rectángulos en rojo en planta y perfil marcan el área del proyecto Virgen de Andacollo. ....	18
Figura 3.2.1.1	Formación de depósitos minerales en sistemas magmáticos hidrotermales relacionados a arcos volcánicos en márgenes convergentes (tomado y modificado de Giggenbach, 1997). ....	26
Figura 3.2.1.2	Solubilidad de H <sub>2</sub> O en fundidos silicicados de composición andesítica y basáltica a 1100°C. Un magma de composición intermedia con 2.5% H <sub>2</sub> O requeriría 75, 60 y 10 % de cristalización para alcanzar saturación a 5 kbar (A), 2 kbar (B) y 0.5 kbar, .....	27
Figura 3.4.2.1	Reacciones de hidrólisis de feldspatos en función de razón K <sup>+</sup> /H <sup>+</sup> (a),Na <sup>+</sup> /H <sup>+</sup> (b) y Ca <sup>2+</sup> /H <sup>+</sup> (Burt y Rose, 1979) .....	30
Figura 3.4.2.1	Tabla de composición mineralógica en las alteraciones hidrotermales en la formación de depósitos minerales, según tipo de deposito y pH de las soluciones (modificado de Corbett y Leach, 1998, por Camprubí et al., 2006). ....	31
Figura 3.4.2.2	Patrón generalizado en la zonación de la alteración-mineralización para un sistema de pórfidos de Cu (tomado Sillitoe (2010)).....	34
Figura 4.1.1.	Intercalación de areniscas grisáceas a pardo amarillentas que presentan gradacion en la base a conglomerados con pequeños clastos(A) Estratificacion y manto de las capas de areniscas y conglomerados, N55E/27SW (B). ....	36

Figura 4.1.2. A) Andesitas con fenocristales de piroxeno y plagioclasa, junto con vesículas rellenas con clorita B) Se observan abundantes vetas de cuarzo y jaspe con bordes de clorita. ....	37
Figura 4.1.3. Afloramiento con mineralización de crisocola, malaquita, atacamita y pátinas de calcosina. ....	38
Figura 4.1.4 Unidad microdiorítica gris oscuro. Este cuerpo tabular por lo general está asociado a mineralización económica. ....	39
Figura 4.2.1 Alteracion a epidota selectiva afectando a las plagioclasas de la andesitas porfídicas y a los conglomerados volcanoclasticos.....	40
Figura 4.2.2 Vetas de jaspe y sílice con bordes de reacción que presentan texturas vuggy sílica y óxidos de fierro, intruyendo a la unidad de andesitas porfídicas. ....	41
Figura 4.2.3. Andesita con intensa alteración a clorita que se presenta como un relleno de amígdalas en las andesitas jurásicas de la Formación Sierra Fraga. ....	42
Figura 4.2.4. Andesita porfídica con textura vuggy sílica... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 4.3.1 A) Mineralización de “óxidos” de cobre (crisocola, turquesa y chenevixita) de alta ley. B) Roca volcánica que presenta vesículas rellenas con clorita y trazas de “óxidos” de cobre.....	43
Figura 4.3.2. Mineralización de “óxidos” de cobre acompañados de sulfuros relictos (calcosina).....	43
Figura 4.3.1.5. Afloramiento Veta Sur emplazada en las Brechas volcanoclasticas, en la propiedad minera Virgen de Andacollo XVII con mineralización de crisocola, malaquita, atacamita y pátinas de covelina. ....	46
Figura 4.3.1.9 Estructura mineralizada de 113 metros de largo, Virgen de Andacollo. IX y X, Veta Norte.....	48
Figura 4.3.1. Vesiculas rellenas con crisocola presentes en el manto andesítico.....	49
Figura 4.4.1 Mapa sector correspondiente a Virgen de Andacollo XXII, X y IX .....	58
Figura 4.4.2 Perfil transversal sector sur A-A” Propiedades mineras sector norte XXII, X y IX .....	59
Figura 4.4.3 Mapa sector correspondiente a Virgen de Andacollo XVII y XVIII. ....	60
Figura 4.4.4 Perfil transversal B-B” .....	60

Figura 4.4.2.1. Litología sector Sur la unidad A corresponde a la unidad de Areniscas y conglomerados, sobreyaciendo en contacto por falla (línea amarilla) a la unidad B que corresponden a la unidad de brechas volcanoclásticas.....	62
Figura 4.4.3.1 Mapa de acercamiento propiedad minera Virgen de Andacollo IX y X, sector de mineralización mas relevante.....	63
Figura 4.4.3.2 Labor minera con presencia de óxidos de cobre (malaquita, crisocola y turquesa), la orientación preferencial de la estructura es N30W/80.....	64
Figura 4.4.3.3 Amígdalas rellenas con crisocola y cuarzo emplazadas en el manto lenticular andesítico el cual atraviesa las propiedades IX y X. ....	65
Figura 4.4.3.4 A) Zanja que muestra la continuidad de una veta B) Zona de interés económico corresponde a una estructura mantiforme de mayor volumen con anomalías de óxidos de cobre en superficie.....	66
Figura 4.4.3.5 Zonas con vetilleo polidireccional de cuarzo con trazas de crisocola en las zonas aledañas al vetilleo. ....	67
Figura 4.4.4.1 Dique de composición microdiorítica con crisocola y atacamita en sus bordes .....	68

### Indice de tablas

Tabla 1.3.4.2 Comportamiento típico de los elementos mayores durante la alteración hidrotermal en rocas volcánicas reaccionando con un fluido caliente (Maksaev (2001))....	29
Tabla 4.3.1.1 Resumen propiedades y estructuras con interés económico.....	44
Tabla 4.3.1.2 Resumen Veta Sur .....	44
Tabla 4.3.1.2 Analisis realizados mediante ICP, Veta Sur mediante chip sample .....	45
Tabla 2.3.1.6 Resumen Veta Norte emplazada en las andesitas porfídicas de la propiedad Virgen de Andacollo IX y X.....	47
Tabla 4.3.1.7 Resumen de las muestras analizadas mediante ICP, pertenecientes a la veta Norte .....	47
Tabla 4.3.1.10 Resumen Veta Norte, ubicada en la propiedad Virgen de Andacollo X.....	49
Tabla 4.3.1.12 Resumen análisis de todas las muestras presentes en las propiedades .....	50

Tabla 4.3.2.1 Puntos de ubicación en coordenadas UTM para las zonas de muestreo en las pertenencias Virgen de Andacollo XXII (coordenadas en sistema WGS 84).....	51
Tabla 4.3.2.2 Concentraciones de elementos y óxidos mayores para la zona de muestreo Virgen de Andacollo XXII, en porcentaje (%)......	52
Tabla 4.3.2.4 Tabla con concentraciones de elementos menores existentes en la pertenencia Virgen de Andacollo XXII.....	53
Tabla 4.3.2.8 Resumen de la concetracion de datos obtenidos mediante analisis XRF.....	57
Tabla 6.1. Tabla de ubicación, actitud y coordenadas de la propuesta de sondajes. ....	74

Indice de graficos

Grafico 4.3.1.3 Leyes presentes en la Veta Sur, ubicada en la propiedad Virgen de Andacollo XVII.....	45
Grafico 4.3.1.8. Leyes presentes en la Veta Norte (propiedad Virgen de Andacollo XVII). .....	48
Grafico 4.3.2.3 Elementos y oxidos mayores presentes en la propiedad Virgen de Andacollo XXII.....	52
Grafico 4.3.2.5 Concentraciones de elementos menores.....	54
Grafico 4.3.2.6 Concentracion de los elementos mayores pertenecientes a Virgen de Andacollo IX y X. ....	55
Grafico 4.3.2.7 Concentracion de porcentaje de elementos traza. ....	56

# **1. Introducción**

## **1.1 Problema de investigación**

El presente estudio se realiza en el marco de una exploración minera tipo *Brown Field* solicitada por el Sr. Ovidio Veliz Zoroastro, propietario de las propiedades mineras Virgen de Andacollo (IX, X, XVII, XVIII y XXII), ubicadas en la Cordillera de Domeyko, Quebrada La Cortadera, a 87 km hacia el NE de la ciudad de Copiapó en el distrito minero Llanos de Varita.

Debido a la escases de estudios y trabajos previos en el área, se vio la necesidad de realizar este estudio para esclarecer la información y evitar incertidumbre, al momento de evaluar la apertura de un negocio minero sustentable a pequeña escala en los plazos y lineamientos estratégicos que el propietario establecio como ruta crítica. Para esto se emplearon técnicas descriptivas y analíticas, las que incluyen muestreo en terreno junto con el análisis mediante espectrometría de plasma inducido (ICP), fluorescencia de rayos X (XRF) y prueba de fuego (Fire Assay) de las zonas mineralizadas presentes en la zona.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Determinar el potencial económico del Distrito Minero Virgen de Andacollo que permita su explotación a escala de pequeña minería.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Definir y caracterizar petrográficamente las diferentes unidades litológicas, alteraciones hidrotermales y zonas mineralizadas.
- Determinar el control litológico y/o estructural de las zonas mineralizadas.
- Determinar el potencial económico de las zonas alteradas y mineralizadas presentes en las propiedades Virgenes de Andacollo IX, X, XVII, XVIII y XXII.

### 1.3 Ubicación y accesos

El sector “Virgen de Andacollo” donde se encuentran propiedades mineras, se encuentra 90 km aproximadamente al Noreste de Paipote, en la comuna de Copiapó (Fig.1.3.1). Se accede por la ruta internacional CH-31, se avanza 70 km por quebrada Paipote y en el sector “La Puerta” se hace un desvío por la Quebrada San Andrés siguiendo 20 km por la ruta CH-31 hasta la Quebrada La Cortadera, luego avanzar 12 km hacia el interior de la quebrada para el ingreso a las propiedades.

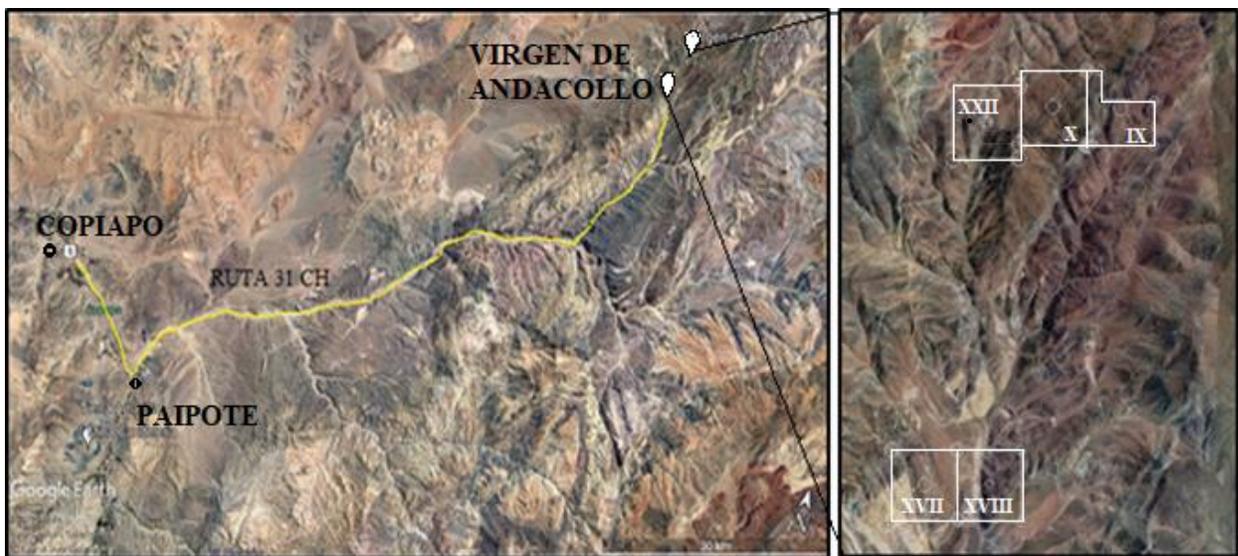


Figura 1.1.3.1 Ubicación y acceso a las propiedades mineras “Virgenes de Andacollo”.

## **2. Metodología**

Para realizar este proyecto se definieron tres etapas metodológicas principales, las cuales se desarrollaron en base a los objetivos planteados en el apartado anterior.

### **2.1 Etapa pre terreno**

- **Revisión bibliográfica**

En esta etapa se recopiló la información necesaria para poder entender la geología local y regional de la zona, y así proponer un modelo genético para el yacimiento, junto con la información técnica que permita generar los criterios adecuados al momento de la recolección de muestras y análisis de alteraciones para el apartado de geología económica.

- **Elaboración de la base de mapeo 1:10.000**

Para una adecuada representación de la litología, alteración y mineralización presente en el distrito minero, se confeccionó una base de mapeo utilizando una imagen satelital descargada mediante el programa SAS Planet 14.1. A esta imagen se le agregaron las coordenadas de la cuadrícula a estudiar en base al sistema geodésico WGS84/UTM 19S con el programa Arc Map10.4 utilizando una escala de 1:10.000.

## **2.2 Etapa de Campo**

- **Mapeo litológico**

Se realizó un mapeo superficial en el cual se describieron y definieron las unidades litológicas, relaciones de contacto y estructuras presentes en el sector de estudio. Se recolectaron un total 25 muestras frescas para ser analizadas petrográfica y geoquímicamente.

- **Mapeo de alteración y mineralización**

Para este apartado se analizó de manera más exhaustiva las unidades litológicas alteradas y mineralizadas, definiendo su intensidad, modo de ocurrencia y distribución espacial en el sector de estudio. Se recolectaron un total 20 muestras alteradas y mineralizadas para ser analizadas petrográfica y geoquímicamente.

- **Muestreo de estructuras mineralizadas**

En este apartado se seleccionaron las zonas de mayor interés económico del sector y se realizaron mediciones estructurales tipo americano para determinar el control de las estructuras mineralizadas, también se tomaron muestras para análisis geoquímicos de Au, Cu total y soluble dependiendo de las características geológicas del afloramiento o estructura.

Para el caso de las vetas se aplicó un muestreo del tipo “Chips Sample” en base a los protocolos de muestreo establecidos, para los desmontes se aplicó muestreo del tipo “Grab Sample”, para los mantos andesíticos mineralizados de manera diseminada, se aplicó un muestro aleatorio común, junto con muestreo por trinchera en zonas cubiertas despejadas por maquinaria pesada.

## **2.3 Etapa de gabinete**

- **Descripción macroscópica de muestras**

Descripción y análisis de las muestras recolectadas en terreno, con la finalidad de poder definir con mayor detalle las distintas paragénesis de minerales de alteración que afectan a las rocas en la zona de estudio.

- **Confección de mapa geológico digitalizado**

Se digitalizó el mapa geológico, identificando y diferenciando las zonas de alteración mapeadas, junto con las distintas unidades litológicas, esto se realizará mediante el software ArcMap10.5

- **Procesamiento de los datos geoquímicos**

Se realizó el procesamiento y análisis de los datos obtenidos mediante el Analizador Portátil de Fluorescencia de Rayos X S1 TITAN (XRF) para poder obtener la caracterización geoquímica del sector y así determinar los sectores con mayor interés económico. Además, las muestras con mineralización metálica se enviarán a analizar mediante técnicas más específicas.

- **Análisis geoquímico de las muestras**

Se realizaron análisis de Au, Cu total y soluble, las muestras fueron tomadas aplicando los procedimientos establecidos en la teoría del muestreo y llevadas al laboratorio geológico Geolaquim ubicado en el barrio industrial de Paipote, este laboratorio está certificado bajo los estándares ISO 9001:2008.

Para la determinación del Au se empleó el ensayo al fuego, mientras que para el Cu total y lixiviado se utilizó espectrometría de absorción atómica (E.A.A) con previa exposición en

ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) al 5% durante 12 horas. Además los análisis económicos de los sectores mineralizados se realizaron en base a las tablas de densidades promedios establecidas por Winkler, E.M. (1973) y Komar, E (1987), especificadas en la figura (2.2.3.1).

### Protocolo de muestreo

El protocolo de muestreo también es una parte esencial ya que se debe establecer los procedimientos específicos para el muestreo esto incluye la rotulación, toma y recolección de la muestra, preparación mecánica y tipo de análisis.

Los principales puntos del protocolo de muestreo empleados para este estudio fueron:

- Muestreo fue empleado solo en zonas de con mineralización económica o alteraciones hidrotermales relevantes.
- El muestreo empleado en cada sector de interés será un muestreo múltiple y de carácter aleatorio
- Se realizó una desinfección de los elementos empleados en la recolección de muestras antes de iniciar cada extracción (palas, guantes y martillos)
- Para la extracción se consideraron entre 2 a 3 kg por muestra y al finalizar el procedimiento, guardar el contenido en una bolsa de muestreo inmediatamente.
- Se rotulo cada bolsa, asignándole un código, junto con las coordenadas geográficas, tipo de análisis y observaciones para cada muestra.
- Se adjunto una descripción detallada en la libreta de la zona de interés en la que se describan todas sus características geológicas (texturas, mineralización, estructuras, litología y varios).
- En la rotulación de la muestra se incluyo información sobre tipo de muestra (desmonte, roca, veta, etc), método de recolección, localización y coordenadas, fecha, breve descripción, tipo de análisis a emplear, persona que realizó el muestreo.

### Tabla de densidades

Para la estimación de recursos se utilizaron las tablas de densidades internacionales establecidas por Winkler, E.M. (1973) y Komar, E (1987)(Fig 2.3.1).

Alluvium (wet)	1.96–2.00
Clay	1.63–2.60
Shale	2.06–2.66
Sandstone	
Cretaceous	2.05–2.35
Triassic	2.25–2.30
Carboniferous	2.35–2.55
Limestone	2.60–2.80
Chalk	1.94–2.23
Dolomite	2.28–2.90
Halite	2.10–2.40
Granite	2.52–2.75
Granodiorite	2.67–2.79
Anorthosite	2.61–2.75
Basalt	2.70–3.20
Gabbro	2.85–3.12
Gneiss	2.61–2.99
Quartzite	2.60–2.70
Amphibolite	2.79–3.14
Chromite	4.30–4.60
Pyrrhotite	4.50–4.80
Magnetite	4.90–5.20
Pyrite	4.90–5.20
Cassiterite	6.80–7.10
Galena	7.40–7.60

*Figura 3.2.3.1 densidades promedio de la corteza modificado de Winkler, E.M. (1973) y Komar, E (1987).*

### 3. Marco teorico

#### 3.1 Marco Geologico Regional

El proyecto “Virgen de Andacollo” está incluido en el área donde fue levantada la carta geológica de SERNAGEOMIN Inca de Oro 1:100.000 -(Fig. 3.1.1), la cual abarca desde la Cordillera de la Costa hasta los pies de la Precordillera de la Región de Atacama. El segmento suroriental de la carta muestra una serie de formaciones triásicas, jurásicas y cretácicas que corresponden en general a rocas andesíticas y volcanoclásticas pertenecientes a las Formación La Ternera (Triásico Superior), Formación Sierra Fraga (Jurásico- Cretácico inferior) y Formación Llanta (Cretácico Superior; *Campaniense* y *Maastrichtiense*).

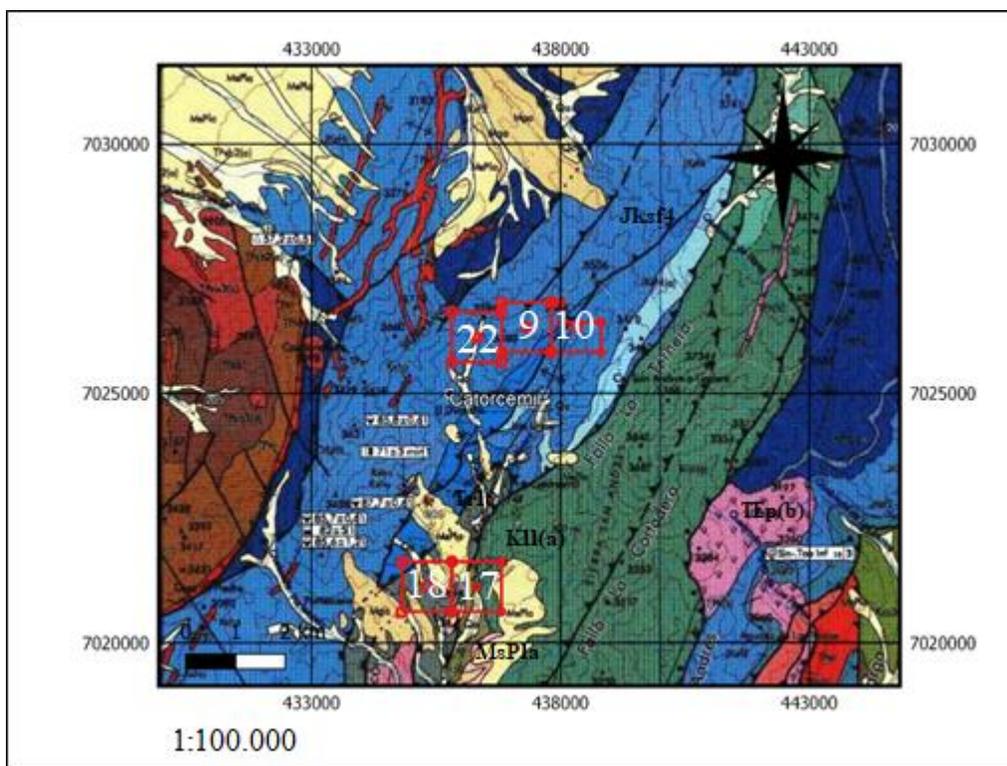


Figura 4.1.1: Modificado de la Carta Geológica Inca de Oro 1:100.000 (SERNAGEOMIN). Los rectángulos en rojo en planta marcan el área del proyecto Virgen de Andacollo.

## **Estratigrafía**

### Granitoides

Al SW de las propiedades Virgen de Andacollo 1 y 2 afloran monzogranitos de Sierra Fraga (Paleozoico superior - Carbonífero-Pérmico) que forman parte de un bloque colgante de una falla normal de bajo ángulo (Falla Huella de Guanaco) asociado al núcleo del complejo extensional de Sierra Fraga. Estos granitoides presentan rasgos de cataclasis con una fuerte alteración a clorita, epidota, sericita y carbonatos, además están relacionados con el núcleo de un anticlinal paralelo a la falla La Ternera bajo la Faja Plegada y Corrida de Potrerillos.

Algunas de las propiedades mineras se emplazan directamente sobre Formación La Ternera, del Triásico, definida como una secuencia de rocas sedimentarias y volcánicas de origen continental. Según Iriarte *et al* (1996) esta se dispone entre fallas de bajo ángulo (Falla Huella de Guanaco y Falla Fraga) sobre rocas paleozoicas y bajo rocas jurásicas. En la zona de Virgen de Andacollo 1 y 2 el espesor de la formación alcanza los 300 metros y consiste de areniscas, conglomerados, limolitas con escasas intercalaciones de lavas basálticas. En el sector de la quebrada La Cortadera se encuentra en contacto inferior por falla con los monzogranitos Sierra Fraga y superior con la Formación Sierra Fraga. Estas tres unidades están deformadas en conjunto en un anticlinal con eje de orientación NNE en el bloque colgante de la Falla de La Ternera. La facies sedimentarias expuestas en la carta Inca de Oro representan un ambiente continental, principalmente fluvial, con niveles aluviales y volcánicos efusivos.

### Formación Sierra de Fraga

En las propiedades estudiadas aflora Formación Sierra Fraga definida por Sepúlveda y Naranjo (1982) de edad Jurásico-Cretácico inferior, la que está conformada por una secuencia volcanosedimentaria, marino continental con un espesor de 1500 metros en el flanco occidental de la sierra homónima en la hoja geológica Carrera Pinto. Esta formación está representada por dos franjas longitudinales: una occidental correspondiente al bloque Sierra Fraga- El Pingo, que se alza entre las fallas El Pingo y La Ternera y una oriental que constituye el bloque colgante de la Falla Agua Amarga, elevada sobre rocas cretácicas y

paleocenas. En la carta Inca de Oro las unidades estratigráficas que afloran correspondientes a la franja occidental son : (1) son las descritas por Iriarte *et al* (1996), asociadas a las fases calcáreas y volcánicas Jksf2 y Jksf4. Entre Jksf4 y Caldera La Banderita se emplaza Jksf5, igualmente hacia el NE de las propiedades.

La litología que conforma la Formación Sierra Fraga consiste en: (1) un nivel sedimentario-calcáreo de edad Jurásico medio ubicado en la franja oriental, consistente de calizas que afloran bajo una secuencia de lavas. Este nivel es cortado por la Falla Agua Amarga en diferentes niveles estratigráficos relacionados a un sistema de duplex en las Vegas de San Andrés (Jksf2), (2) nivel de conglomerados volcanoclásticos y areniscas que se reconoce solamente en las quebradas Corrales y La Banderita, en la franja occidental, que consiste en una secuencia de 350 metros de conglomerados gruesos con intercalaciones de areniscas feldespáticas bien estratificadas. Esta unidad esta ausente en el sector oriental, donde las lavas de la unidad 4 se encuentran apoyadas directamente sobre la unidad calcárea, (3) una unidad 4 consistente de lavas basálticas de piroxeno y olivino con vesículas rellenas de minerales secundarios emplazada en la franja occidental con un espesor de 450 metros. Las lavas, de composición basáltica, contienen fenocristales de piroxeno, olivino y plagioclasa. En la quebrada La Cortadera se reconoce intercalaciones de brechas volcanosedimentarias. En la quebrada Alto Chañaral, la franja oriental presenta una sección de lavas basálticas de aproximadamente 100 metros de potencia, la cual incluye intercalaciones de areniscas calcáreas con una potencia de 500 metros en el extremo sur de la carta Inca de Oro; (4) La unidad 5 de Formación Sierra Fraga corresponde a un nivel volcano-sedimentario compuesto de una secuencia de areniscas y brechas sedimentarias continentales, con intercalaciones volcánicas y calcáreas sobreyaciendo las lavas de la unidad 4 en los sectores de quebrada San Andrés, Sierra Agua Amarga y quebrada Chañaral Alto. También se encuentra esta unidad entre el cerro El pingo y quebrada de Varas, en la quebrada San Andrés y en un cinturón alrededor del borde oriental de la caldera La Banderita. También se encuentran brechas sedimentarias con clastos de lava en matriz de arena cementadas por material calcáreo. En sectores de quebrada San Andrés y Sierra Agua Amarga existen los clastos de los conglomerados basales provenientes de los granitoides paleozoicos que tienen intercalaciones de niveles calcáreos de areniscas y limolita fina. El ambiente deposicional para las rocas de esta formación es, principalmente, volcánico subaéreo, con incursiones

sedimentarias marinas litorales, cercanas a la base y episodios continentales de sedimentación aluvial y fluvial en niveles medio y superior.

#### Formación Llanta

La Formación Llanta, de edad Cretácico superior- Paleoceno inferior, en la zona de la carta de Inca de Oro, aflora en dos franjas N-S separadas por un bloque alzado de basamento jurásico-cretácico. La franja occidental de la formación está limitada por las fallas Quebrada Vasquez y El Pingo y la oriental por las fallas La Ternera y San Andrés. Los dos bloques tectónicos se encuentran intensamente plegados y fallados. En el área de las propiedades mineras se reconoce un nivel de brechas sedimentarias e intercalaciones volcánicas del cual se distinguen dos facies litológicas consistentes en: (a) brechas sedimentarias con bloques de andesitas y riolitas, con una matriz de arena gruesa cuarzo-feldespática con abundante epidota. En las quebradas San Andrés y La Cortadera las brechas alcanzan un espesor de 1600 metros con intercalaciones de volcarenitas y tobas y un nivel de tobas soldadas de composición dacítica rojas de 5 metros de espesor. El ambiente de formación se asocia a un ambiente continental, con registro de sistemas aluviales, fluviales y lacustres con actividad volcánica distal. Esta formación probablemente sea el relleno de una depresión tectónica mayor con facies de conos aluviales cerca del borde de la cuenca y niveles medio finos de facies lacustres y aluviales en las zonas distales y axiales de la cuenca. Los niveles superiores registran el aumento de la actividad volcánica y eventual colmatación de la cuenca.

#### Formación venado

La Formación Venado, de edad Cretácico superior-Paleoceno inferior, definida como una secuencia volcanosedimentaria continental en el extremo sur de la carta por Sepúlveda y Naranjo (1982) se dispone en discordancia angular sobre la Formación Hornitos. Se reconocieron tres niveles estratigráficos, en la carta Inca de Oro solo se reconoce el nivel superior volcánico con un espesor de 400 metros que se encuentra en discordancia con la Formación Cerrillos. El ambiente de depositación es continental volcánico con intercalaciones sedimentarias aluviales proximales.

## Gravas de Atacama

Las Gravas de Atacama, en la carta Inca de Oro, se concentran principalmente a lo largo de la quebrada Chañaral Alto y representan los remanentes del relleno de una paleogeografía caracterizada por cuencas limitadas por altos topográficos hacia el W. Los depósitos tienen una potencia entre 100 y 250 metros. En el sector de la quebrada Chañaral Alto se presenta un nivel de ignimbritas denominada Ignimbrita La Tranca. La litología de estos depósitos corresponden a bancos de 1 a 4 metros de espesor formados por gravas, bloques, arenas y gravilla, con un bajo grado de cementación y variado grado de selección composicional y granulométrica. Se presentan igualmente estructuras como gradación inversa y normal, además de estructuras traccionales como paleocanales, bases erosivas, estratificación cruzada y en artesa e imbricación de clastos. Los clastos principalmente derivan de rocas volcánicas mesozoicas junto a rodados de calizas, areniscas y granitoides. La matriz es mayoritariamente de arenas cuarzo-feldespática con componentes volcanoclasticos y material arcillosos con cementación parcial por sales y carbonatos.

## Depósitos aluviales

La unidad más joven se asocia a depósitos aluviales antiguos del Mioceno superior-Plioceno. Esta unidad está compuesta por gravas y bloques pardo rojizos que en la base preservan la morfología de conos aluviales con pendiente baja. Muestran estratificación de base y techo irregular. En los depósitos son comunes la gradaciones y alternancias granulométricas, así como, las estructuras traccionales. En Inca de Oro estos sobreyacen en leve discordancia de erosión a las Gravas de Atacama. En el curso superior de la quebrada Chañaral Alto los depósitos aluviales antiguos cubren, en discordancia, a los niveles inferiores de las Gravas de Atacama, representados por la ignimbrita San Andrés. Los depósitos aluviales antiguos están cortados por depósitos aluviales del Cuaternario (Qa), conformados por niveles y bancos alternantes de ripio, gravas y gravas arenosas y limo, depósitos característicos de eventos de corrientes de barro. El material clástico es heterocompuesto con dominio de elementos subangulosos a redondeados. Además numerosos conos aluviales se presentan en la salida de los cauces hacia las planicies mayores encajándose al interior de las quebradas, lo que indica una retrogradación de la actual sedimentación.

### **3.1.1 Geología estructural**

Según Iriarte *et al* (1996) en la zona de estudio se reconocen tres dominios estructurales N-S: (1) El dominio occidental comprende la parte más oriental de la Cordillera de la Costa y a la Depresión Central donde las formaciones y plutones del Mesozoico están afectados por fallas extensionales de bajo ángulo del Cretácico superior. (2) El dominio central abarca el borde occidental de la Precordillera (Cordillera de Domeyko) e incluye un bloque de rocas del Paleozoico superior-Paleoceno, alzado y deformado en el bloque colgante de la Falla Agua Amarga. (3) El dominio oriental está representado por rocas del Cretácico superior-Paleoceno en el bloque adyacente a este dominio, que hacia el este son afectados por fallas NNW, descritas como parte de un sistema de falla de rumbo sinistral en el extremo sureste de la Faja Plegada y Corrida de Potrerillos. Según el registro geocronológico de los eventos plutónicos y volcánicos y la relación de la estructural permite asociar eventos de deformación mayores, tanto en el borde oriental de la Cordillera de la Costa como en la Cordillera de Domeyko. En los dominios occidental y central los eventos extensionales del Cretácico y Paleoceno medio se asocian a la formación de cuencas sedimentarias y volcanosedimentarias, mientras que los eventos compresivos del Cretácico Superior-bajo, Paleoceno inferior y Eoceno superior afectan a los tres dominios por igual reactivando las fallas extensionales e invirtiendo las cuencas asociadas a estas, como las fallas El Pingo y San Andrés.

### **3.1.2 Geología económica**

Inca de Oro se caracteriza por los múltiples episodios de magmatismo y una compleja sucesión de eventos de deformación, desde el Jurásico hasta el Cretácico asociándose a diversas manifestaciones de mineralización metálica y zonas de alteración hidrotermal conocidas. En el sector se agrupan pequeños yacimientos vetiformes y mantiformes con mineralización de oro, cobre y plata ubicados en el dominio occidental de la carta Inca de Oro. En el dominio oriental y central se presenta un conjunto heterogéneo de manifestaciones minerales y yacimientos pequeños dispersos.

En la zona se reconocen 6 aureolas de alteración hidrotermal: (1) aureolas metasomáticas, esta consiste en diversos tipos de skarns granatíferos desarrollados en calizas del Grupo Chañarcillo. (2) Alteración potásica y fílica en subsuperficie: corresponde a la zona de pórfidos Cu-Mo-Au de Inca de Oro. La zona de alteración y mineralización ubicada inmediatamente al este del pueblo, se encuentra cubierta por depósitos no consolidados entre 30 y 100 metros de espesor. Se presenta un núcleo de alteración potásica (bt-Kfd-mt-cp-anh) con vetillas tempranas A y B, estas últimas conteniendo molibdenita y pirita. El sistema se asocia a un complejo intrusivo de pórfidos tonalíticos del Cretácico superior- bajo con una dirección preferencial NNE-NE. La alteración fílica tiene vetillas D con sericita y pirita y esta relacionada con un sistema estructural rumbo NE, que también controla los procesos de enriquecimiento supérgeno. Por último se reconoce un halo propilítico mas externo con epidota y clorita. (3) Zonas de alteración cuarzo-sericita y cuarzo-muscovita: estas zonas se encuentran desarrolladas sobre diferentes unidades estratigráficas. Principalmente estas están asociadas al emplazamiento de los plutones Eocenos del El Pingo y La Guanaca. Otras zonas de alteración son zona de alteración fílica afectada por procesos supérgenos de tipo argílica avanzada que afectan a brechas volcánicas de Formación Punta del Cobre. En el cerro La Campana y areniscas de Formación Punta del Cobre se presentan zonas de alteración fílica asociadas a dioritas del Paleoceno Superior con el desarrollo mayor de alunita-caolinita-pirofilita, de origen supérgeno. Alteración argílica avanzada hipógena, consiste en zonas intensamente alteradas con alunita-cuarzo-arcillas que penetran al Complejo de Domos de Sierra Humito. En la periferia afecta a las lavas de Formación Venado. Por último en las brechas de la formación Llanta en el flanco suroeste de la Caldera Cerro Vicuña se desarrollan zonas de intensa alteración con caolinita-pirofilita e illita presentes, asociadas a la intrusión de monzonitas del Paleoceno superior-Eoceno inferior.

## **3.2 Marco Teorico**

### **3.2.1 Contexto tectonico**

Los procesos geológicos relacionados a la generación de depósitos minerales están estrechamente ligados al contexto tectónico en donde se desarrollan, en los márgenes de placas convergentes de subducción, la corteza oceánica subductada bajo la corteza continental, arrastra consigo gran cantidad de sedimentos que contienen agua proveniente del océano, estas aguas son arrastradas hacia el interior, lo cual adiciona volátiles al magma provocando un descenso en su temperatura de fusión y aumentando la solubilidad, este ambiente tectónico de suprasubduccion es propicio para la formacion de depósitos, ya que genera un aumento en la actividad magmática e hidrotermal.((Giggenbach, 1997)(Fig.3.2.1.1). Este proceso es fundamental en la formación de arcos volcánicos y en el emplazamiento de grandes cámaras magmáticas hacia la superficie, estos fluidos magmáticos generados en los arcos volcánicos, son una de las fuentes primarias para la generación de depósitos minerales.

Los metales que contiene un magma pueden provenir de diversas fuentes, siendo las principales la fusión del manto, transferencia de masa desde la placa subductada y fusión parcial de la corteza (Hedenquist y Lowestern (1994)),en este ambiente magmático-hidrotermal se propicia la circulación de los fluidos hidrotermales a través de la corteza superior, estos fluidos serán los encargados de extraer, transportar y depositar metales económicamente significativos (Hutchison (2020)), aunque los sistemas hidrotermales no magmáticos también generan importantes depósitos de cobre, oro y zinc, son mucho menos frecuentes que los fluidos de origen magmático. No obstante la capacidad de un magma de aportar grandes cantidades metales a la corteza dependerá de una serie de parámetros geológicos, tectónicos y termodinámicos que faciliten los procesos hidrotermales.

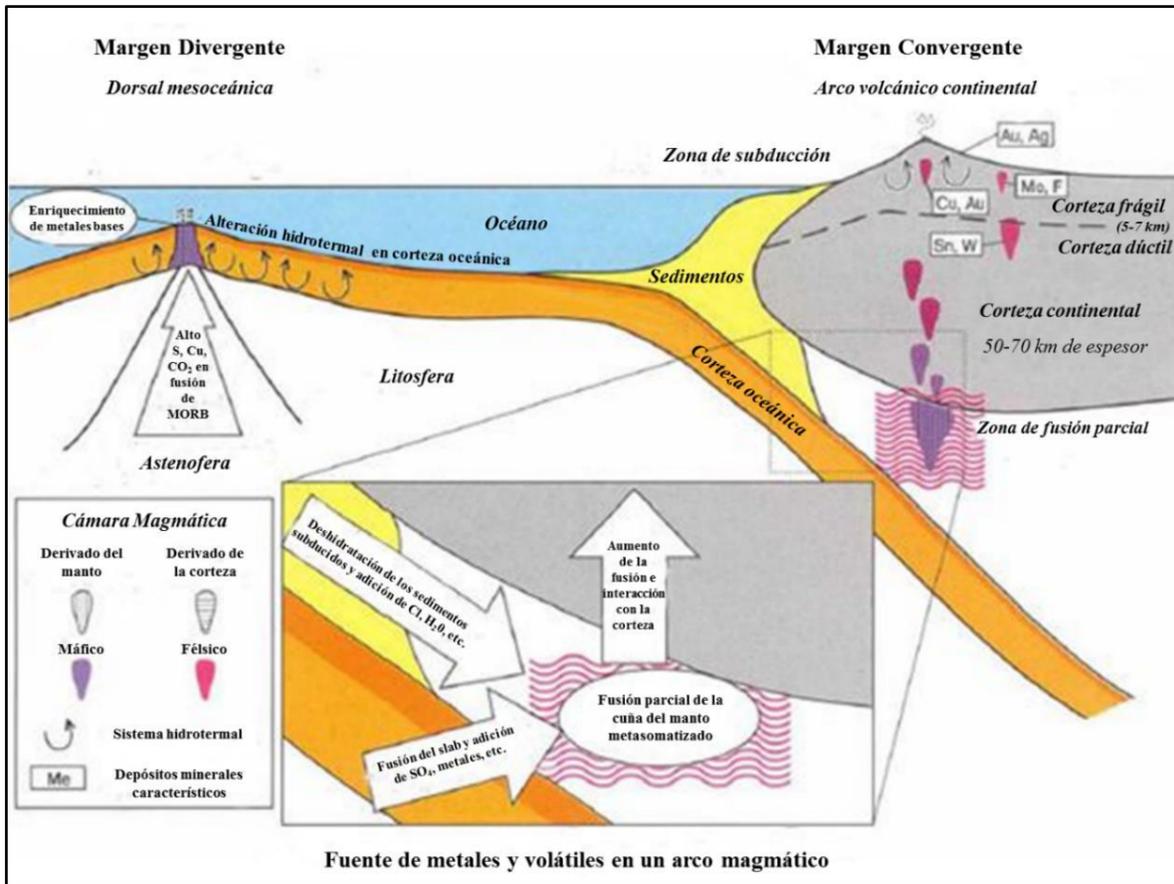


Figura 3.2.1.1 Sección esquemática que muestra algunos de los procesos involucrados en la formación de depósitos minerales en sistemas magmáticos hidrotermales relacionados a arcos volcánicos en márgenes convergentes (tomado y modificado de Giggenbach, 1997).

La solubilidad en un magma esta determinada directamente por la presión e inversamente por su temperatura, en cuanto a su composición, un magma félsico también aumentaría la solubilidad en comparación a un magma mafico (Figura 3.2.1.2), ya que cuando comienza la cristalización y decrece la solubilidad se genera el proceso de primera ebullición en el cual comienza a separarse la fase magmática de la fase liquida, posterior a este proceso comienza el enfriamiento adiabático y comienza la cristalización del magma producto de la exsolución de agua, este proceso corresponde a la segunda ebullición y es mucho más rápido y violento que el primero, la parte de agua que se separa corresponde a la fase hidrotermal, la cual comprende una fase de vapor y una fase de hidro salmuera hiper salina con un alto contenido de Na y Cl, en esta etapa metales como Cu,Zn,Pb,Au,y Ag son incorporados a la fase cristalina del magma como microinclusiones de sulfuros o en la red cristalina de bajo valor

(Hendry *et al*, 1985) mientras que el entrapamiento de grandes cantidades de metales se genera en separaciones masivas y violentas de una fase hidrotermal de una magmática, por ende mientras menos cristalizado este un magma mayor probabilidades habrá de que los fluidos hidrotermales extraigan grandes cantidades de metales(Burnham y Ohmoto (1980) y Candela (1994)).

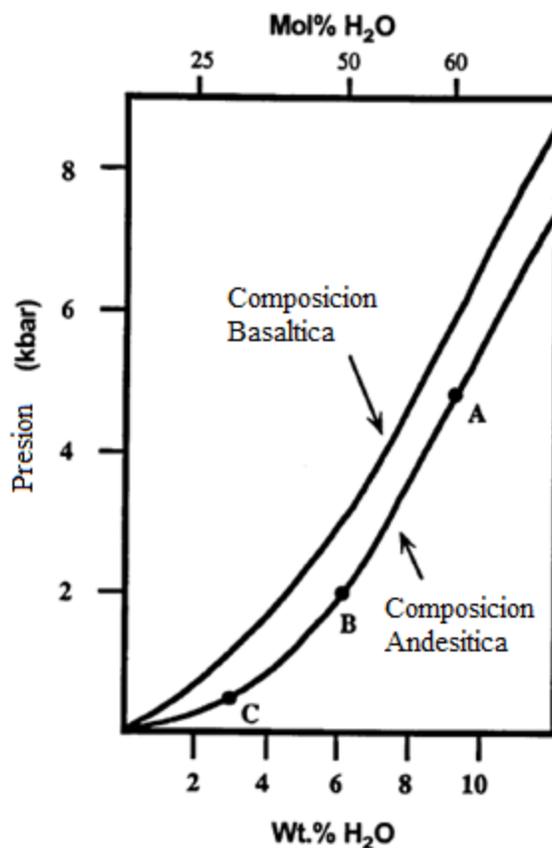


Figura 3.2.1.2 Solubilidad de H<sub>2</sub>O en fundidos silicicados de composición andesítica y basáltica a 1100°C. Un magma de composición intermedia con 2.5% H<sub>2</sub>O requeriría 75, 60 y 10 % de cristalización para alcanzar saturación a 5 kbar (A), 2 kbar (B) y 0.5 kbar.(modificado de Reed, 1997)

### 3.2.2 Alteración hidrotermal

La génesis de la mayoría de los depósitos minerales metálicos involucra la acción de soluciones acuosas calientes o también conocidas como fluidos hidrotermales, los cuales pueden provenir de distintas fuentes.(Giggenbach, 1997)

- Aguas meteóricas: compuesta por aguas superficiales y subterráneas.
- Aguas connatas: agua alojada en los poros de rocas de penetración profunda.
- Aguas marinas: agua de los océanos.
- Aguas metamórficas: aguas liberadas por cambios mineralógicos.
- Aguas magmáticas: aguas derivadas de procesos ígneos.

Los fluidos hidrotermales del tipo magmatico, al interactuar con la roca de caja generan un tipo de metasomatismo que trae consigo cambio mineralógicos, texturales y químicos, provocando la transformación, crecimiento, disolución o precipitación de nuevas fases minerales debido a las reacciones de intercambio iónico entre los minerales que componen la roca de caja y el fluido hidrotermal circulante que transfiere calor y componentes químicos, este intercambio puede ocurrir por infiltración o por difusión dependiendo de las propiedades físicas y químicas de la roca. (Reed, 1997)

Los principales parámetros de los fluidos que definen el resultado de esta interacción son la temperatura, composición y pH del fluido junto con la permeabilidad de la roca de caja, aunque por lejos, los parámetros más influyentes son la temperatura y la composición del fluido hidrotermal, ya que mientras más caliente y ácido sea el fluido, mayor será el grado de alteración. (Reed, 1997)

Algunos procesos que se generan en la roca por la alteración hidrotermal son la depositación directa, reemplazo o lixiviación de los minerales, en la depositación el fluido deposita directamente minerales como vetillas o rellenos, generalmente entre fracturas, diaclasas o fallas, en el proceso de reemplazo los minerales más inestables termodinámicamente tienden a generar nuevas fases, aunque también depende de la permeabilidad que tenga la roca y el proceso de lixiviación mineral se genera cuando los componentes químicos de la roca son disueltos o extraídos por el fluido hidrotermal, de modo que la roca queda deprimida en

dichos elementos o minerales, generalmente no son reemplazados provocando huecos o masas oquerosas de cuarzo residual o provocando una alteración muy intensa del tipo pervasiva (Seward & Barnes, 1997).

Estos procesos también generan cambios en las propiedades físicas de la roca de caja alterando su densidad, porosidad, permeabilidad, susceptibilidad magnética y resistividad, éstos cambios también pueden traer consigo fallamiento, diaclasado o fracturas, junto con cambios químicos en función de la mineralogía y de los elementos mayores que compongan la roca (Tabla 3.4.2.1).

Elemento mayor	Cambio	Mineral hidrotermal en el que se incorpora
SiO <sub>2</sub>	Agregado	Cuarzo, cristobalita, silicatos
TiO <sub>2</sub>	No cambia	Esfena, leucoxeno
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Agregado y removido	Muchos silicatos, algunos óxidos.
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y FeO	Agregado y removido	Cloritas, pirita, pirrotita, siderita, epidota, hematita.
MnO	No cambia	
MgO	Removido	Clorita, biotita
CaO	Agregado y removido	Calcita, wairakita, epidota, prehnita, anhidrita, montmorillonita, esfena, fluorita, zeolitas, wollastonita
Na <sub>2</sub> O	Agregado y removido	Albita
K <sub>2</sub> O	Agregado	Adularia, illita, alunita, biotita
CO <sub>2</sub>	Agregado	Calcita, siderita
S, SO <sub>3</sub>	Agregado	Anhidrita, alunita, pirita, pirrotina, baritina
H <sub>2</sub> O	Agregado	Todas las arcillas, epidota, prehnita, zeolitas, diásporo, pirofilita, anfíbolos
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	No cambia o agregado	Apatita
Cl	Removido	Halita
F	Agregado o no cambia	Fluorita

*Tabla 3.4.2.1 Comportamiento típico de los elementos mayores durante la alteración hidrotermal en rocas volcánicas reaccionando con un fluido caliente (tomado de Makshev (2001))*

Una de las reacciones químicas más importantes que se producen en esta interacción fluido-roca es la hidrólisis la cual es un proceso de metasomatismo de hidrogeno en la alteración

hidrotermal, lo mencionamos ya que es muy común en alteraciones acidas del tipo argilica y argilica avanzada En esta reacción el fluido hidrotermal absorbe de la roca los cationes de  $K^+Na^+Ca^{2+}$  incorporando  $H^+$  en las fases sólidas (Hemley and Jones, 1964; Rose and Burt, 1979) .

El resultado de la reacción dependerás del grado de hidrólisis y de los minerales que conforman la roca de caja, un ejemplo de este proceso ocurre en sistemas hidrotermales ácidos en donde sus fluidos atacan los feldespatos potásicos generando muscovita, si el ambiente es muy ácido y la alteración persiste se transforma a andalusita, pirofilita y caolín(Fig. 3.4.2.2.).

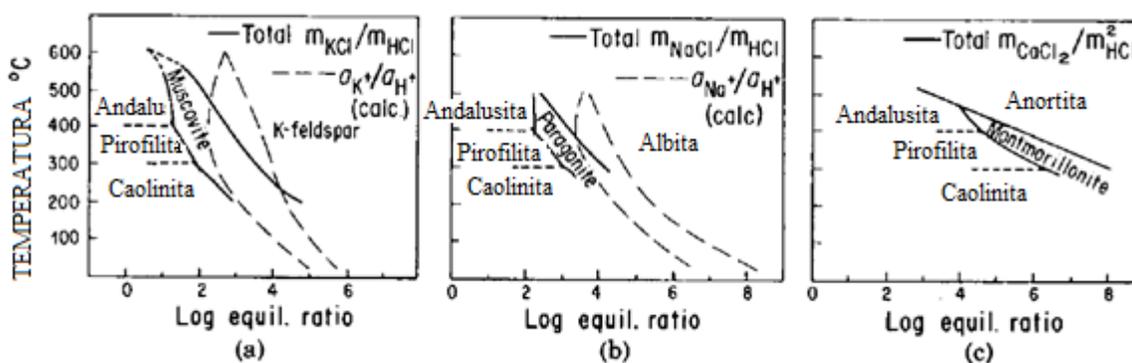


Figura 3.4.2.2 Reacciones de hidrólisis de feldespatos en función de razón  $K^+/H^+$  (a),  $Na^+/H^+$  (b) y  $Ca^{2+}/H^+$  (Burt y Rose, 1979)

Otras reacciones que ocurren y que se deben mencionar son la reacción de oxidación, deshidratación, intercambio iónico y skarnificación.

Los efectos de los fluidos hidrotermales quedan registrados en las diversas asociaciones minerales de alteración y mena que podemos encontrar, a su vez, esta misma paragénesis nos permite inferir los parámetros físico-químicos del fluido hidrotermal (Corbett y Leach (1998)) también se emplea el uso de diagramas que ayudan a la comprensión de las relaciones



metálica.(Reed, 1997) Antes de llegar a su depositación final y medida que el fluido va ascendiendo hacia la superficie va cambiando su composición química debido a la interacción fluido-roca, es decir, el fluido o salmuera magmática inicial no será el mismo al momento de precipitar, por lo que la composición y la dirección de avance del fluido serán un condicionador en el tipo de alteración que se genere, no obstante la concentración de metales en el fluido mineralizador dependerá de otros factores como la concentración de los metales y complejos presentes en el magma parental y del fluido original, la solubilidad de minerales de alteración que entorpezcan el transporte de metales, cantidad de metales lixiviados desde la roca de caja y junto con sus estados de Redox y pH (Townley;2001) a continuación mencionamos los principales tipos de alteraciones según diversos autores.

Corbett y Leach (1998); Reed (1997); Rose y Burt (1979); Sillitoe(2010)

**Alteración potásica:** Se caracteriza por ser una alteración de carácter neutro a alcalino de altas temperaturas(400°-800°C), selectiva y penetrativa que altera principalmente a las plagioclasas y minerales maficos, su paragénesis mineral se compone de feldespato potásico y/o biotita con minerales accesorios o secundarios como cuarzo, magnetita, sericita, clorita. Suele presentar texturas tipo hornfel con biotización primaria y secundaria. En esta alteración se produce un intercambio catiónico con adición de K a los minerales alterados, se ubica principalmente en la zona central o en el núcleo de zonas alteradas vinculadas al emplazamiento de plutones intrusivos.

**Alteración sódico-cálcica:** Esta alteración se produce de manera casi simultaneo con la potásica y se emplaza en las raíces de los pórfidos cupríferos, se caracteriza por el conjunto mineral de actinolita, albita oligoclasa-andesina, epidota, magnetita, clorita, cuarzo, escapolita, por lo general es estéril,de altas temperaturas (400°-800°C) y pH neutro alcalino.

**Alteración tipo Skarn:** Esta alteración se produce mediante metamorfismo de contacto y metasomatismo ligado a la intrusión de un pluton en una secuencia de rocas carbonatadas (calizas, dolomitas) las cuales se alteran formando minerales calcosilicatdas en las zonas adyacentes al intrusivo, su paragénesis mineral consiste en granates (andradita y grosularita), wollastonita, epidota, diópsido, idocrasa, clorita, actinolita.

**Alteración tipo Greissen:** Se atribuye a facies neumatolíticas de rocas graníticas y se desarrolla a temperaturas mayores a 250°C, la asociación mineral es moscovita, feldespato, cuarzo, topacio y/o turmalina, se atribuye a la acumulación de volátiles provenientes del magma o por la deshidratación de magmas que liberan fluidos

**Alteración propilítica:** Se caracteriza por presentar pH alcalino-neutro con temperaturas más bajas(250-300°C) y una asociación mineral de epidota y/o clorita junto con albita, calcita y pirita. Representa un grado bajo de hidrólisis de los minerales de roca por lo que suele presentarse en las zonas marginales de alteración o en zonas distales de la alteración potásica.

**Alteración cuarzo-sericita:** Se caracteriza por presentar un pH intermedio entre 5 a 6 y temperaturas que van desde los 150-250°C, en esta alteración las plagioclasas y feldespatos son atacados por los fluidos y transformados en cuarzo y sericita también presenta una serie de minerales accesorios en su paragénesis tales como clorita, illita y pirita, se denomina alteración filica en caso de que la sericita presente una notable abundancia sobre el cuarzo.

**Alteración Argílica:** Esta alteración se caracteriza por fluidos ácidos (pH 3 y 4) de baja temperatura(150-200°C) los cuales reemplazan las plagioclasas por arcillas, caolinita, montmorillonita, smectita debido a una lixiviación del Ca, Na y Mg de las rocas, este proceso representa un grado medio de hidrólisis.

**Alteración Argílica Avanzada:** Presenta condiciones de pH entre 1 y 3.5 junto con altas temperaturas, sobre los 350°C, su principal característica es la presencia de textura vuggy sílica o cuarzo oqueroso, junto con una paragénesis mineral de cuarzo, alunita, jarosita, caolín, pirofilita y pirita.

La alunita puede tener distintas fuentes ya que se puede dar como producto de alteración por condensación de gases ricos en H<sub>2</sub>S, como alteración supergena, cristalización magmática/hidrotermal o a lo largo de vetas y brechas hidrotermales de origen magmático. No obstante la depositación de dichas alteraciones es descrito en los trabajos de Sillitoe (2010), en donde propone un modelo genético generalizado para las alteraciones hidrotermales presentes en los depósitos ligados a pórfidos cupríferos (Fig3.4.2.4.)

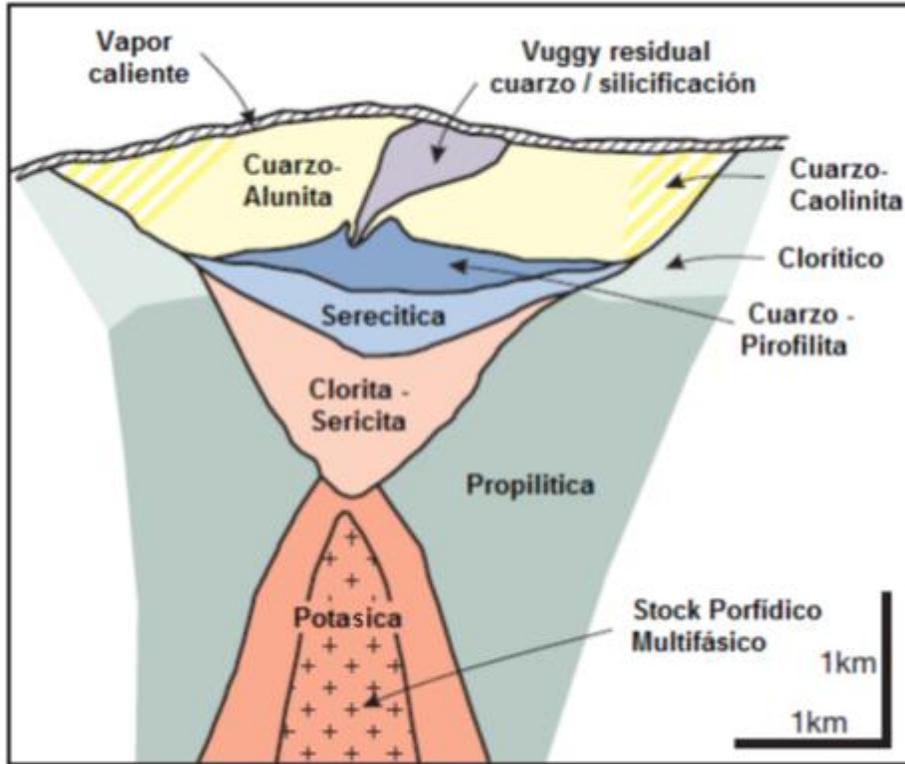


Figura 3.4.2.4 Patrón generalizado en la zonación de la alteración-mineralización para un sistema de pórfidos de Cu (tomado Sillitoe (2010)).

### 3.2.3 Transporte y concentración de metales

La concentración anómala de un elemento en la corteza terrestre es lo que constituye un depósito mineral, para que este sea de carácter rentable a su vez de superar la abundancia media en la corteza terrestre (Maksaev, V. (2001b)). Al ser subductada la corteza oceánica arrastra consigo gran cantidad de sedimentos con un alto contenido de agua, generando magmas hidratados ( $\sim 3\% H_2O$ ) ricos en volátiles ( $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $HCl$ ,  $HF$ ). Estos por diferencia de densidad comienzan a ascender y al reducirse la presión litostática que los confina, se genera una separación de fases, una fase magmática o silicatada fundida que contiene gran cantidad de elementos compatibles, mientras que la fase fluida rica en Na, K, Ca (Maksaev, V. (2001a)), tiende a captar metales o elementos de interés valioso. Estos elementos serán posteriormente transportados hacia la superficie mediante complejos de iones, a su vez esta fase líquida se separa en una fase acuosa hipersalina y un fase de vapor,

producto de su ebullición, donde se genera un fraccionamiento geoquímico que genera una fase hipersalina rica en iones clorurados compatibles con elementos como el Fe, Mo, Cu, Pb, Zn y el K, mientras que la fase gaseosa tiende a compatibilizar con iones sulfurados que transportan Au, Hg, Cu, As, Sb. Complejos de iones ligantes clorurados son más estables a altas temperaturas, mientras que los complejos sulfurados son más estables a bajas temperaturas, pero con una alta presencia de  $HS^-$ ,  $H_2S$  (Seward & Barnes, 1997).

## 4 Resultados

### 4.1 Unidades litológicas

En base a los resultados obtenidos en terreno se definieron 5 unidades litológicas, las cuales son mencionadas y descritas en el siguiente apartado.

#### 4.1.1 Unidad de areniscas y conglomerados (ArTrl)

Unidad de rocas sedimentarias que abarca  $1,16 \text{ km}^2$  de superficie dentro del área de estudio, se localiza en el sector suroeste de las pertenencias N°17 y 18. Está conformada por una intercalación entre areniscas cuarcíferas grisáceas y areniscas cuarcíferas de color pardo amarillento, ambas con buena selección y madurez, se encuentran estratificadas con una orientación de N55E/27°SW (Fig.4.1.1.1). En algunos sectores gradan a conglomerados con pequeños clastos (2-4mm) en la base de la sucesión. Esta unidad puede ser correlacionada a la Formación La Ternera denominada “Alóctono 2” según Iriarte *et al*, (1996). Esta unidad infrayace mediante contacto por falla a las andesitas de la Formación Sierra Fraga, observado en sector sur, en la propiedad XVII. El contenido fosilífero de su localidad tipo ubicada en Quebrada el Carbón, indica una edad triásica superior (Segerstrom, 1968; Sepulveda, 1982).

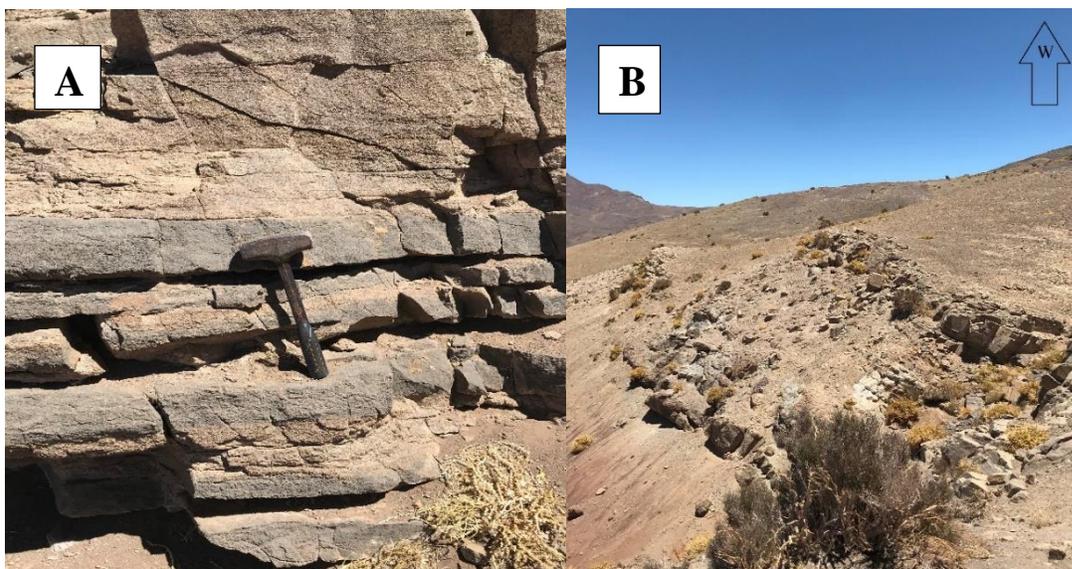
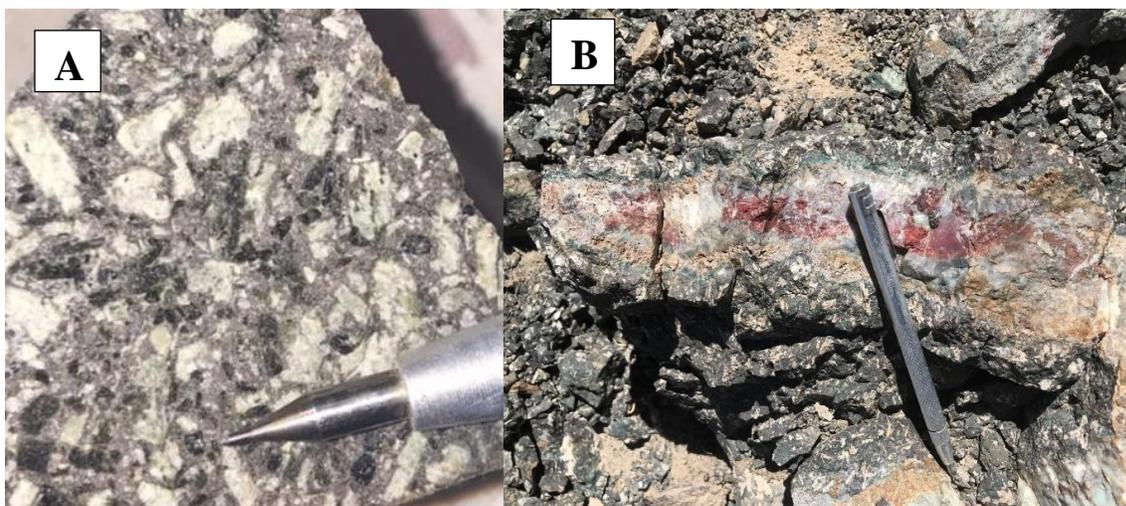


Figura 4.1.1.1 Intercalación de areniscas grisáceas a pardo amarillentas que presentan gradación en la base a conglomerados con pequeños clastos(A) Estratificación y manteo de las capas de areniscas y conglomerados, N55E/27SW (B).

#### 4.1.2 Unidad de andesitas y basaltos (AnH)

Esta unidad aflora en todas las pertenencias, abarcando un total de  $2,82 \text{ km}^2$  de superficie dentro del área de estudio. Está compuesta por lavas basálticas y andesíticas con textura porfídica. Los fencristales corresponden a hornblenda eudral a subhedral de 2-4 mm (25%), plagioclasas tabulares eudrales de 4-7 mm (35%) y algunos pequeños cristales subhedral de cuarzo (2%), todos ellos inmersos en una masa fundamental afanítica de color oscuro (Fig.4.1.2.1). Presenta zonas con alteración a epidota y amígdalas rellenas con clorita y algunas trazas de crisocola, junto con muchas vetas de cuarzo y jaspe.

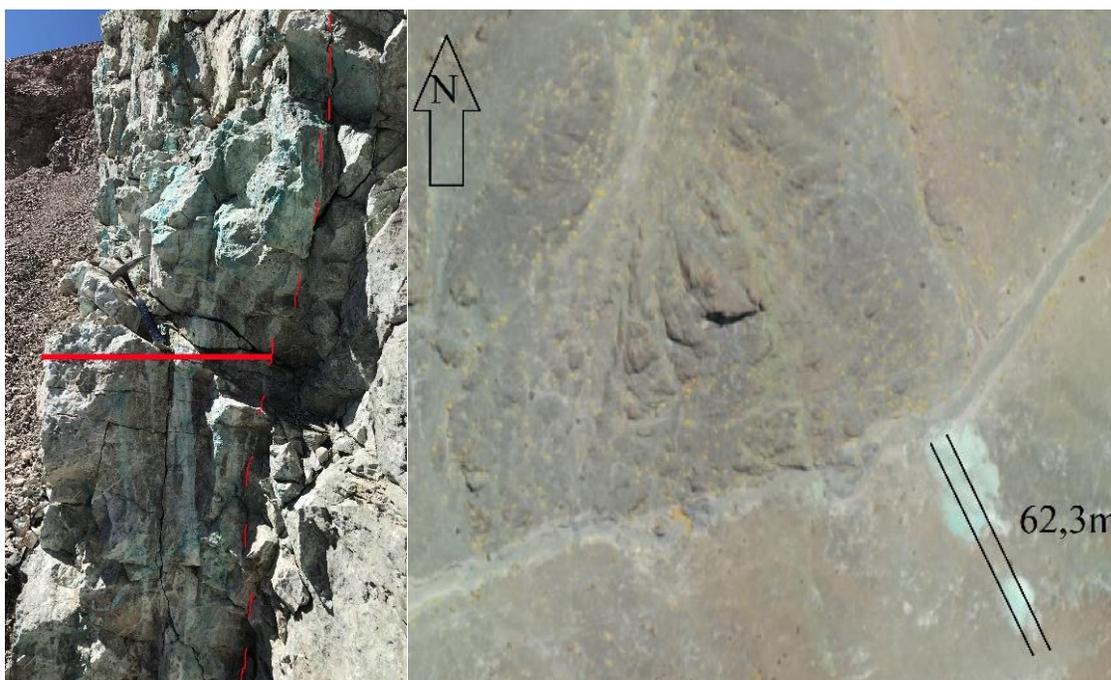
Esta secuencia de lavas macizas se encuentra sobreyaciendo en contacto por falla con la unidad de areniscas y conglomerados (ArTrI). Esta falla de bajo ángulo N65E/20SW (Falla Fraga), se observa en las pertenencias del sector sur (Vírgenes de Andacollo XVII y XVIII). En las propiedades del sector norte, esta unidad se presentan de manera masiva con una orientación preferencial N30E/65SE, siendo intruida por pequeños cuerpos hipabisales irregulares. Esta unidad se encuentra fuertemente plegada y en el sector nororiente es cortada por la falla fraga.



*Figura 4.1.2.1 A) Andesitas con fenocristales de piroxeno y plagioclasa, junto con vesículas rellenas con clorita B) Se observan abundantes vetas de cuarzo y jaspe con bordes de clorita.*

#### 4.1.3 Unidad volcanoclástica (BVc)

Unidad de rocas sedimentarias que abarca  $0,8 \text{ km}^2$  de superficie dentro del área de estudio, esta conformada por brechas volcanoclásticas que contienen clastos angulosos a subangulosos de tamaño centimétrico a métrico de composición polimíctica, con matriz de arena gruesa cuarzo feldespática, de color pardo a verde oscura. Esta unidad de origen continental presenta una intensa alteración a epidota. Se presenta de manera masiva y es intruida por diversos diques de composición microdiorítica. Esta unidad es cortada además por una veta de cuarzo, crisocola, atacamita, malaquita y calcosina, la cual conforma una de las principales estructuras mineralizadas. (Fig.4.1.3.1).



*Figura 4.1.3.1 Afloramiento con mineralización de crisocola, malaquita, atacamita y pátinas de calcosina.*

#### 4.1.4 Unidad de microdioritas

Unidad de rocas microdioríticas de color gris oscuro que intruye en forma de diques y cuerpos irregulares a las andesitas porfídicas asignadas a la unidad de Andesitas y Basaltos, y a la unidad de Brechas Volcanoclásticas. Los fenocristales corresponden a cuarzo subhedral

(10%) de 1-2mm, plagioclasas euhdrales de (25%) de 2mm y piroxenos anhedrales de 1 mm (Fig.4.1.4.1). Presenta una matriz microcristalina equigranular constituida principalmente por minerales máficos, la matriz presenta una alteración a clorita de caracter moderada que afecta también a algunos fenocristales de plagioclasas. Esta unidad está afectada por vetillas de cuarzo de 1 mm de potencia. También se observan trazas de cobre nativo y crisocola diseminada rellenando pequeñas oquedades. Esta unidad exhibe un leve magnetismo y la mayoría de los cuerpos presentan mineralización de crisocola en vetillas y calcosina diseminada tanto en los bordes del cuerpo como en la roca de caja.



*Figura 4.1.4.1 Unidad microdiorítica gris oscuro. Este cuerpo tabular por lo general está asociado a mineralización económica.*

#### 4.1.5 Unidad de Gravas no consolidadas

Corresponde a depósitos polimícticos de gravas no consolidadas, de color gris claro, que afloran en el sector suroccidente de las propiedades, abarcando un total de  $0,78 \text{ km}^2$  de superficie entre las propiedades Virgen de Andacollo XVII y XVIII. Esta unidad presenta espesores que van desde los 2 a los 5 metros, presenta un bajo grado de compactación y cementación, y están soportadas principalmente por una matriz arenosa de composición cuarzo feldespática con un tamaño de grano medio-fino. Los clastos corresponden a bloques

y cantos de origen volcánico, junto con areniscas. Las principales estructuras sedimentarias son gradación inversa y normal, junto con paleocanales locales.

#### 4.1.6 Unidad de sedimentos recientes

Depósitos no consolidados de color pardo- amarillo compuestos principalmente por gravas, arenas gruesas-medias y bloques, los cuales están acumulados como grandes conos aluviales en quebradas aledañas. Estos depósitos se presentan de manera masiva siguiendo la topografía de la red de drenaje del sector.

## 4.2 Alteración

En el área de estudio se definieron 3 tipos principales de alteración: epidotización, cloritización y silicificación, las cuales se describen a continuación:

### Epidotización

La alteración a epidota se distribuye principalmente en las propiedades del sector sur y afecta a 496 m<sup>2</sup> de la unidad volcanoclástica (BVc) ubicada en las propiedades V.A XVII y XVIII. Esta alteración es intensa y afecta de manera selectiva a los clastos de la brecha. También está asociada a una leve alteración a clorita, (Fig 4.2.1). No se observa una relación con mineralización económica.



*Figura 4.2.1 Alteración a epidota selectiva afectando a las plagioclasas de la andesitas porfídicas y a los conglomerados volcanoclasticos*

## Silicificación

Esta alteración se presenta en todas las vetas mineralizadas de cobre. También se observa que altera a las brechas volcanoclásticas del sector sur(BVc) que actúan como roca de caja para la mineralización, donde además se presenta como un intenso vetilleo poli direccional de cuarzo (Fig4.2.2)

En las propiedades del sector norte, esta alteración afecta de manera homogénea a las capas de andesitas que bordean las vetas, y se asocia además a numerosas vetas bandeadas irregulares de jaspe que contienen geodas (Fig.4.2.2).



*Figura.4.2.2 Vetas de jaspe y sílice con bordes de reacción que presentan texturas vuggy sílica y óxidos de hierro, intruyendo a la unidad de andesitas porfídicas.*

## Cloritización

Esta alteración es una de las más predominantes del área y se encuentra principalmente en el sector norte, afectando a las andesitas porfídicas y a la unidad de microdiorita porfídica. Se presenta como relleno de vesículas en la unidad de Andesitas y Basaltos (Fig. 4.2.3). Se presenta con mayor intensidad en los sectores cercanos a los diques y cuerpos intrusivos hipabisales. Esta alteración se asocia a los sectores de mayor potencial económico ya que en las vetas colindantes, se observaron cúmulos de sulfuros de cobre diseminados, tales como

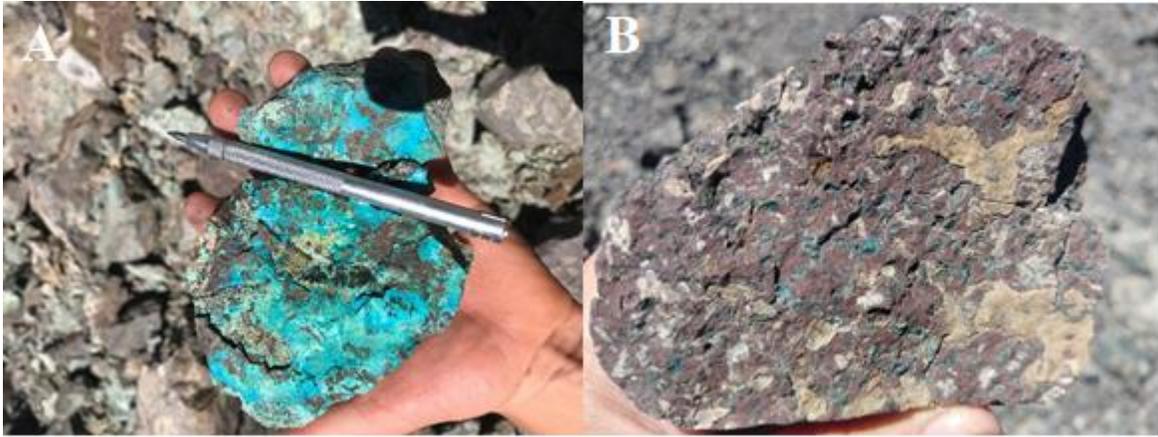
calcosina y en menor medida bornita correspondientes a la mineralización hipógena, junto con malaquita, crisocola y atacamita, correspondientes a la zona oxidada. Estos ensamblajes fueron observados en la propiedad Virgen de Andacollo IX y X.



*Figura 4.2.3. Andesita con intensa alteración a clorita que se presenta como un relleno de amígdalas en las andesitas jurásicas de la Formación Sierra Fraga.*

### **4.3 Mineralización**

Las principales minerales de mena presentes en el sector son cupríferos y se encuentran hospedados en rocas volcánicas y en las brechas volcanoclasticas. Estos minerales consisten en “óxidos” de cobre, tales como crisocola, turquesa, atacamita y en menor proporción malaquita (Fig. 4.3.1). Algunas zonas presentan sulfuros relictos de calcosina y calcopirita.(Fig. 4.3.2).



*Figura 4.3.1 A) Mineralización de “óxidos” de cobre (crisocola, turquesa y chenevixita) de alta ley. B) Roca volcánica que presenta vesículas rellenas con clorita y trazas de “óxidos” de cobre.*



*Figura 4.3.2. Mineralización de “óxidos” de cobre acompañados de sulfuros relictos (calcosina).*

#### **4.3.1 Geoquímica de zonas mineralizadas**

En este apartado se exponen los resultados geoquímicos obtenidos en las diferentes estructuras mineralizadas. Además se realizan algunas estimaciones para determinar los recursos mínimos inferidos, en base a las leyes y volúmenes de las zonas mineralizadas.

El estudio realizado en las cinco pertenencias mineras ubicadas en la Quebrada La Cortadera logró determinar 3 sectores con un potencial económico considerable. Estas estructuras y sus respectivas leyes y recursos mínimos inferidos, se resumen en la siguiente tabla (4.3.1.1).

	Roca de caja	Maximo(%)	Minimo(%)	Volumen(m3)	Ley promedio(%)	Toneladas	Reserva Cu (Ton)	Propiedad
Veta Sur	Brecha	6,8%	0,712%	155,22 m3	2,15 %	364,767	7,831	V.A XVII
Veta Norte	Andesitas	6,61%	2,72%	917,12 m3	4,49%	2430,05	109,109	V.A IX;X
Manto Norte	Andesitas	0,46%	0,46%	377,28 m3	0,46 %	999,79	4,599	V.A X

*Tabla 4.3.1.1 Resumen propiedades y estructuras con interés económico*

### **Análisis económico de “Veta Sur” (propiedad Virgen de Andacollo XVII)**

La mineralización de cobre en la zona existe, sin embargo, los sectores de alta ley están probablemente asociados a “clavos” mineralizados dentro de la estructura y no se conocen datos en profundidad de la veta. Esta estructura mineralizada exhibe leyes de Cu entre 0,7% y 6,8%, con un promedio de 2,8% (Tabla 4.3.1.3) y (Grafico 4.3.1.3), geoméricamente se presenta como una corrida aproximada de 62 metros, con una potencia de 50 cm y considerando una profundidad mínima de 5 metros, tenemos un volumen mínimo de 155,22 m<sup>3</sup> (Figura 4.3.1.5), con la ley promedio de 2,15 % de Cu y considerando una densidad promedio de 2350 Kg/m<sup>3</sup> obtenemos una masa de 364,767 Kg, por lo que se podría inferir un recursos mínimos de 7,831 toneladas de Cu fino (Tabla 4.3.1.2)

	Promedio	Maximo	Minimo	Volumen m <sup>3</sup>	Roca de caja(d)	Tonelaje	Reserva Cu (Ton)	Propiedad
Veta Sur	2,15%	6,803	0,712	155,22	Brecha (2,35)	364,767	7.831 Ton	V.A XVII

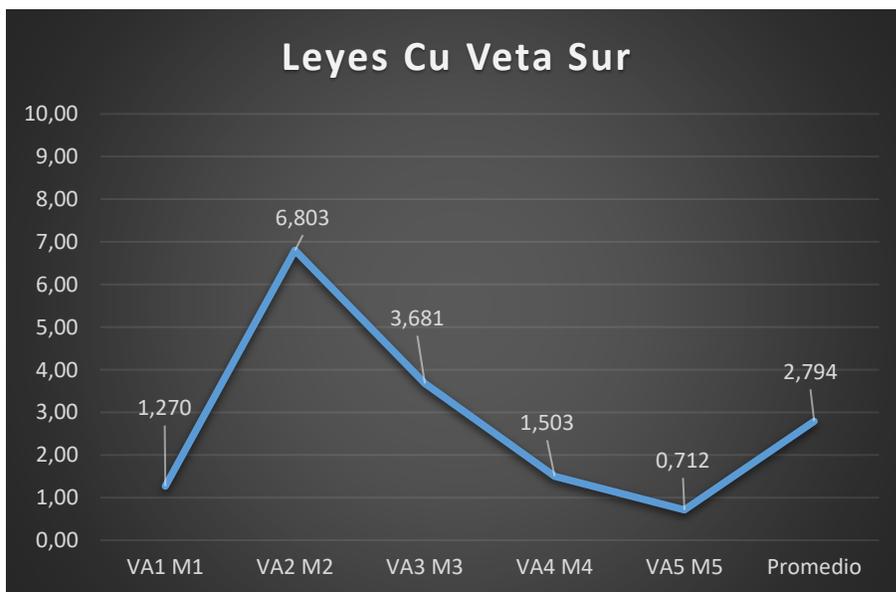
*Tabla 4.3.1.2 Resumen Veta Sur*

En la siguiente tabla se identifican las cinco muestras que fueron recolectadas, rotuladas y analizadas mediante E.A.A para poder obtener el promedio de ley de la veta ubicada en el sector Virgen de Andacollo XVII. (Tabla 4.3.1.3)

Identificacion de la muestra	%Cu Tot	%Cu Sol	Coordenada N	Coordenada E	Cota	Observacion	Propiedad
VA1 M1	1,270	1,270	7021292	436836	2806	Veta; Bordes	VA 17
VA2 M2	6,803	6,803	7021269	436823	2803	Desmonte	VA 17
VA3 M3	3,681	3,681	7021275	436846	2808	Veta	VA 17
VA4 M4	1,503	1,503	7021292	436836	2813	Veta	VA 17
VA5 M5	0,712	0,712	7021253	436852	2813	Desmonte	VA 17
Promedio	2,794	2,794	*	*	*	*	*

*Tabla 4.3.1.3 Analisis realizados mediante E.A.A, Veta Sur mediante chip sample*

En el siguiente grafico se muestra la alta variabilidad en cuanto a las leyes obtenidas a travez de la veta, teniendo una ley máxima de 6,803% y una ley mínima de 0,712%



*Grafico 4.3.1.4 Leyes presentes en la Veta Sur, ubicada en la propiedad Virgen de Andacollo XVII.*



*Figura 4.3.1.5. Afloramiento Veta Sur emplazada en las Brechas volcanoclasticas, en la propiedad minera Virgen de Andacollo XVII con mineralización de crisocola, malaquita, atacamita y pátinas de covelina, línea roja indica el espesor de la veta(50cm).*

#### **Analisis económico Veta Norte (Propiedad minera Virgen de Andacollo IX y X)**

Esta veta presenta leyes desde 2,7% hasta 6,6% de Cu con una ley media de 4,49 % de cobre(Tabla 4.3.1.7) y (Grafico 4.3.1.8). La muestra VAD3-M5 muestra la presencia de sulfuro diseminado (calcosina) en menor proporción, lo que sugiere que corresponde a una zona mixta (óxidos+sulfuros de Cu). Esta estructura mineralizada se emplaza en la propiedad Virgen de Andacollo IX y X, cuenta con una potencia de 1,4 metros, 131 de corrida y se estimaron unos 5 metros de profundidad mínima, formando un cuerpo mineralizado de 917  $m^3$  de volumen con una ley promedio de 4,49% de Cu, considerando la densidad promedio de un cuerpo andesítico con 2650 Kg/m<sup>3</sup>, se tiene un cuerpo mineralizado de 2430,05

toneladas con una ley media de 4,66% , por lo que se podría inferir un recurso mínimo de 109,109 toneladas de cobre fino. (Tabla 1.3.1.6)

	Promedio	Maximo	Minimo	Volumen m <sup>3</sup>	Roca de caja(d)	Tonelaje	Reserva Cu (Ton)	Propiedad
Veta Norte	4,664	6,61	0,712	917	Andesita	2430,05	109.109	V.A XVII

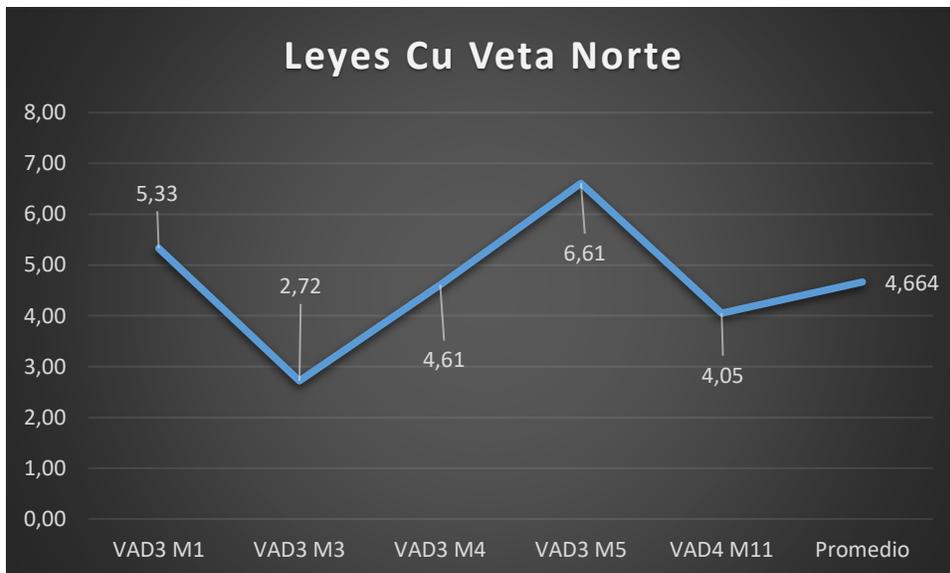
*Tabla 1.3.1.6 Resumen Veta Norte emplazada en las andesitas porfidicas de la propiedad Virgen de Andacollo IX y X.*

En la siguiente tabla se identifican las cinco muestras que fueron recolectadas, rotuladas y analizadas mediante E.A.A para poder obtener el promedio de ley de la veta ubicada en el sector Virgen de Andacollo X y IX. (Tabla 4.3.1.7)

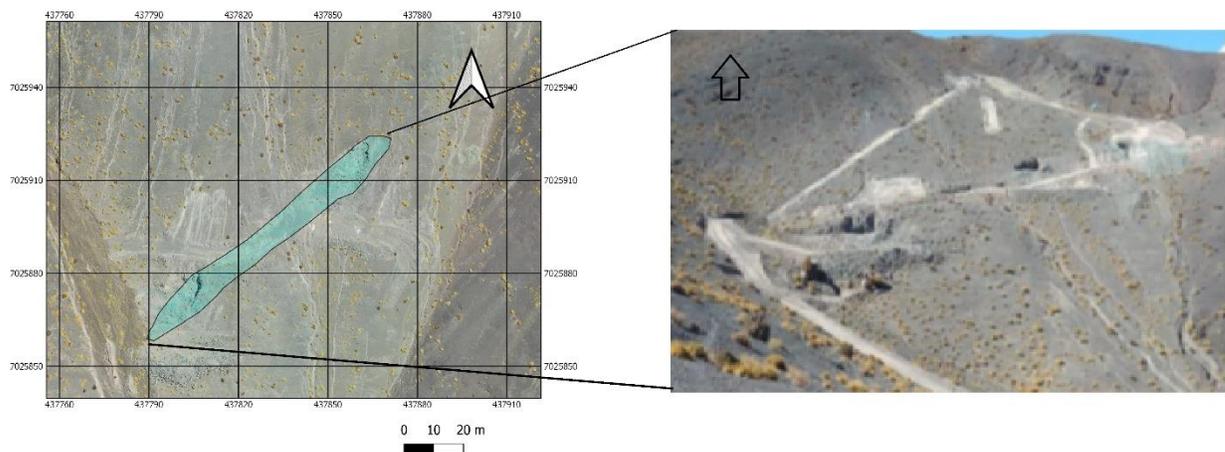
Identificacion de la muestra	%Cu Tot	%Cu Sol	Coordenada N	Coordenada E	Cota	Observacion	Propiedad
VAD3 M1	5,33	5,33	7026230	438003	3275	Desmonte	VA IX
VAD3 M3	2,72	2,72	7026230	438003	3275	Veta	VA IX
VAD3 M4	4,61	4,61	7026281	438067	3288	Veta	VA X
VAD3 M5	6,61	5,75	7026396	438082	3314	Zanja superficial	VA X
VAD4 M11	4,05	4,05	7026608	437533	3446	Zanja superficial	VA IX
Promedio	4,664	4,492	*	*	*	*	*

*Tabla 4.3.1.7 Resumen de las muestras analizadas mediante E.A.A, pertenecientes a la veta Norte*

A diferencia de los sectores anteriores en el siguiente grafico podemos observar una menor variabilidad en las leyes obtenidas en la veta ubicada en las propiedades Virgen de Andacollo IX y X, teniendo una ley máxima de 5,3% y una mínima de 2,72%.



*Grafico 4.3.1.8. Leyes presentes en la Veta Norte (propiedad Virgen de Andacollo XVII).*



*Figura 4.3.1.9 Estructura mineralizada de 113 metros de largo, Virgen de Andacollo. IX y X, Veta Norte.*

### **c) Análisis económico de “Manto Norte” Propiedad minera Virgen de Andacollo X**

Corresponde a una gran estructura NE-SW mantiforme que presenta un manto de 20° al SE, se aplicó un muestreo de malla, en un área de 25m<sup>2</sup>, la mineralización se presenta como relleno de oquedades de crisocola, el sector arrojó una ley de 0,46% de cobre en superficie

que se presenta también como amígdalas de crisocola y diseminado, este cuerpo lenticular alargado presenta un volumen total de 377,28 m<sup>3</sup>(considerando 5 metros de profundidad), considerando una densidad promedio de 2650 kg/m<sup>3</sup>, nos da una masa de 999,792 toneladas, considerando la ley promedio obtenida podemos inferir un recurso mínimo de 4,599 toneladas de Cu fino.

	Promedio	Maximo	Minimo	Volumen m <sup>3</sup>	Roca de caja(d)	Tonelaje	Reserva Cu (Ton)	Propiedad
Manto Norte	0,46%	0,46%	0,46%	377,28	Andesitas	999,792	4,599	V.A X

*Tabla 4.3.1.10 Resumen Veta Norte, ubicada en la propiedad Virgen de Andacollo X.*



*Figura 4.3.1.11 Vesículas rellenas con crisocola presentes en el manto andesítico.*

Para la realización de los análisis mencionados, se realizó un análisis de un total de 18 muestras son enviadas al laboratorio químico geológico, respetando todos los controles de aseguramiento, protocolos de muestreo y control de calidad realizado por el mismo laboratorio (QA/QC).

Los resultados de las muestras ilustran que en general corresponde a un sistema cuprífero (con escasa presencia de oro en el sistema) resumidos en la tabla 4.3.1.12.

Muestra	Elemento	%Cu Tot	%Cu Sol	Au ppm	Coordenada N	Coordenada E	Cota	Observación	Propiedad
VA1 M1	Cu	1,270	1,270	0,00	7021292	436836	2806	Veta; Bordes	VA 17
VA2 M2	Cu	6,803	6,803	0,00	7021269	436823	2803	Desmonte	VA 17
VA3 M3	Cu	3,681	3,681	0,00	7021275	436846	2808	Veta	VA 17
VA4 M4	Cu	1,503	1,503	0,00	7021292	436836	2813	Veta	VA 17
VA5 M5	Cu	0,712	0,712	0,00	7021253	436852	2813	Desmonte	VA 17
VALL M1	Au	*	*	0,01	7021554	434997	2876	Afloramiento Andesitas	VA 18
VALL M2	Au	*	*	<0.1	7021554	435012	2881	Afloramiento Andesitas	VA 18
VAD3 M1	Cu	5,33	5,33	*	7026230	438003	3275	Desmonte	VA 9
VAD3 M2	Au	0	*	0,08	7026230	438003	3275	Desmonte	VA 9
VAD3 M3	Cu	2,72	2,72	*	7026230	438003	3275	Veta	VA 9
VAD3 M4	Cu	4,61	4,61	*	7026281	438067	3288	Veta	VA 10
VAD3 M5	Cu	6,61	5,75	*	7026396	438082	3314	Zanja superficial	VA 10
VAD3 M6	Au	*	*	<0.1	7026466	438028	3345	Veta Qz	VA 10
VAD3 M7	Cu	0,46	0,46		7026457	438043	3339	Andesitas masivas	VA 10
VAD4 M8	Au	*	*	<0.1	7026432	437632	3370	Oxidos Fe	VA 9
VAD4 M9	Au	*	*	0,02	7026580	437520	3441	Veta Qz	VA 9
VAD4 M10	Au	*	*	0,04	7026580	437520	3441	Veta Qz	VA 9
VAD4 M11	Cu	4,05	4,05	*	7026608	437533	3446	Zanja superficial	VA 9

*Tabla 4.3.1.12 Resumen análisis de todas las muestras presentes en las propiedades*

### 4.3.2 Geoquímica de zonas no mineralizadas

Los datos utilizados en esta sección corresponden a los obtenidos mediante fluorescencia de rayos X (XRF). Estos se realizaron en muestras de mano, por lo cual no se puede utilizar como valores representativos para análisis del tipo económicos en elementos metálicos, solo para descartar o detectar su presencia, aunque los datos representarían la cantidad mínima de elementos metálicos presentes en la muestra.

Las zonas de muestreo correspondientes al sector NE de la zona de estudio en donde se ubica la propiedad minera Virgen de Andacollo XXII se analizaron 6 muestras, detalladas en la siguiente tabla. (Tabla.4.3.2.1)

	F1	C1	FR2	FR3	C2	Mc
Norte	436311	436377	436331	436326	436567	436568
Este	7025802	7025702	7025733	7025628	7025527	7025724
Costa	3328	3343	3331	3309	3304	3423

*Tabla 4.3.2.1 Puntos de ubicación en coordenadas UTM para las zonas de muestreo en las pertenencias Virgen de Andacollo XXII (coordenadas en sistema WGS 84)*

Codigo muestra	F1	C1	FR2	FR3	C2	Mc
<b>MgO</b>	1,47	1,737	0	1,462	2,173	3,934
<b>Al2O3</b>	6,623	2,757	5,04	10,833	1,634	7,23
<b>SiO2</b>	31,302	13,404	32,233	44,524	8,894	26,341
<b>P2O5</b>	0,179	0,117	0,032	0,109	0	0,077
<b>S</b>	0	0,049	0,759	0	0	0,024
<b>Cl</b>	0,034	0,049	0,001	0,016	0,025	0,007
<b>K2O</b>	0,604	0,026	0,06	0,279	0,363	0,375
<b>CaO</b>	14,716	15,16	8,945	12,691	2,205	6,857

Tabla 4.3.2.2 Concentraciones de elementos y óxidos mayores para la zona de muestreo Virgen de Andacollo XXII, en porcentaje (%).

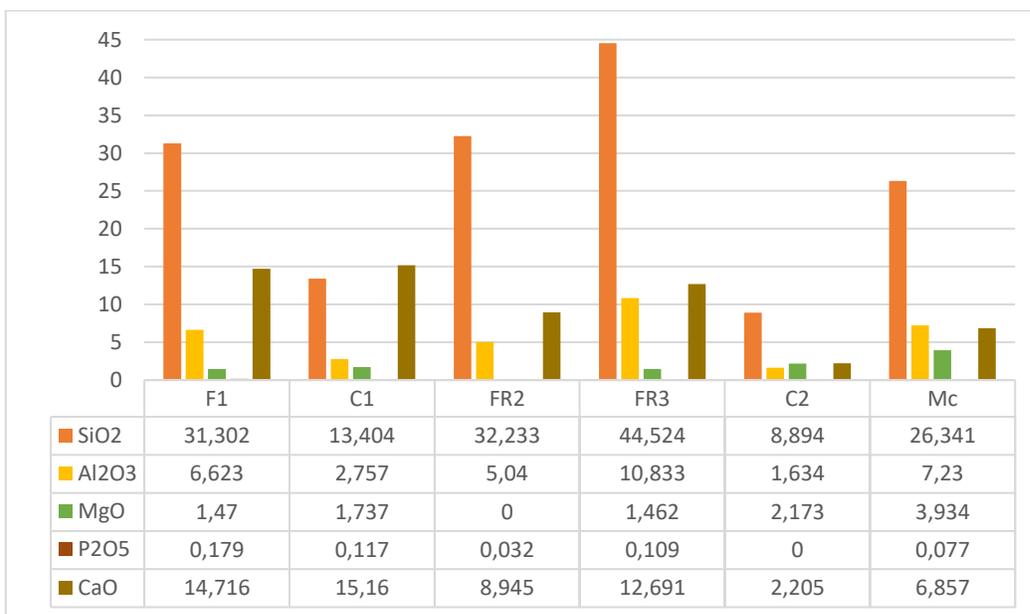


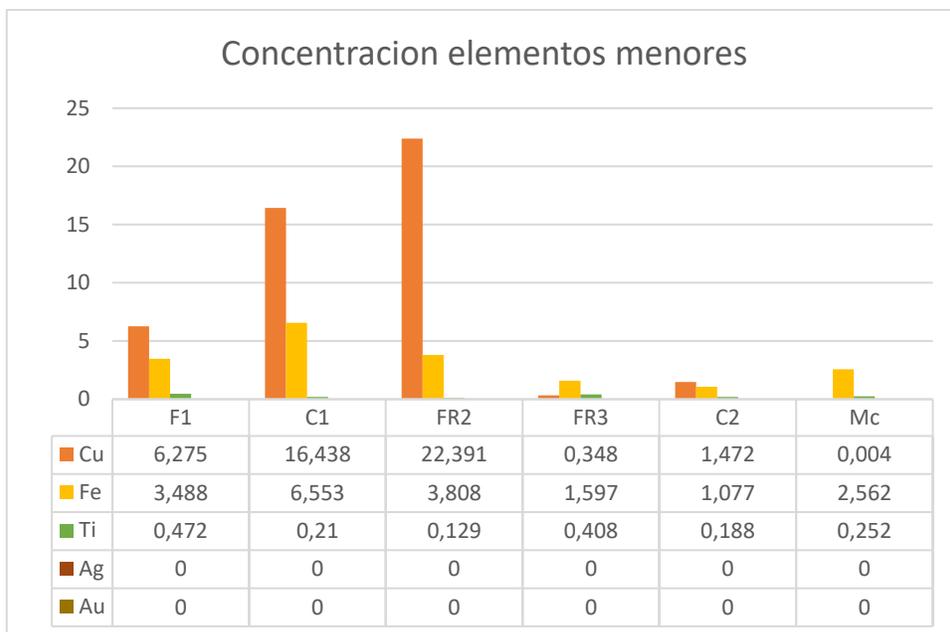
Grafico 4.3.2.3 Elementos y oxidos mayores presentes en la propiedad Virgen de Andacollo XXII

El grafico (*Grafico 4.3.2.3*) y la tabla (*Tabla.4.3.2.4*) muestran que para las concentraciones de elementos y oxidos mayores de la zona NE del área de estudio, se observa que poseen un bajo porcentaje en su contenido de *SiO2* en todas sus muestras, siendo la más baja la muestra C2 con un 8,8%.

Además se observan bajos contenido de oxido de fosforo en todas las muestras menores al 0,17%, mientras que las concetraciones de oxidos de calcio van entre los 6,8 al 15,16%, con cantidades muy bajas de de Mg en todas las muestras.

	F1	C1	FR2	FR3	C2	Mc
<b>Ti</b>	0,472	0,21	0,129	0,408	0,188	0,252
<b>V</b>	0,037	0,008	0,028	0,003	0,005	0,004
<b>Cr</b>	0	0	0	0	0	0,004
<b>Mn</b>	0,038	0,093	0,041	0,064	0,008	0,045
<b>Fe</b>	3,488	6,553	3,808	1,597	1,077	2,562
<b>Co</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Ni</b>	0,006	0,029	0,04	0	0,008	0,002
<b>Cu</b>	6,275	16,438	22,391	0,348	1,472	0,004
<b>Zn</b>	0,001	0,003	0	0,002	0	0,006
<b>As</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Se</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Rb</b>	0,004	0,001	0	0,006	0,008	0,008
<b>Sr</b>	0,046	0,07	0,033	0,015	0,055	0,034
<b>Y</b>	0,004	0,004	0	0,003	0,006	0,003
<b>Zr</b>	0,028	0,016	0,013	0,018	0,038	0,022
<b>Nb</b>	0,001	0	0	0	0	0
<b>Mo</b>	0,001	0,002	0	0,001	0	0

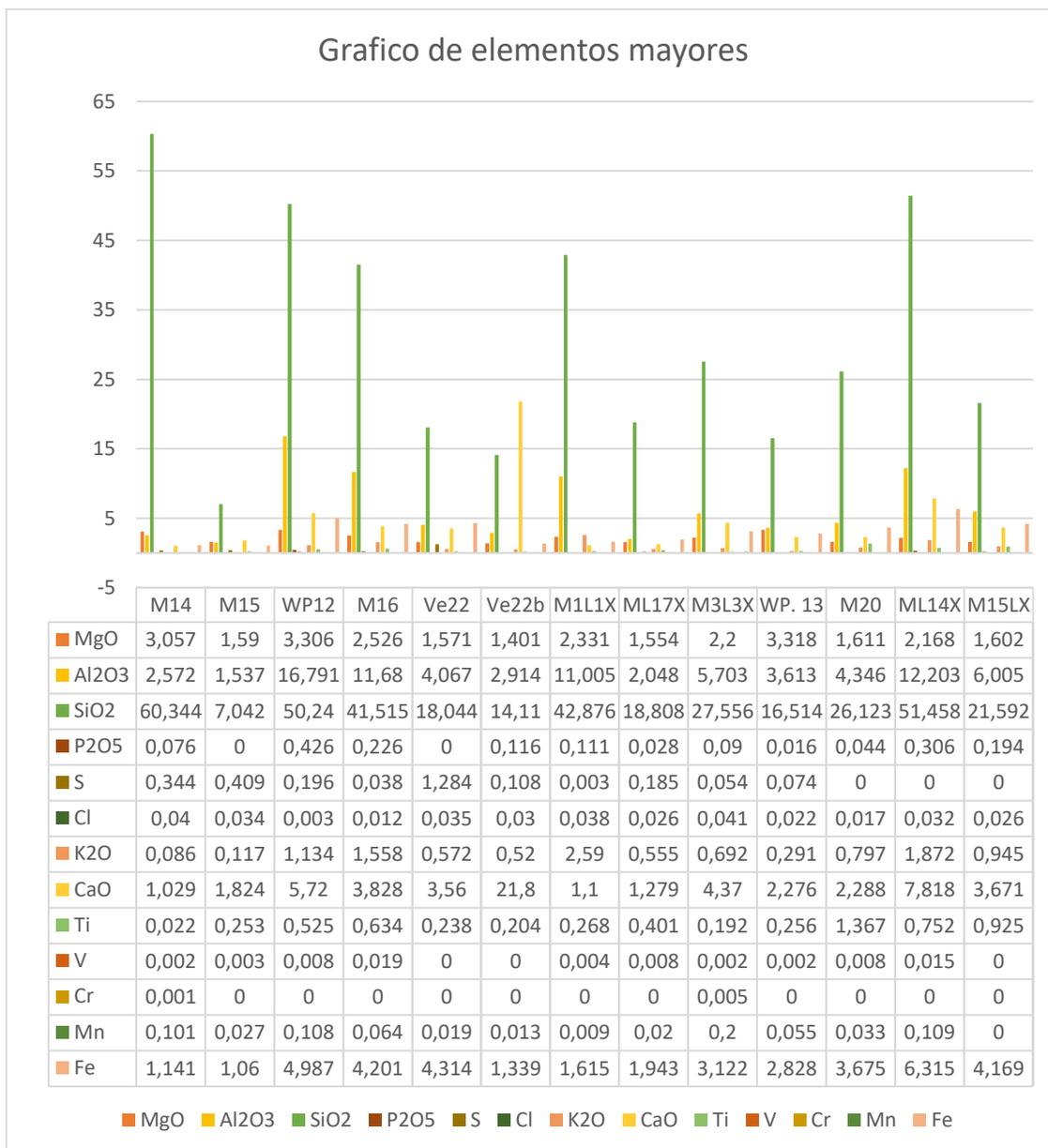
*Tabla 4.3.2.4 Tabla con concentraciones de elementos menores existentes en la pertenencia Virgen de Andacollo XXII*



*Grafico 4.3.2.5 Concentraciones de elementos menores.*

Para las concentraciones de elementos menores (Tabla 4.3.2.4) y (Grafico 4.3.2.5), se puede observar la ausencia de elementos como As, Se, Nb, Zn, Co, Mo, Au y Ag, por otro lado se observa también pequeñas cantidades de Fe que van desde los 6,53 al 1,07%, como también un aumento en la cantidad de Cu, para el caso de la muestra FR2 alcanzo porcentajes de hasta 22,39% mientras que la mas baja corresponde a la C2 con un total de 1,07%.

Las zona de muestreo realizada en el sector NW del área de estudio corresponden a las propiedades Virgen de Andacollo IX y X, en esta zona se realizo un total de 13 muestras expuestas en el siguiente Grafico 4.3.2.6.



*Grafico 4.3.2.6 Concentracion de los elementos mayores pertenecientes a Virgen de Andacollo IX y X.*

Se Observa un claro aumento en las concentraciones de SiO<sub>2</sub> en las muestras M14;WP12,M16M1L1X,ML14X y M20, llegando a niveles que van desde los 41,5 a 60,34%, también se aprecie un aumento en las cantidad de S, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y MgO, no obstante se ve una clara tendencia de disminucion en cuanto a los elementos de interés económico, ya que en el Grafico (4.3.2.7) se observa que las cantidades de Mo,Co,Au y Ag son cero para

todas las muestras y el Cu disminuye notablemente con valores que van desde los 4,1 a 0,006%.

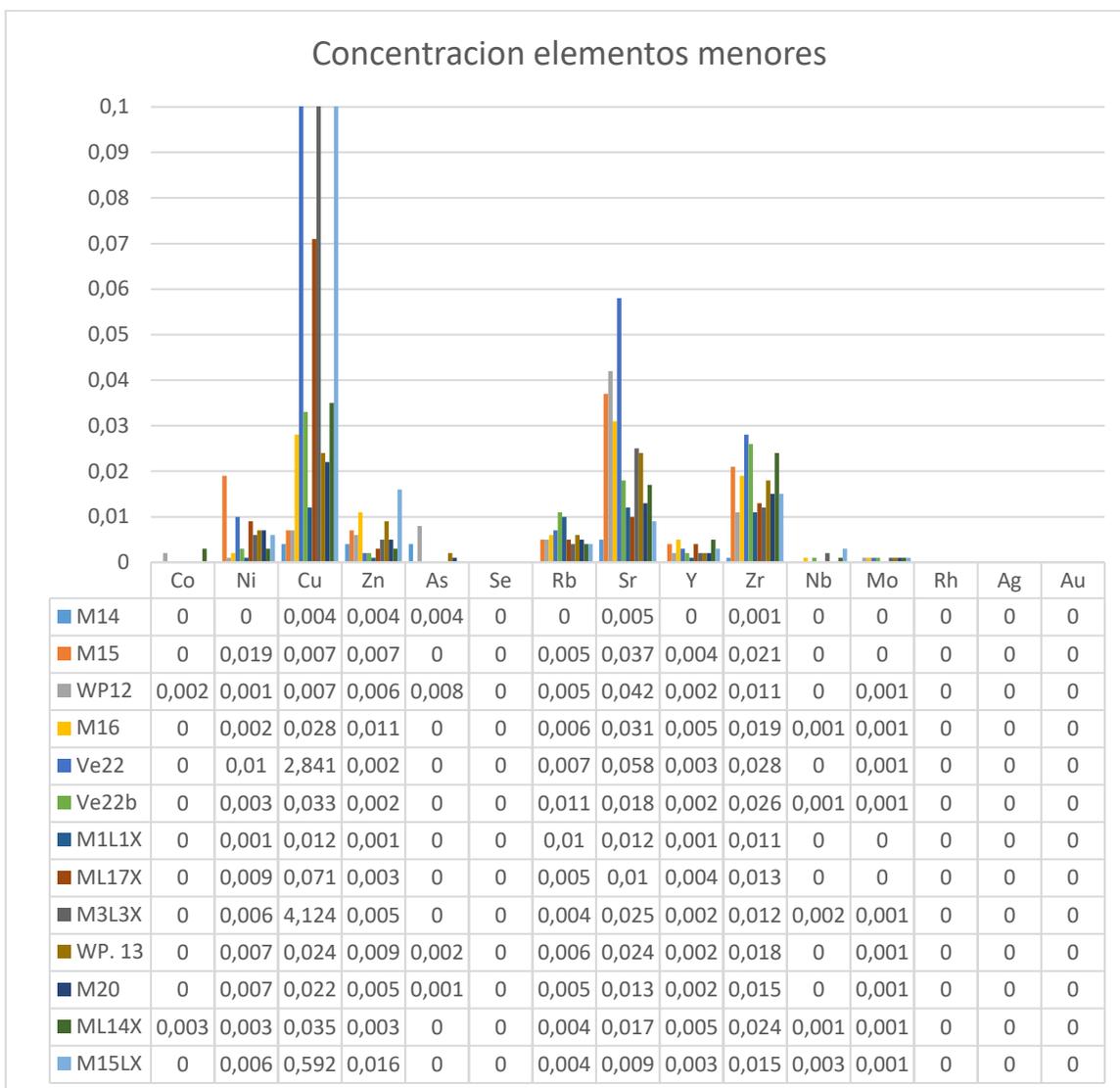


Grafico 4.3.2.7 Concentracion de porcentaje de elementos traza.

Codigo muestra/F1	C1	FR2	FR3	C2	Mc	M14	M15	WP12	M16	Ve22	Ve22b	MLLIX	ML17X	MBL3X	WP_13	M20con	ML4X	M15LX	
Analisis	1330	1331	1332	1333	1334	1335	1336	1337	1338	1339	1340	1341	1342	1343	1344	1345	1346	1347	1348
MgO	1.47	1.737	0	1.462	2.173	3.994	3.057	1.59	3.306	2.526	1.571	1.401	2.331	1.554	2.2	3.318	1.611	2.168	1.602
Al2O3	6.623	2.757	5.04	10.833	1.634	7.23	2.772	1.537	16.791	11.68	4.067	2.914	11.005	2.048	5.703	3.613	4.346	12.203	6.005
SiO2	31.302	13.404	32.233	44.524	8.894	26.341	60.344	7.042	50.24	41.515	18.044	14.11	42.876	18.808	27.556	16.514	26.123	51.433	21.592
P2O5	0.179	0.117	0.032	0.109	0	0.077	0.076	0	0.426	0.226	0	0.116	0.111	0.028	0.09	0.016	0.044	0.306	0.194
S	0	0.049	0.759	0	0	0.024	0.444	0.409	0.196	0.038	1.284	0.108	0.003	0.185	0.054	0.074	0	0	0
Cl	0.034	0.049	0.001	0.016	0.025	0.007	0.04	0.034	0.003	0.012	0.035	0.52	0.038	0.026	0.041	0.022	0.017	0.032	0.026
K2O	0.604	0.026	0.06	0.279	0.363	0.375	0.086	0.117	1.134	1.558	0.572	0.52	2.59	0.555	0.692	0.291	0.797	1.872	0.945
CaO	14.716	15.16	8.945	12.691	2.205	6.857	1.029	1.824	5.72	3.828	3.56	21.8	1.1	1.279	4.37	2.276	2.288	7.818	3.671
Ti	0.472	0.21	0.129	0.408	0.188	0.252	0.022	0.253	0.525	0.644	0.238	0.204	0.268	0.401	0.192	0.256	1.367	0.732	0.925
V	0.037	0.008	0.028	0.003	0.005	0.004	0.002	0.003	0.008	0.019	0	0	0.004	0.008	0.002	0.002	0.008	0.015	0
Cr	0	0	0	0	0	0.004	0.001	0	0	0	0	0	0	0.005	0	0	0	0	0
Mn	0.038	0.093	0.041	0.064	0.008	0.045	0.101	0.027	0.108	0.064	0.019	0.013	0.009	0.02	0.2	0.055	0.033	0.109	0.028
Fe	3.488	6.553	3.808	1.597	1.077	2.562	1.141	1.06	4.987	4.201	4.314	1.339	1.615	1.943	3.122	2.828	3.675	6.315	4.169
Co	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.003	0
Ni	0.006	0.029	0.04	0	0.008	0.002	0	0.019	0.001	0.002	0.01	0.003	0.001	0.009	0.006	0.007	0.007	0.003	0.006
Cu	6.275	16.438	22.391	0.348	1.472	0.004	0.004	0.007	0.007	0.028	2.841	0.033	0.012	0.071	4.124	0.024	0.022	0.035	0.592
Zn	0.001	0.003	0	0.002	0	0.006	0.004	0.007	0.006	0.011	0.002	0.002	0.001	0.003	0.005	0.009	0.005	0.003	0.016
As	0	0	0	0	0	0	0.004	0	0.008	0	0	0	0	0	0	0.002	0.001	0	0
Se	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rb	0.004	0.001	0	0.006	0.008	0.008	0	0.005	0.005	0.006	0.007	0.011	0.01	0.005	0.004	0.006	0.005	0.004	0.004
Sr	0.046	0.07	0.033	0.015	0.055	0.034	0.005	0.037	0.042	0.031	0.058	0.018	0.012	0.01	0.025	0.024	0.013	0.017	0.009
Y	0.004	0.004	0	0.003	0.006	0.003	0	0.004	0.002	0.005	0.003	0.002	0.001	0.004	0.002	0.002	0.002	0.005	0.003
Zr	0.028	0.016	0.013	0.018	0.038	0.022	0.001	0.021	0.011	0.019	0.028	0.026	0.011	0.013	0.012	0.018	0.015	0.024	0.015
Nb	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0.001	0	0	0.002	0	0	0.001	0.003
Mo	0.001	0.002	0	0.001	0	0	0	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Rh	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ag	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cd	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0	0	0
Sn	0	0	0	0	0.007	0.011	0	0	0	0.006	0	0.015	0	0	0.014	0	0	0	0.002
Sb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ba	0	0	0	0.043	0	0.051	0	0	0.055	0	0.059	0.049	0	0	0.051	0	0.053	0.038	0.115
La	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.07	0	0	0
Ce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hf	0.016	0.061	0	0.002	0.001	0	0	0	0	0.019	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0.008
Ta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Au	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tl	0	0	0	0.002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pb	0.003	0.018	0.004	0	0.009	0	0.002	0	0	0	0	0	0	0	0.003	0	0	0	0
Bi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001
Th	0.003	0.011	0.034	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.004	0	0	0	0	0
U	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 4.3.2.8 Resumen de los datos obtenidos mediante analisis XRF

## 4.4 Geología estructural y lineamientos

### 4.4.1 Secciones transversales

El área del proyecto “Virgen de Andacollo” (Fig. 4.4.1 y 4.4.3) se encuentra en una zona anticlinal con eje orientado al NNE emplazado en la Falla La Ternera. El sector de Virgen de Andacollo que cuenta con las pertenencias XXII, X y IX presenta dos estructuras regionales que corresponden a cabalgamientos con vergencia NW que afectan a la unidad volcánica compuesta principalmente de andesitas y basaltos-andesitas de piroxeno (AnH). Otros cuerpos subvolcánicos o hipabisales se encuentran con un rumbo N30°W los cuales están ligados directamente a la mineralización.(Fig 4.4.2)

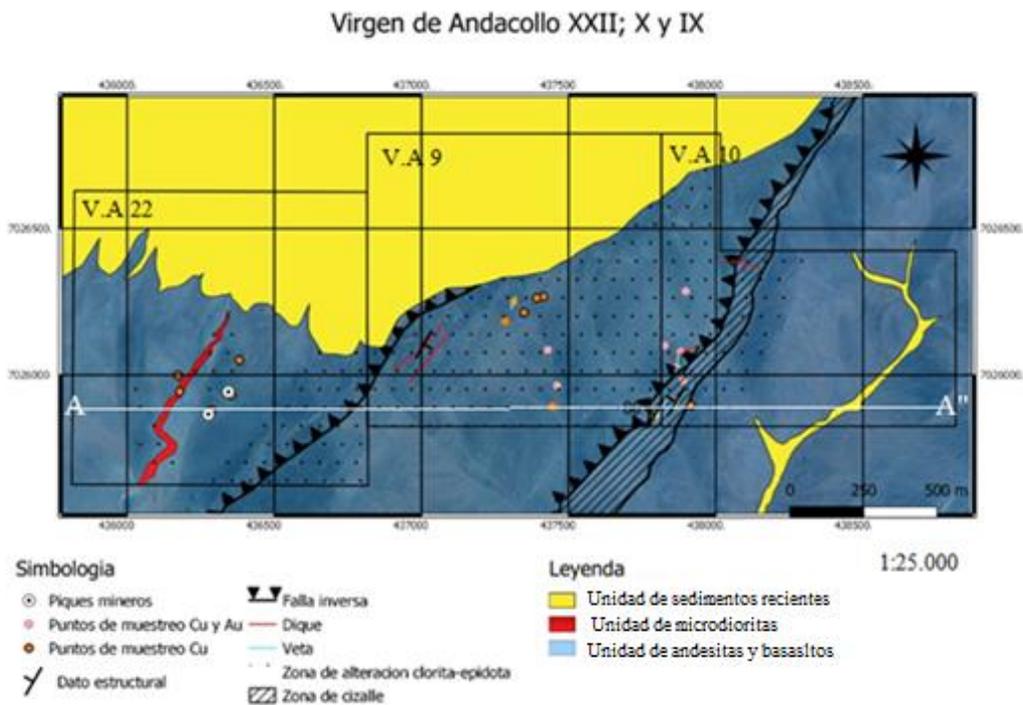
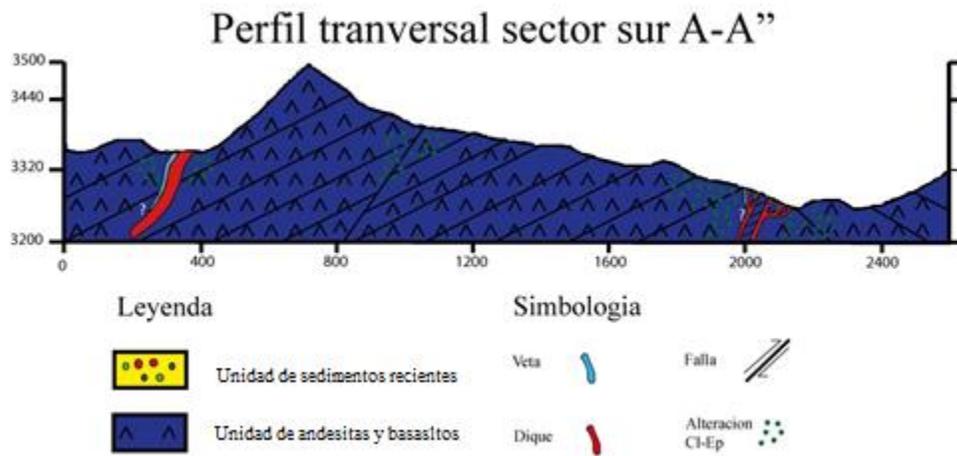


Figura 4.4.1 Mapa sector correspondiente a Virgen de Andacollo XXII, X y IX .



*Figura 4.4.2 Perfil transversal sector sur A-A'' Propiedades mineras sector norte XXII, X y IX.*

En el sector sur de la quebrada la cortadera se ubican las propiedades del proyecto Virgen de Andacollo que cuenta con las pertenencias XVII y XVIII presenta dos estructuras regionales. Una estructura previa que corresponde al despegue de Fraga (falla normal de bajo ángulo) y la Falla La Ternera (cabalgamiento) asociado al Sistema de Fallas La Ternera-Domeyko. El área de interés donde se reconoció un sistema vetiforme principal esta hospedado en las rocas volcanoclasticas y brechas sedimentarias de la Formación Llanta (cretácica).(Fig 4.4.3).

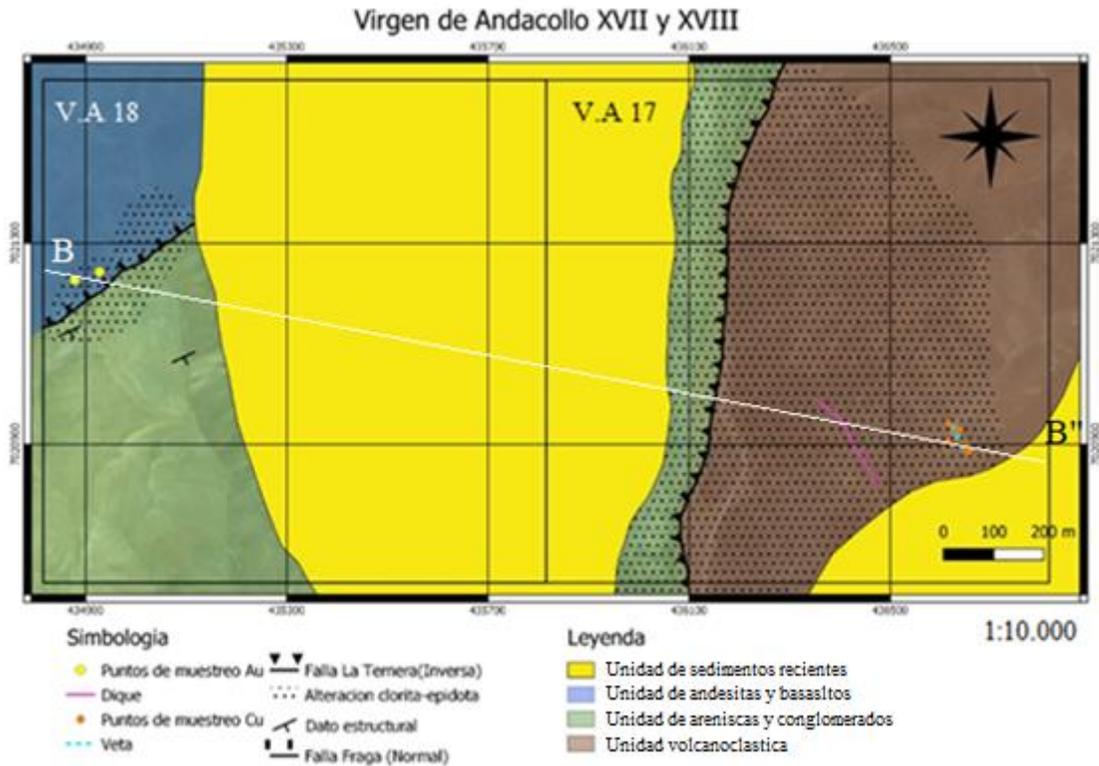


Figura 4.4.3 Mapa sector correspondiente a Virgen de Andacollo XVII y XVIII.

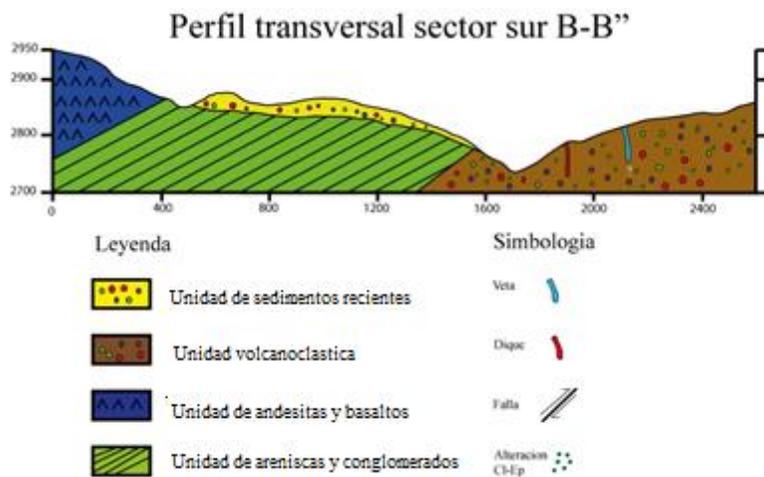


Figura 4.4.4 Perfil transversal B-B''

Las siguientes secciones hacen mención a las unidades descritas en la elaboración de estos mapas geológicos.

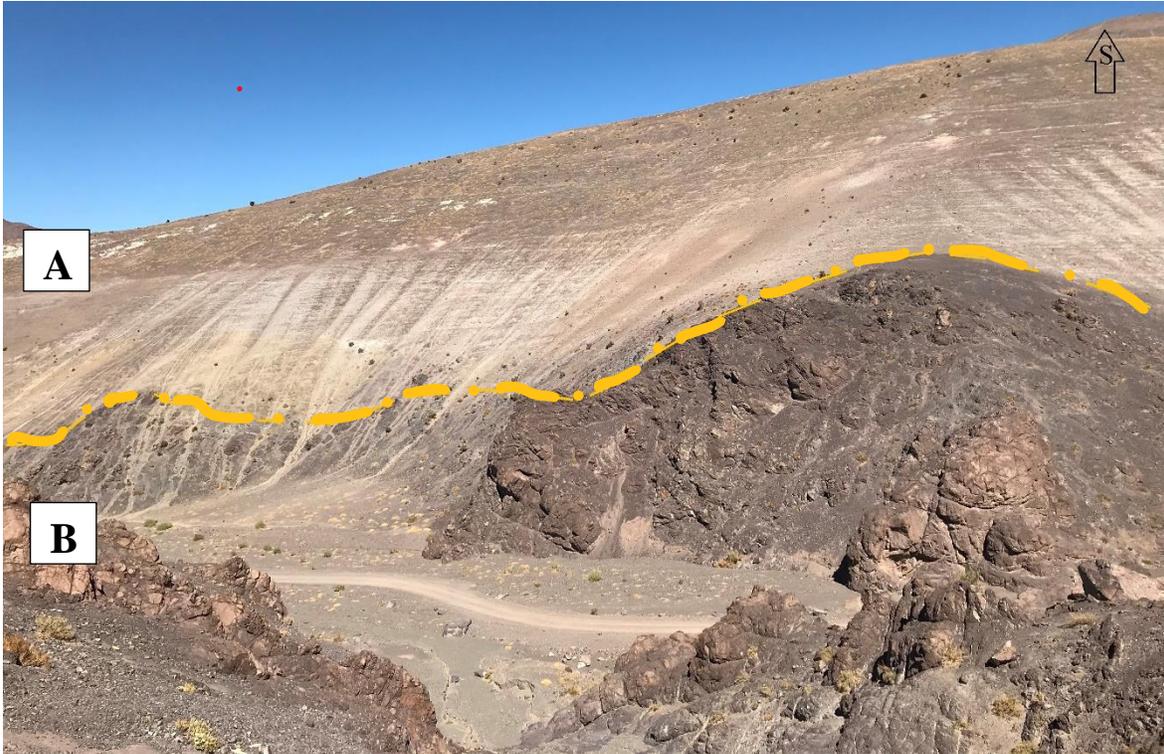
#### **4.4.2 Lineamientos Virgen de Andacollo XVII y XVIII (Sector Sur)**

El control estructural de esta zona está asociado a una serie de pliegues de orientación NE, los cuales generan cabalgamientos de la capas plegadas, los cuales a su vez son cortados por fallas de bajo ángulo. Estas estructuras se habrían formado en el Cretácico superior bajo, debido a una serie de eventos compresionales que reactivaron las fallas extensionales e invirtieron las cuencas sedimentarias y volcánicas formadas durante el Cretácico inferior alto, formando así el Anticlinal Mantos de Varita (Mathews *et al*, (2006))

Las principales fallas que se observan en el sector sur de las pertenencias son La Ternera y Fraga, además de fallas secundarias que controlan la mineralización.

##### Falla La Ternera

Esta falla se emplaza en la pertenencia V.A 17 superponiendo las unidades de areniscas (ArTrl) mediante contacto tectónico por sobre las brechas volcánicas (BVc). Esta falla es de carácter regional, inverso y de bajo ángulo (20°-10°). No presenta mineralización asociada pero forma parte de la estructura principal de un sistema tipo trend, en donde las fallas secundarias N30° E-W son las que albergan la mineralización del sector.



*Figura 4.4.2.1. Litología sector Sur la unidad A corresponde a la unidad de Areniscas y conglomerados, sobreyaciendo en contacto por falla (línea amarilla) a la unidad B que corresponden a la unidad de brechas volcanoclásticas.*

### Veta Sur

En las pertenencias Virgen de Andacollo 17 y 18 se presenta una veta mineralizada de 50 cm de potencia con orientación N30W/78°NE (Fig. 4.3.1.1.). Esta está rellena por malaquita, atacamita y crisocola, junto con pátinas de covelina. En los halos se observa una intensa brechización asociada a silicificación intensa de la roca de caja, junto con alteración a epidota moderada. La geometría de la veta es levemente sinuosa y presenta vetillas tipo stockwork o polidireccionales de cuarzo secundario

Unos 20 metros en la parte superior se observan zanjas con la misma orientación y mineralización similar, lo que permite estimar una corrida de 62,3 metros para esta estructura mineralizada. No fue posible identificar indicadores cinemáticos.

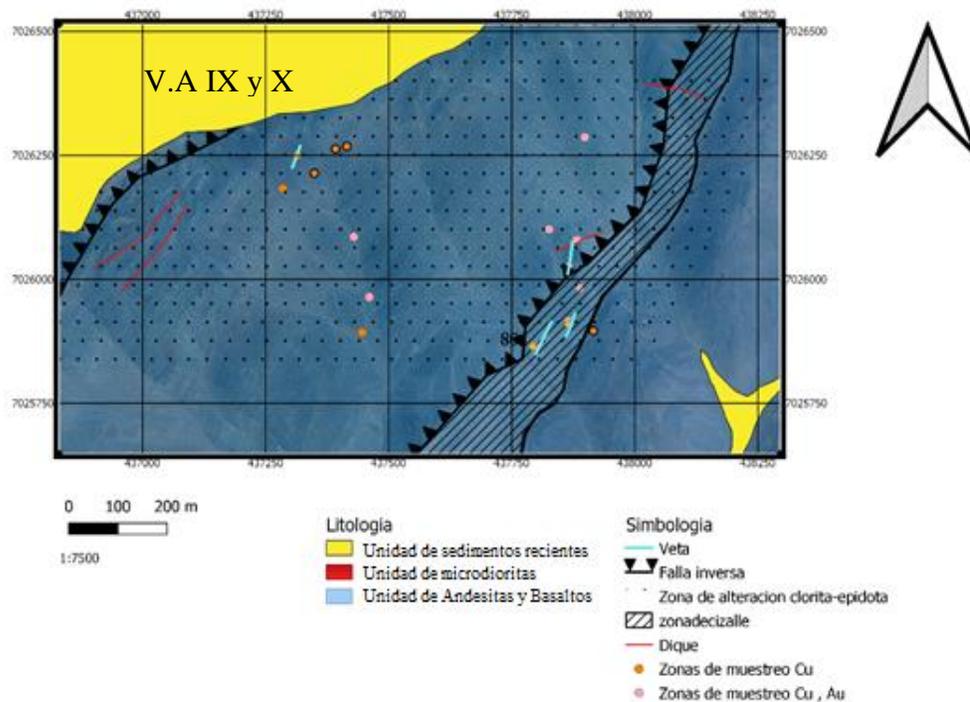
## Falla Fraga

Esta corresponde a una falla normal de bajo ángulo que posteriormente fue reactivada como falla inversa segun Matthews (2006). Se analizaron dos muestras en sector, las cuales no evidenciaron mineralización económica, aunque se observa una leve obliteración de de las plagioclasas que componen las andesitas que se ubican cercanas a la estructura.

Esta falla superpone a la unidad de andesitas y basaltos (AnH) asignadas a la Formación Sierra Fraga (jurásicas), por sobre la unidad de areniscas y conglomerados (ArThl) asignadas a la Formación La ternera (triásicas)

### **4.4.3 Lineamientos Virgen de Andacollo XXII, X y IX (Sector Norte)**

Las propiedades ubicadas en el sector norte corresponden a las minas Virgen de Andacollo IX, X y XXII, las cuales presentan lineamientos estructurales claramente diferenciables (Fig. 4.4.3.1), los cuales presentan direcciones preferenciales similares.



*Figura 4.4.3.1 Mapa de acercamiento propiedad minera Virgen de Andacollo IX y X, sector de mineralización mas relevante*



*Figura 4.4.3.2 Labor minera con ocurrencia de óxidos de cobre (malaquita, crisocola y turquesa), la orientación preferencial de la estructura es N30W/80,*

En el sector de Virgen de Andacollo IX, X y XXII se presentan estructuras de vetas con rumbo preferencial N30°W (Fig.4.4.3.2), mientras que otras estructuras mineralizadas presentan orientaciones promedio N30°E y N-S, con manteos hacia el oeste. Se observa que en las intersecciones oblicuas y ortogonales entre las estructras, aumenta el volumen de los cuerpos mineralizados.. Las potencias de las vetas varían desde 0.5 - 2 metros aproximadamente. Respecto a la corrida de estas estructuras mineralizadas, las más extensas llegan desde los 100 metros.

Otro de los puntos de posible interés económico, es una zona andesitas volcanoclásticas ubicadas en las propiedades XI y X, presentan un color pardo-rojiza con matriz afanítica y son cortadas en diversos sectores por vetas de cuarzo, la cual exponen amígdalas rellenas con óxidos de cobre masivo y clorita reemplazando a plagioclasas y rellenando vesículas. Esta podría corresponder a una gran estructura NE-SW que presenta una anomalía mineral de cobre en superficie, conformando mantos lenticulares que se extienden hacia el NE por unos 200 metros con una ley promedio de 0,4% de cobre diseminado que se presentan como relleno de amigdalas y fracturas (Fig4.3.2.2) y Fig (4.3.2.3).



*Figura 4.4.3.3 Amígdalas rellenas con crisocola y cuarzo emplazadas en el manto lenticular andesítico el cual atraviesa las propiedades IX y X.*



*Figura 4.4.3.4 A) Zanja que muestra la continuidad de una veta B) Zona de interés económico corresponde a una estructura mantiforme de mayor volumen con anomalías de óxidos de cobre en superficie.*



*Figura 4.4.3.5 Zonas con vetillo polidireccional de cuarzo con trazas de crisocola en las zonas aledañas al vetillo.*

#### **4.4.4 Apófisis y diques**

La intrusión de apofisis y diques de composición microdiorítica juegan un papel muy importante en el control de la mineralización ya que se encuentran espacialmente asociados a las principales vetas del sector. Estos cuerpos se emplazan en su mayoría, en la misma dirección que la estructuras secundarias, es decir con una orientación N30°W y lo largo del eje del anticlinal. Estos cuerpos intrusivos hipabisales son de tamaño muy variado, observándose apofisis que no superan los 3 m<sup>2</sup> y cuerpos tabulares que cortan toda la pertenencia, con distancias que van desde las 3 a los 56 metros de largo, todos con orientación similar.

Como se mencionó, la mayoría de las vetas están emplazadas en estos cuerpos irregulares, pero no todos están asociados a mineralización económica (Fig 4.4.4.1).



*Figura 4.4.4.1 Dique de composición microdiorítica con crisocola y atacamita en sus bordes*

## 5. Discusión

Las unidades de rocas andesíticas y basálticas presentes en el área de estudio pueden ser correlacionadas con el cuarto miembro (lavas superiores) de la Formación Sierra Fraga descritas en la Carta Geológica Inca de Oro. Esta secuencia volcánica aflora como una franja longitudinal de orientación NNE, correspondiente al bloque estructural alzado entre las Fallas La Cortadera y Agua Amarga, definido en los trabajos de Mpodozi y Allmandinger (1993) como parte del alóctono III. Esta es una unidad jurásica que ha sido interpretada como un engrane entre las partes más distales de las coladas de lava del arco volcánico Jurásico y la cuenca de trasarco y es uno de los bloques con mayor relevancia ya que alberga las principales estructuras mineralizadas (Veta Norte y Manto Norte). Este bloque se apoya mediante contacto por falla por sobre las rocas de la unidad de areniscas y conglomerados asociadas a la Formación La Ternera la cual forma parte del alóctono II. La unidad definida como areniscas y conglomerados, abarcan gran parte de la propiedad XVII ubicada al SE de la zona de estudio, pero no presenta mineralización económica importante. Esta formación representa el relleno de las cuencas de rift desarrolladas en el Triásico superior (Charrier, 1979; Ramos y Kay, 1991). Otra de las unidades más observadas son las brechas volcanoclásticas presentes en el sector sur del área de estudio, las cuales están asociadas a la Formación Llanta correlacionable al alóctono IV y es la unidad que alberga otra de las estructuras mineralizadas de mayor relevancia económica (Veta Sur). Las rocas presentes en el área de estudio y descritas en este trabajo concuerdan con las unidades identificadas por Mathews (2006) en el trabajo de la Carta Inca de Oro.

Las unidades descritas anteriormente se encuentran intensamente plegadas conformando una gran estructura compuesta por una serie de pliegues con orientación N30°E, volcados hacia el SE y cortados por fallas de bajo ángulo de orientación NNE. El eje del pliegue coincide con la principal falla que cruza la zona (Falla La Ternera), en los trabajos de Lledo, H. y Estay, V. (2015) se define esta zona como un conjunto de escamas tectónicas intensamente plegadas, que forman parte del Anticlinal Mantos de Varita, estructura formada durante el Cretácico superior bajo, que afecta principalmente a las rocas del miembro medio de la

Formación Sierra Fraga. Las fallas tectónicas presentes en el área de estudio que controlan algunas de las estructuras mineralizadas (Falla Fraga y Falla La Ternera) habrían sido originalmente fallas normales reactivadas como fallas inversas (Mathews, 2006). Toda esta gran estructura junto con otros 2 pliegues aledaños al área de estudio (Sinclinal quebrada de varas y el Anticlinal Sierra Agua Amarga) forman parte del Sistema de Fallas de Domeyko.

La paragénesis de alteraciones hidrotermales de la zona son en general cloritización intensa, epidotización intensa, carbonatos leves y cuarzo-sericita muy leve. Estas asociaciones indican temperaturas de formación que varían entre los 200-300 °C, lo cual indicaría que la génesis del yacimiento se debió a la presencia de fluidos de origen mesotermal, lo cual concuerda con los estudios realizados por (Espinoza y Diaz, 1998) en depósitos aledaños a la zona de estudio.

Los altos valores de concentración de  $SiO_2$  y  $CaO$  (Gráfico 5.1) obtenidos mediante análisis XRF, tomados en zonas que presentaron mineralogía de alteración hidrotermal, indican un pH neutro-alcalino corroborando la formación del depósito en un ambiente del tipo mesotermal (Corbett & Leach, 1998).

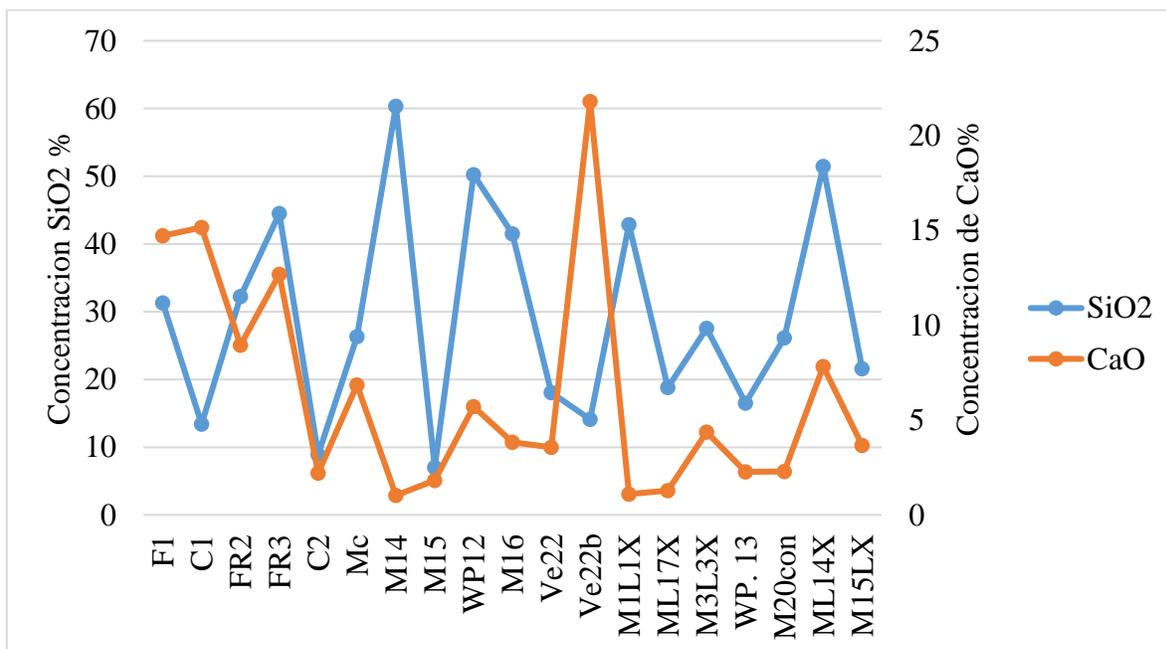


Gráfico 5.1 gráfico comparativo entre las concentraciones de  $SiO_2$  y  $CaO$ .

En lo que respecta a la edad de formación del depósito se infiere que tiene una estrecha relación con los intrusivos porfídicos correspondiente a diques y stocks microdioríticos, ya que algunos de estos cuerpos presentan mineralización de cobre en vetillas en sus bordes. Por lo general, estos cuerpos se emplazan con una orientación preferencial que sigue la estructura de la falla principal (Falla La Ternera) del área, es decir N30°E. La edad de estos intrusivos varía entre 64 y 56 Ma según los análisis K-Ar y Ar/Ar realizados por Mathews *et al* , (2006), por ende el depósito podría estar asociada a la Franja Metalogénica de Cretácico superior alto. Otra de las evidencias que apoyan esta edad está dada por las dataciones radiométricas  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  realizadas en actinolita en los halos de alteración de las vetas del yacimiento dulcinea, indicando una edad de 62,1 $\pm$ 0,5 M.a (Mathews *et al*, 2006).

Los contenidos de cobre analizados mediante E.A.A y XRF indican que las estructuras mineralizadas contienen leyes de cobre que varían entre 0,4% a 6,8% . Estas estructuras presentan corridas que van desde los 25 a los 100 metros con potencias de 0,5 a 1,5 metros. Esto permite generar una estimación de los recursos mínimos inferidos que hospeda cada una de las 3 estructuras principales reconocidas en terreno. La primera de ellas corresponde a la Veta Sur, la cual está emplazada en la unidad de brechas volcanoclásticas. Los recursos de esta estructura corresponden a 364,767 de Toneladas de roca con una ley promedio de Cu de 2,15%. La segunda corresponde a la Veta Norte, la cual está emplazada en la unidad de intrusivos microdioríticos hipabisales y cuenta con recursos del orden de 2430,05 Toneladas, con una ley promedio de 4,49%. Por último, el Manto Norte, emplazado en la unidad de andesitas porfídicas, cuenta con 999,79 Toneladas con una ley promedio de Cu de 0,46%. El Cu detectado en estas estructuras está asociado principalmente a crisocola, malaquita y calcosina en la zona supérgena, mientras que en la zona hipógena domina la calcopirita y bornita. Cabe destacar que las densidades utilizadas para las estimaciones fueron tomadas de la tabla de densidades globales establecidas por Winkler (1973) y Komar (1987).

Las estimaciones realizadas coinciden con los trabajos realizados por Zentilli (1966; 1968), quien estimó profundidades de 40-80 metros para las estructuras mineralizadas, a diferencia de este estudio que consideró una profundidad mínima de solo 5 metros para cada una de las

estructuras, con la finalidad de realizar una estimación más conservadora y dar mayor confiabilidad a la estimación.

En lo que respecta a la génesis de las unidades presentes en el área de estudio, estas corresponden principalmente a macizos rocosos alóctonos conformado por rocas que van desde el Triásico superior alto hasta el Cretácico superior alto, cubriendo las rocas que rellenaron la cuenca volcanosedimentaria, agrupadas en la Formación Llanta. Los múltiples episodios tectónicos generaron la amalgamación de estos bloques alóctonos, dejando unidades jurásicas y triásicas por sobre el relleno de cuenca de edad cretácica.

Las rocas de la Formación La Ternera se formaron como relleno de cuencas de rift con orientación WNW, limitadas por fallas normales durante el Paleozoico al Triásico (Ramos y Kay, 1991) formando parte del alóctono Triásico II, correspondiente a rocas sedimentarias de origen continental.

Rocas de la formación Sierra Fraga representan los engranes del arco volcánico Jurásico y la cuenca de tras arco, esta compuesta principalmente por lavas basálticas de olivino y piroxeno, las cuales forman parte del alóctono Jurásico III.

En el Cretácico inferior alto a superior bajo se reconoce un evento deformativo extensional de carácter regional (Mpodozis y Allmendinger, 1992; Moreno, 1994) el cual afectaría principalmente a las lavas basálticas de la Fm Sierra Fraga y la formación de despegues extensionales, con fallas normales de bajo ángulo que sobreimpusieron la unidad Jurásica (Alóctono III) en contacto tectónico por sobre la unidad de areniscas triásicas de la Formación La Ternera (Alóctono II) (Mathews et al, 2006).

## 6. Conclusiones y recomendaciones

Tras la recopilación y análisis de los datos obtenidos del trabajo en terreno se puede concluir y recomendar lo siguiente:

- Las cinco propiedades mineras hospedan sistemas vetiformes asociados a mineralización cuprífera con crisocola, turquesa, atacamita y malaquita. La presencia de sulfuros secundarios relictos en superficie sugiere un sistema sulfurado en profundidad, donde los análisis realizados por cobre total y soluble también corroboran la presencia de sulfuros, junto con la presencia de Hf como elementos traza en los diques mineralizadores y las altas concentraciones de S. El principal sulfuro secundario es la calcosina y como sulfuros hipogénos se presenta bornita, pirita y calcopirita.
- En Virgen de Andacollo XVII se detectaron leyes de Cu entre 0,7% a 6,8%, con un promedio de 2,15% mientras que las vetas presentes en Virgen de Andacollo IX, X y XXII presentan leyes desde 2,7% hasta 6,6%, con una ley media de 4,49% de cobre.
- Virgen de Andacollo IX, X y XXII presenta una arquitectura estructural tipo Riedel. La orientación preferencial de las vetas es N30°W mientras que otras estructuras mineralizadas presentan orientaciones medias N30°E y N-S con manteos hacia el oeste, mientras que la estructura tabular mineralizada de Virgen de Andacollo XVII y XVIII presenta 50 cm de potencia con corridas de 62 metros y orientación N30W/78°NE.
- La estructura que presenta mayor mineralización es la veta “Norte” en la propiedad Virgen de Andacollo X.
- La alteración hidrotermal que predomina en el sistema es la clorítica, epidota y calcita la cual afecta en gran parte a la unidad de andesitas y basaltos.
- Las alteraciones presentes en el área indican un sistema del tipo mesotermal, con minerales de alteración que se forman en sistemas con pH neutro- alcalino y temperaturas bajas (200°-300°C).

Como recomendación se propone realizar una malla de muestreo geoquímico mas detallada, con especial énfasis en las labores mineras abandonadas. Tambien es importante la elaboración de zanjas y calicatas de 3\*3 metros en las zonas de la estructura mantiforme NW-SE de mayor dimensión, con la finalidad de poder ver si este lente presenta indicios de proyecciones hacia el subsuelo ya que se observaron gran cantidad de afloramientos de oxidos de cobre de carácter superficial y sin indicios de explotación previa.

En caso de que las dos primeras recomendaciones dan resultados positivos, se propondrá realizar 3 sondajes diamantinos NQ de 100 m cada uno, con el fin de poder evidenciar a mayor profundidad, el comportamiento y continuidad de la alteración y mineralización comprobada en superficie. De acuerdo con la vectorización de la mineralización, se propone realizar estos pozos de perforación en las ropiedades Virgen de Andacollo IX, XVII y XXII (Tabla 6.1) como zonas de mayor potencial económico para realizar los sondajes.

Número de Sondaje	Rumbo	Inclinacion	Norte	Este	Cota
S1.VA.XVII	N30W	45°	7020904	436591	2799
S2.VA.X	N60E	45°	7025989	437842	3312
S3.VA.XXII	N45W	60°	7025832	436309	3329
ZANJAS	N45W	Lineal	7026183	437285	3340

*Tabla 6.1. Tabla de ubicación, actitud y coordenadas de la propuesta de sondajes.*

## 7. Referencias bibliográficas

**Aceituno, P. (1990).** Anomalías climáticas en la región sudamericana durante los extremos de la oscilación austral. *Revista Geofísica*, 32, 65-78.

**Aceituno, P., & Garreaud, R. (1995).** Impacto de los fenómenos El Niño y La Niña en regímenes fluviométricos andinos. *Rev. Soc. Chilena Ing. Hidraul*, 10(2), 33-43.

**Aguado E y JE Burt (2004)** Understanding Weather & Climate. New Jersey, Pearson Education Inc.

**Antonioletti, R. (1972).** *Características climáticas del Norte Chico*. Inst. de Investigación de Recursos Naturales.

**Bonham, H. Jr., (1988).** Models for volcanic hosted precious metal deposits. In: Bulk mineable precious metal deposits of the western United States, R.Schafer, J.Cooper and P.Vikre eds., Geol. Soc. Reno, 259-271.

**Burnham, C.W., Ohmoto, H., (1980).** Late-Stage Processes of Felsic Magmatism. Mining Geology Special Issue, No. 8, p. 1-11.

**Camprubí, A., & Albinson, T. (2006).** Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(1), 27-81.

**Camprubí, A., González-Partida, E., Levresse, G., Tritlla, J., & Carrillo-Chávez, A. (2003)** - Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 56(1), pp. 10-18.

**Camus, F., (1986).** Los yacimientos estratoligados de Cu-Pb-Zn y Ag en Chile. En: J.Frutos, R.Oyarzún y M.Pincheira eds., Geología y recursos minerales de Chile, Univ. de Concepción, V.2, 547-635.

**Candela, P., (1994).** Combined chemical and physical model for plutonic devolatilization : A non-Rayleigh fractionation algorithm. *Geoch. et Cosmoch.* 58, No. 10, 2157-2167.

**Charrier, R., Pinto, L., & Rodríguez, M. (2007)** - Chapter 3: Tectono-stratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. In: T. Moreno & W. Gibbons (eds.) *Geology of Chile*, The Geological Society, Londres (Gran Bretaña), pp. 21-115.

**Corbett, G. y Leach, T., (1994).** Southwest Pacific rim gold-copper systems: structure, alteration, and mineralization. SEG special pub. N° 6, 237 pp.

**Corbett, G.J., & Leach, T.M. (1998)** - Controls on Hydrothermal alteration and mineralization. In: G.J. Corbett & T.M. Leach (eds) *Special Publication Number 6, Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization*, Society of Economic Geology, Inc., Colorado (Estados Unidos), pp. 69-82.

**Dellmayer, R.D., Brown, M., Grocott, J., Taylor, G.K., & Treloar, P.J. (1996)** - Mesozoic Magmatic and Tectonic Events within the andean Plate Boundary Zone, 26°-27°30'S, North Chile: Constrains from 40Ar/39Ar Mineral Ages. *The Journal of Geology*, 104(1), pp. 19-40

**Espinoza, C.; Díaz, A. (1998)**. Yacimientos metalíferos de la Hoja Carrera Pinto. Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapa de Recursos Minerales de Chile 1: 18 p., 1 mapa escala 1:100.000.

**Fuenzalida, V., & Pisano, E. (1965)**. Biogeografía. Geografía Económica de Chile. *Texto Refundido, Corporación de Fomento (CORFO), Santiago*, 228, 267.

**Garreaud, R., Vuille, M., & Clement, A. C. (2003)**. The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 194(1-3), 5-22.

**Giggenbach, W. (1997)** - The Origin and Evolution of Fluids in Magmatic-Hydrothermal Systems. In: Hubert L. Barnes (ed.) *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, Tercera Edición, John Wiley and Sons Inc. Publication, New York (Estados Unidos), pp. 737-796.

**Heald, P., Foley, N. y Hayba, D., (1987)**. Comparative anatomy of volcanic hosted epithermal deposits: acid sulfate and adularia-sericite types. *Econ. Geol.*, 82, 1-26.

**Hedenquist, J., & Lowenstern, J. (1994)** - The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370, pp. 519-526.

**Hendry, D. et al. (1985)**. Chemical differences between minerals from mineralizing and barren intrusions from some North American porphyry copper deposits. *Contributions Mineral Petrology*, 89, 317-329.

**Hemley, J. J., & Jones, W. R. (1964)**. Chemical aspects of hydrothermal alteration with emphasis on hydrogen metasomatism. *Economic Geology*, 59(4), 538-569.

**Houston, J., & Hartley, A. J. (2003)**. The central Andean west-slope rainshadow and its potential contribution to the origin of hyper-aridity in the Atacama Desert. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 23(12), 1453-1464.

**Hutchison, W Adrian A. Finch, Adrian J. Boyce(2020)**-The sulfur isotope evolution of magmatic-hydrothermal fluids: insights into ore-forming processes, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 288,2020,Pages 176-198

**Iriarte, S.; Arévalo, C.; Mpodozis, C.; Rivera, O. (1996)**. Mapa Geológico de la Hoja Carrera Pinto. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, No. 3, 1 mapa escala 1:100.000

**Juliá, C., Montecinos, S., & Maldonado, A. (2008)**. Características climáticas de la Región de Atacama. *Libro rojo de la flora nativa y de los sitios prioritarios para su conservación: Región de Atacama*, 25-42.

**Komar, P. D. (1987).** Selective grain entrainment by a current from a bed of mixed sizes; a reanalysis. *Journal of Sedimentary Research*, 57(2), 203-211.

**Lledo, H., Estay, V. (2015).** Informe estudio de diagnostico geologico “Distrito Llanos de Varita” III Región de Atacama. EGM Servicios Geologicos Mineros Ltda

**Maksaev, V.; Zentilli, M. (2002).** Chilean strata-bound Cu-(Ag) deposits: An overview. In *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and related deposits: A global perspective* (Porter, T.M.; editor). PGC Publishing, Vol. 2: 185-205

**Matthews, S., Cornejo P., Riquelme, R., (2006).** Carta Inca de Oro, Región de Atacama. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica No. 102 Escala: 1 :100.000

**Miller A (1976)** The Climate of Chile. *Climates of Central and South America*. Elsevier Acientific Publishing Company: 113-145.

**Mpodozis, C.; Allmendinger, R. (1992).** Extensión cretácica a gran escala en el Norte de Chile (Puquios- Sierra Fraga, 27°S): significado para la evolución tectónica de los Andes. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 12, No. 2, p. 167-197.

**Ramos, V. A., Munizaga, F., & Kay, S. M. (1991).** El magmatismo cenozoico a los 33° S de latitud: geocronología y relaciones tectónicas. In *Congreso geologico chileno. 6* (pp. 892-896).

**Reed, M. (1997)** - Hydrothermal Alteration and Its Relationship to Ore Fluid Composition. In: Hubert L. Barnes (ed.) *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, Tercera Edición, John Wiley and Sons Inc. Publication, New York (Estados Unidos), pp. 303-366

**Rose, A. W., & Burt, D. M. (1979).** Hydrothermal alteration: In *geochemistry of hydrothermal ore deposits. John Wiley & Sons, New York, 1979) p, 173.*

**Rutllant, J., & Sippa, G. (1971).** Algunas características de la inversión de subsidencia del anticiclón subtropical. *Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Santiago.*

**Seegerstrom, K. (1960).** Cuadrángulo Quebrada Paipote, Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 2 (1): 35 p., 1 mapa escala 1:50.000.

**Sepúlveda, P.; Naranjo, J.A. (1982).** Hoja Carrera Pinto (Región de Atacama). Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, 60 p., 1 mapa escala 1:100.000.

**Seward, T., & Barnes, H. (1997)** - Metal Transport by Hydrothermal Ore Fluids. In: Hubert L. Barnes (ed.) *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, Tercera Edición, John Wiley and Sons Inc. Publication, New York (Estados Unidos), pp. 435-486.

**Squeo, F. A., Gutierrez, G. A. J., Letelier, L., Leónlobos, P., & Rentería-Arrieta, L. (2008).** Flora Amenazada de la Región de Atacama y Estrategias para su Conservación. *Ediciones Universidad de La Serena, La Serena.*

**Strahler A.N y Strahler A.H (1986)** Geografía Física. Barcelona, Ediciones Omega S.A

**Winkler, E.M. (1973).** Stone in Architecture: Properties, Durability, 3rd ed. Springer-Verlag, Berlin, 309 p.

**Zentili, M. (1966).** Informe geológico preliminar, mina de cobre Irene, Sierra Agua Amarga (San Andrés), distrito Puquios, Departamento y Comuna de Copiapó (Inédito). Empresa Nacional de Minería - Instituto de Investigaciones Geológicas:  
10 p., 3 mapas. Santiago.

**Zentili, M. (1968).** Informe Plan Carrera Pinto, Provincia de Atacama (Inédito). Instituto de Investigaciones Geológicas:  
144 p.